



PAULO PEREIRA JUNIOR

**Avaliação do Efeito da Microestrutura na
Velocidade de Propagação de Ondas
Longitudinais Criticamente Refratadas
Utilizando *Arrays* Ultrassônicos**

71/2015

CAMPINAS
2015



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

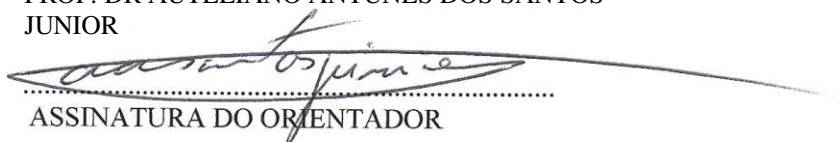
PAULO PEREIRA JUNIOR

Avaliação do Efeito da Microestrutura na Velocidade de Propagação de Ondas Longitudinais Criticamente Refratadas Utilizando *Arrays* Ultrassônicos

Tese de Doutorado apresentada à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica, na Área de Mecânica dos Sólidos e Projeto Mecânico.

Orientador: Prof. Dr. Auteliano Antunes dos Santos Junior

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO
FINAL DA TESE DEFENDIDA PELO ALUNO
PAULO PEREIRA JUNIOR, E ORIENTADA PELO
PROF. DR. AUTELIANO ANTUNES DOS SANTOS
JUNIOR



ASSINATURA DO ORIENTADOR

**CAMPINAS
2015**

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Elizangela Aparecida dos Santos Souza - CRB 8/8098

P414a Pereira Junior, Paulo, 1982-
Avaliação do efeito da microestrutura na velocidade de propagação de ondas longitudinais criticamente refratadas utilizando arrays ultrassônicos / Paulo Pereira Junior. – Campinas, SP : [s.n.], 2015.

Orientador: Auteliano Antunes dos Santos Junior.
Tese (doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Testes não-destrutivos. 2. Ultrassom. 3. Metais - Microestrutura. I. Santos Junior, Auteliano Antunes dos, 1963-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Evaluation of the effect of the microstructure in the propagation velocity of longitudinal critically refracted waves using ultrasonic arrays

Palavras-chave em inglês:

Nondestructive testing

Ultrasound

Metals - Microstructure

Área de concentração: Mecânica dos Sólidos e Projeto Mecânico

Titulação: Doutor em Engenharia Mecânica

Banca examinadora:

Auteliano Antunes dos Santos Junior [Orientador]

Sergio Tonini Button

Hélio Fiori de Castro

Ricardo Tokio Higuti

Antonio Carlos Ancelotti Junior

Data de defesa: 31-07-2015

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Mecânica

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE SISTEMAS INTEGRADOS**

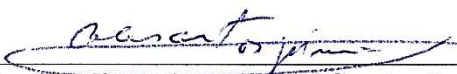
TESE DE DOUTORADO

**Avaliação do Efeito da Microestrutura na
Velocidade de Propagação de Ondas
Longitudinais Criticamente Refratadas
Utilizando *Arrays* Ultrassônicos**


Autor: Paulo Pereira Junior

Orientador: Prof. Dr. Auteliano Antunes dos Santos Junior

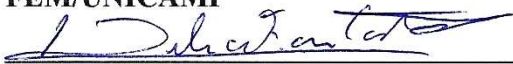
A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Tese:



Prof. Dr. Auteliano Antunes dos Santos Junior, Presidente
FEM/UNICAMP



Prof. Dr. Sergio Tonini Button
FEM/UNICAMP



Prof. Dr. Hélio Fiori de Castro
FEM/UNICAMP



Prof. Dr. Ricardo Tokio Higuti
FEIS/UNESP



Prof. Dr. Antonio Carlos Ancelotti Junior
IEM/UNIFEI

Campinas, 31 de julho de 2015.

Agradecimentos

Gostaria de prestar sinceros agradecimentos à minha mãe Maria Lúcia e à minha irmã Luciana por sempre terem me apoiado nos meus estudos.

Ao meu orientador Professor Auteliano por todo o aprendizado adquirido e incentivo dado durante a realização não só deste trabalho, mas durante todo o meu mestrado e minha graduação.

Ao Professor Bruce Drinkwater da Universidade de Bristol pelo o acolhimento em seu laboratório durante estágio de doutorado sanduíche e auxílio na realização deste trabalho.

Aos colegas do grupo de pesquisa Alexandre, Rodrigo, Cleudiane, Tainá, Vanessa, Camila e Shirley por todo o auxílio dado para o desenvolvimento do trabalho e também pelos momentos de descontração.

Aos técnicos Oswaldo e Rosângela do LAFER e Rubens do LABVIA pelo valioso apoio prestado em diversos momentos.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de pesquisa concedida no Brasil e no exterior pelo programa PDSE/CSF (processo 99999.012340/2013-08).

A Fundação de Amparo à Pesquisa do estado de São Paulo (FAPESP) pelo financiamento através dos projetos de pesquisa de números 2012/25174-9 e 2013/21616-0.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ) pelo financiamento através do projeto de pesquisa de número P479939/2012-8.

Resumo

As técnicas não destrutivas que utilizam ondas ultrassônicas para avaliação de tensões mecânicas se destacam pela sua simplicidade e baixo custo. A medição de tensão por ultrassom utiliza o princípio da acustoelasticidade que relaciona a variação da velocidade de ondas elásticas com a variação da tensão no material. Entretanto, não apenas a tensão influencia a velocidade de onda, mas também a microestrutura do material inspecionado. A influência da microestrutura pode levar a erros de medição de tensão. O objetivo deste trabalho é verificar a viabilidade da utilização de imagens ultrassônicas para avaliar o efeito de variações microestruturais na velocidade da onda ultrassônica longitudinal criticamente refratada (L_{cr}) utilizada na medição de tensões. As imagens são geradas a partir de sinais obtidos por uma sonda de transdutores estratificados (*array*) ultrassônicos e aplicando a técnica *Total Focusing Method* (TFM). Os sinais obtidos com o *array* contêm reflexões causadas pela microestrutura granular do material que resultam em um ruído no sinal conhecido como ruído de grão. Por esta razão, os sinais e, consequentemente, a imagem formada contêm informação acerca da microestrutura do material. Neste trabalho foram verificadas as relações entre tamanho e forma de grão, velocidade de onda e intensidade de ruído em imagens de TFM para amostras de aço ASTM A36. A influência da tensão e temperatura nas imagens ultrassônicas também foi analisada. Os resultados mostraram que assim como a velocidade de onda, a intensidade do ruído de grão nas imagens de TFM também sofre influência do tamanho e forma do grão do material. Entretanto, não foram verificadas variações significativas no ruído de grão em função da tensão aplicada e temperatura. Sendo a intensidade do ruído de grão nas imagens sensível somente às variações microestruturais do material, a técnica pode ser empregada para corrigir valores de velocidade de onda para medições de tensão. No trabalho também é proposto um modelo matemático para obtenção de imagens de TFM para uma dada distribuição de grãos. Os resultados obtidos com o modelo mostraram boa concordância qualitativa com os dados experimentais para a frequência de 2,5 MHz.

Palavras Chave: Testes não-destrutivos; Ultrassom; Metais – Microestrutura;

Abstract

Non-destructive techniques using ultrasonic waves to evaluate stresses excel for exhibiting simplicity and low cost. Stress evaluation by ultrasound applies the acoustoelastic theory that relates the variation in velocity of elastic waves with the variation in stress in the material. However, not only stress has influence in wave velocity, but also the microstructure of the specimen being evaluated. The microstructure influence can lead to errors in the stress measurement. The aim of this work is to verify the feasibility of using ultrasonic images to evaluate the effect of microstructural variations in the velocity of longitudinal critically refracted waves (L_{cr}) used in stress measurements. The images are generated from signals obtained with a probe of ultrasonic array applying the Total Focusing Method (TFM). The signals recorded using the array contain reflections caused by the granular structure of the material that creates a noise in the signal known as grain noise. For this reason, the signals and, consequently, the images formed carry information about the material's microstructure. In this work, it was verified the relations between size and shape of grains, wave velocity and noise intensity in TFM images for samples of ASTM A36 steel. The influence of stress and temperature in the ultrasonic images was also verified. The results showed that as for the wave velocity, the grain noise intensity in TFM images are also influenced by size and shape of grains that constitute the material under inspection. Nevertheless, no significant variations were seen in the noise intensity due to the applied stress or temperature changes. Being the noise intensity of the images sensitive only to microstructural variations, the technique presented can be used to correct values of ultrasonic wave speed in the stress evaluations. In this work, it is also proposed a mathematical model to obtain TFM images for a given distribution of grains. The results showed qualitative good agreement between simulated and experimental data for the frequency of 2.5 MHz.

Key Words: Nondestructive testing; Ultrasound; Metals – Microstructure.

Lista de Ilustrações

2.1	Representação gráfica dos tipos mais comuns de ondas usadas em ensaios não destrutivos: (a) longitudinais, (b) de cisalhamento, (c) Rayleigh, (d) Lamb simétrica (acima) e assimétrica (abaixo). Seta azul representa a direção de propagação da onda e linhas pretas o movimento das partículas	9
2.2	Desenho esquemático da geração da onda L_{cr} (PEREIRA JUNIOR, 2011)	10
2.3	Representação do campo próximo e distante para um transdutor circular (OLYMPUS, 2010)	11
2.4	Formas de arranjos para sondas de <i>array</i> (DRINKWATER & WILCOX, 2006). (a) <i>Array</i> linear, (b) <i>array</i> matricial e (c) <i>array</i> anular.....	19
2.5	Esquema de geração de um feixe de incidência (a) normal e (b) angular (OLYMPUS, 2007a)	20
2.6	Principais parâmetros dimensionais da sonda de <i>array</i> linear.....	21
2.7	Sistema de coordenadas com distância com foco no ponto F (NAKAHATA & KONO, 2012)	21
2.8	Exemplo de varredura linear (OLYMPUS, 2007b)	23
2.9	Exemplos de imagens geradas por <i>array</i> ultrassônico. (a) <i>B-scan</i> , (b) <i>C-scan</i> , (c) <i>S-scan</i> (OLYMPUS, 2010)	23
2.10	Sequência de disparo dos elementos no FMC. a) 1º elemento emitindo; b) 2º elemento emitindo; c) penúltimo elemento emitindo; d) último elemento emitindo	24
2.11	Desenho esquemático representando a formação de imagem pelo os métodos FMC e TFM	26
3.1	Fluxograma do modelo para obtenção do SNR de imagens de TFM	40
3.2	Representações de grãos para k_g igual (a) 0,5, (b) 0,75 e (c) 1. Parâmetros de simulação utilizados: diâmetro de grão médio igual 209 μm , desvio padrão igual 59 μm , RDI: $x = -1:1 \text{ mm}$ e $z = 24:26 \text{ mm}$	42
3.3	Representação de grãos (a) antes e (b) depois da aleatorização de posições. Diâmetro	

	médio de grãos = 209 μm e desvio padrão = 59 μm	43
3.4	Exemplo de distribuição de grãos (diâmetro médio de grãos = 209 μm e desvio padrão = 59 μm)	44
3.5	Exemplos de espalhamento simples e múltiplo para dois grãos	45
3.6	Esquema geométrico para o modelo de grãos como espalhadores	45
3.7	Representação do ângulo entre elemento do <i>array</i> e um ponto em (x,z) para cálculo da diretividade	47
3.8	Exemplo de sinal simulado representando o ruído de grão (frequência de 2,5 MHz)	50
3.9	Esquema geométrico para modelamento do sinal de fundo	51
3.10	Exemplo de sinal simulado representando o eco de fundo (frequência de 2,5 MHz)	51
3.11	Exemplo de imagem de TFM simulado para sinais de (a) ruído de grão e de (b) fundo da peça (frequência de 5 MHz e tamanho de grão médio de 209 μm)	52
3.12	RDI e área das imagens de TFM considerada para a simulação	53
4.1	Desenho esquemático representado a amostra sem tratamento térmico (dimensões em mm)	59
4.2	Desenho esquemático representado a amostra com tratamento térmico (dimensões em mm)	60
4.3	Desenho esquemático representado a amostra de aço API 5L X70 (dimensões em mm)	61
4.4	Modelo do transdutor utilizado para geração e recepção da onda L_{cr}	62
4.5	(a) Desenho esquemático da sonda de geração e recepção de ondas L_{cr} (dimensões em mm) e (b) foto da sonda real	63
4.6	Pulsador/receptor de sinais ultrassônicos Panametrics	64
4.7	Controlador embarcado NI PXI 8108	64
4.8	Termopar, módulo condicionador NI 9211 e módulo transmissor NI WLS/ENET-9163	65
4.9	Tela principal da aplicação “L Scope GU 2015”	65
4.10	Indicação do segundo cruzamento com o zero na onda L_{cr}	67
4.11	Telas de “filtros” (à esquerda) e “controles avançados” (à direita) da aplicação “L Scope GU 2015”	68
4.12	Desenho esquemático do sistema de medição com ondas L_{cr}	68

4.13	Unidade de controle MultiX++	69
4.14	(a) Foto da sonda de 5 MHz e 64 elementos e (b) as principais dimensões dos seus elementos	70
4.15	Tela principal do programa “Multi2000”	71
4.16	Tela do programa de medição de temperatura para sistema com <i>array</i> ultrassônico de 64 canais	72
4.17	Desenho esquemático do sistema de medição com <i>array</i> de 64 canais	72
4.18	Unidade de controle “Micropulse FMC”	73
4.19	Tela do programa da unidade de controle “Micropulse FMC”	73
4.20	Posições de medição nas amostras de (a) aço A36 e (b) API 5L X70 nos ensaios para verificação da influência da temperatura no TOF da onda L_{cr} . Todas as dimensões estão milímetros	75
4.21	Sonda de ondas L_{cr} com peso morto.....	76
4.22	Posição de medição com a sonda de ondas L_{cr} nas amostras tratadas termicamente. Todas as dimensões estão milímetros	76
4.23	Posições de medição com a onda L_{cr} propagando (a) perpendicular (posições “1” e “2”) e (b) paralela à direção de laminação (posições “3” e “4”). Dimensões em milímetros.....	77
4.24	As 6 posições de medição com a onda L_{cr} em cada amostra. Dimensões em milímetros..	77
4.25	Dispositivo de aplicação de tensão na barra de aço API 5L X70 (PEREIRA JUNIOR, 2011)	79
4.26	Posição de medição com a sonda de <i>array</i> para verificação da influência da temperatura	80
4.27	Pesos de fixação da sonda na amostra	80
4.28	Posições de medição com o <i>array</i> nas amostras tratadas termicamente (sistema de 64 canais). Dimensões em milímetros.....	81
4.29	(a) Posição de corte das amostras tratadas termicamente, (b) foto de uma amostra cortada e (c) dimensões das amostras cortadas. Dimensões em milímetros.....	82
4.30	Posições de medição com <i>array</i> para estudo da influência da direção de laminação nas imagens ultrassônicas. Dimensões em milímetros.....	84

4.31	Posições de medição com <i>array</i> para estudo da influência da posição de medição nas imagens ultrassônicas. Dimensões em milímetros.....	85
4.32	Posições de medição com <i>array</i> para estudo da influência da tensão nas imagens ultrassônicas. Dimensões em milímetros.....	85
4.33	(a) Espectro da função gaussiana utilizada como filtro e (b) sinal no domínio do tempo. Frequência de centro de 5 MHz	87
4.34	(a) Áreas delimitadas para obtenção do valor RMS do ruído de grão e intensidade do sinal de fundo em uma imagem de TFM e (b) na amostra de aço ASTM A36 (espessura de 15,9 mm)	88
4.35	Áreas delimitadas na peça para obtenção do valor RMS do ruído de grão e intensidade do sinal de fundo para amostras cortadas e tratadas termicamente.....	89
4.36	Áreas delimitadas na peça para obtenção do valor RMS do ruído de grão e intensidade do sinal de fundo para amostra de aço API 5L X70	89
5.1	Influência da temperatura no TOF da onda L_{cr} na amostra nº 21 de aço ASTM A36	90
5.2	Influência da temperatura no TOF da onda L_{cr} na amostra de aço API 5L X70	91
5.3	Variação do SNR da imagem de TFM em função da temperatura na amostra de aço ASTM A36 para profundidade entre 6 e 10 mm (amostra nº 25)	92
5.4	Variação do SNR da imagem de TFM em função da temperatura na amostra de aço ASTM A36 para profundidade entre 10 e 14 mm (amostra nº 25)	93
5.5	Exemplo de forma de onda adquirida no modo pulso eco com dois ecos de fundo da peça para obtenção do tempo de percurso	94
5.6	Variação da velocidade de onda em função da temperatura para medições com elementos do <i>array</i> no modo pulso eco	95
5.7	Variação do SNR da imagem de TFM calculada com a velocidade corrigida em função da temperatura para a profundidade entre 6 e 10 mm.....	95
5.8	Variação do SNR da imagem de TFM calculada com a velocidade corrigida em função da temperatura para a profundidade entre 10 e 14 mm.....	96
5.9	Variação do SNR da imagem de TFM em função da temperatura na amostra de aço ASTM A36 para profundidade entre 6 e 10 mm (amostra nº 17)	98

5.10	Variação do SNR da imagem de TFM em função da temperatura na amostra de aço ASTM A36 para profundidade entre 10 e 14 mm (amostra n° 17)	98
5.11	Variação do SNR em função da medição para uma mesma posição e temperatura (amostra n° 25 e $z = 6:10$ mm)	99
5.12	Variação do SNR em função da medição para uma mesma posição e temperatura (amostra n° 25 e $z = 10:14$ mm)	100
5.13	Variação do SNR da imagem de TFM em função da temperatura na amostra de aço API 5L X70.....	101
5.14	Gráfico para a variação do TOF da onda L_{cr} em função do tamanho médio de grão	102
5.15	Relação entre o SNR médio e o tamanho médio de grão para o sistema de medição de 64 canais e $z = 6:10$ mm.....	103
5.16	Relação entre o SNR médio e o tamanho médio de grão para o sistema de medição de 64 canais e $z = 10:14$ mm.....	103
5.17	Relação do TOF e SNR médio para amostras de aço ASTM A36 tratadas termicamente ($z = 6:10$ mm)	104
5.18	Relação do TOF e SNR médio para amostras de aço ASTM A36 tratadas termicamente ($z = 10:14$ mm)	105
5.19	Exemplos de imagens de TFM (2,5 MHz). Tamanhos médios de grão de (a) 98 μm , (b) 131 μm , (c) 166 μm , (d) 209 μm , (e) 98 μm , (f) 131 μm , (g) 166 μm , (h) 209 μm . As imagens de (a) até (d) foram obtidas pela simulação e de (e) até (h) foram obtidas experimentalmente	107
5.20	Variação do SNR em função do tamanho de grão para dados experimentais (sistema de 128 canais) e simulados para as frequências de (a) 2,5, (b) 5 e (c) 10 MHz	108
5.21	Variação do SNR em função do tamanho médio de grão para os sistemas de 64 e 128 canais utilizando sondas com frequência 5 MHz.....	110
5.22	Relação do TOF e SNR médio para amostras de aço ASTM A36 tratadas termicamente e medidas com sondas de <i>array</i> de (a) 2,5, (b) 5 e (c) 10 MHz	111
5.23	Variação do TOF da onda L_{cr} em função do SNR médio para medições na direção paralela e transversal à laminação das amostras ($z = 6:10$ mm)	112

5.24	Variação do TOF da onda L_{cr} em função do SNR médio para medições na direção paralela e transversal à laminação das amostras ($z = 10:14$ mm)	113
5.25	Relação entre TOF e SNR médio para diferentes amostras e posições de medição nas amostras de aço A36 ($z = 6:10$ mm)	114
5.26	Relação entre TOF e SNR médio para diferentes amostras e posições de medição nas amostras de aço A36 ($z = 10:14$ mm)	114
5.27	Variação do TOF da onda L_{cr} em função da pressão aplicada no dispositivo de tensão no ensaio com a amostra de aço API 5L X70.....	116
5.28	Variação do SNR médio das imagens de TFM em função da pressão aplicada no dispositivo de tensão no ensaio com a amostra de aço API 5L X70.....	116
5.29	Relação entre TOF e SNR médio para as amostras de aço A36 ($z = 6:10$ mm)	119
5.30	Relação entre TOF e SNR médio para as amostras de aço A36 ($z = 10:14$ mm)	119
C.1	SNR em função da fração de área para distribuições de grãos de tamanho médio de 209 e 166 μm	143

Lista de Tabelas

2.1	Valor da constante k_e em função da razão entre a menor e a maior dimensão do elemento retangular (OLYMPUS, 2010)	12
3.1	Propriedades elásticas para cálculo das amplitudes de espalhamento usando a aproximação de Born	49
4.1	Experimentos realizados no trabalho	56
4.2	Composição química do aço ASTM A36 (ASTM, 2014)	57
4.3	Propriedades mecânicas principais do aço ASTM A36 (ASTM, 2014)	57
4.4	Composição química do aço API 5L X70 (SANTOS, 2007)	58
4.5	Propriedades mecânicas principais do aço API 5L X70 (SANTOS, 2007).....	58
4.6	Tamanhos de grão médios de cada amostra e os desvios padrão das medições (BUENOS <i>et al.</i> , 2014)	60
4.7	Detalhes das sondas utilizadas com a unidade de controle “Micropulse FMC”	74
4.8	Especificações da aquisição para avaliação da influência da temperatura nas imagens ultrassônicas	81
4.9	Especificações da aquisição para avaliação da influência do tamanho de grão nas imagens ultrassônicas para o sistema de 128 canais	83
4.10	Especificações da aquisição para avaliação da influência do tamanho de grão nas imagens ultrassônicas para o sistema de 64 canais (amostra cortada)	83
4.11	Especificações da aquisição para avaliação da influência da tensão nas imagens ultrassônicas	86
5.1	Média e desvios padrão dos SNRs, em dB, para o ensaio de temperatura (amostra n° 25)	97
5.2	Número de grãos de cada modelo e tempo de simulação	106
5.3	ANOVA para o TOF da onda L_{cr}	117
5.4	ANOVA para o SNR	117

B.1	SNR por posição nas amostras tratadas termicamente para crescimento de grão (profundidade entre 6 e 10 mm)	140
B.2	SNR por posição nas amostras tratadas termicamente para crescimento de grão (profundidade entre 10 e 14 mm)	141
C.1	SNRs obtido da simulação para diferentes distribuições de grãos. Tamanho de grão médio igual a 209 μm	142
D.1	SNRs medidos, em dB, para a onda L_{cr} se propagando na direção transversal à direção de laminação. Profundidade da imagem definida entre 6 e 10 mm	145
D.2	SNRs medidos, em dB, para a onda L_{cr} se propagando na direção paralela à direção de laminação. Profundidade da imagem definida entre 6 e 10 mm	146
D.3	SNRs medidos, em dB, para a onda L_{cr} se propagando na direção transversal à direção de laminação. Profundidade da imagem definida entre 10 e 14 mm	147
D.4	SNRs medidos, em dB, para a onda L_{cr} se propagando na direção paralela à direção de laminação. Profundidade da imagem definida entre 10 e 14 mm	148
E.1	SNR em dB obtido de cada posição de medição da imagem de TFM na profundidade entre 6 e 10 mm (amostra n° 25)	149
E.2	SNR em dB obtido de cada posição de medição da imagem de TFM na profundidade entre 6 e 10 mm (amostra n° 21)	150
E.3	SNR em dB obtido de cada posição de medição da imagem de TFM na profundidade entre 6 e 10 mm (amostra n° 24)	150
E.4	SNR em dB obtido de cada posição de medição da imagem de TFM na profundidade entre 6 e 10 mm (amostra n° 17)	150
E.5	SNR em dB obtido de cada posição de medição da imagem de TFM na profundidade entre 6 e 10 mm (amostra n° 9)	151
E.6	SNR em dB obtido de cada posição de medição da imagem de TFM na profundidade entre 6 e 10 mm (amostra n° 15)	151
E.7	SNR em dB obtido de cada posição de medição da imagem de TFM na profundidade entre 6 e 10 mm (amostra n° 16)	151

E.8	SNR em dB obtido de cada posição de medição da imagem de TFM na profundidade entre 6 e 10 mm (amostra n° 19)	152
E.9	SNR em dB obtido de cada posição de medição da imagem de TFM na profundidade entre 6 e 10 mm (amostra n° 10)	152
E.10	SNR em dB obtido de cada posição de medição da imagem de TFM na profundidade entre 6 e 10 mm (amostra n° 8)	152
E.11	SNR em dB obtido de cada posição de medição da imagem de TFM na profundidade entre 10 e 14 mm (amostra n° 25)	153
E.12	SNR em dB obtido de cada posição de medição da imagem de TFM na profundidade entre 10 e 14 mm (amostra n° 21)	153
E.13	SNR em dB obtido de cada posição de medição da imagem de TFM na profundidade entre 10 e 14 mm (amostra n° 24)	153
E.14	SNR em dB obtido de cada posição de medição da imagem de TFM na profundidade entre 10 e 14 mm (amostra n° 17)	154
E.15	SNR em dB obtido de cada posição de medição da imagem de TFM na profundidade entre 10 e 14 mm (amostra n° 9)	154
E.16	SNR em dB obtido de cada posição de medição da imagem de TFM na profundidade entre 10 e 14 mm (amostra n° 15)	154
E.17	SNR em dB obtido de cada posição de medição da imagem de TFM na profundidade entre 10 e 14 mm (amostra n° 16)	155
E.18	SNR em dB obtido de cada posição de medição da imagem de TFM na profundidade entre 10 e 14 mm (amostra n° 19)	155
E.19	SNR em dB obtido de cada posição de medição da imagem de TFM na profundidade entre 10 e 14 mm (amostra n° 10)	155
E.20	SNR em dB obtido de cada posição de medição da imagem de TFM na profundidade entre 10 e 14 mm (amostra n° 8)	156
F.1	SNR em dB por posição de medição do <i>array</i> nos ensaios para verificação da influência da tensão na intensidade do ruído nas imagens de TFM	157

Lista de Abreviaturas e Siglas

Letras Latinas

a :	raio do grão	[μm]
a_m :	raio médio dos grãos para uma determinada distribuição	[μm]
a_x, a_y, a_z :	dimensões do grão elipsoidal nas direções x, y e z	[μm]
A_γ :	amplitude de onda	
Ag :	matriz de diâmetros de grãos	
$A_{e_T, e_R}^{x_g, z_g}$:	amplitude do sinal refletido pelo grão localizado em (x_g, z_g) para o par de elementos do array $e_T - e_R$	
c :	velocidade de onda longitudinal ou cisalhante no material	[m/s]
c_L :	velocidade da onda longitudinal no material	[m/s]
c_S :	velocidade da onda cisalhante no material	[m/s]
c_{sap} :	velocidade da onda longitudinal no material da sapata	[m/s]
c_T :	coeficiente de variação do TOF em função da temperatura	[ns/°C]
C_{ij} :	constantes elásticas de segunda ordem	[GPa]
C_{ijkl} :	tensor de rigidez de quarta ordem	
C_{ijk} :	constantes elásticas de terceira ordem	[GPa]
C_{ijklmn} :	tensor de rigidez de sexta ordem	
dt :	variação no TOF	[ns]
$d_{e_R}^{x_g, z_g}$:	distância entre o elemento receptor e_R do array e o grão localizado em (x_g, z_g)	[mm]
$d_{e_T}^{x_g, z_g}$:	distância entre o elemento transmissor e_T do array e o grão localizado em (x_g, z_g)	[mm]
$D_{e_T}^{x_g, z_g}$:	diretividade em função da frequência e do ângulo formado entre o grão em (x_g, z_g) e o elemento transmissor e_T do array	
$D_{e_R}^{x_g, z_g}$:	diretividade em função da frequência e do ângulo formado entre o grão em (x_g, z_g) e o elemento receptor e_R do array	
$D(\omega, \theta)$:	diretividade em função do ângulo θ e frequência ω	

e :	espaço entre elementos do <i>array</i>	[mm]
$\mathbf{e}_i, \mathbf{e}_s$:	vetores das direções da onda incidente e espalhada, respectivamente	
e_{ij} :	componentes do tensor de deformação infinitesimal	
e_T :	elemento do <i>array</i> operando como transmissor	
e_R :	elemento do <i>array</i> operando como receptor	
E_{ij} :	componentes do tensor de deformação finita	
E :	módulo de elasticidade	[GPa]
f :	Frequência	[Hz]
F :	estatística usada para o teste que corresponde à razão entre a variância entre grupos e a variância dentro de cada grupo	
$F(x,z)$:	ponto focal no material inspecionado	
G :	módulo de cisalhamento	[GPa]
gl :	número de graus de liberdade para análise estatística	
h :	altura ou elevação dos elementos de <i>array</i>	[mm]
h_{e_R, e_T} :	amplitude da onda em função do tempo obtida para o elemento e_T emissor e e_R receptor do <i>array</i>	
$H_{e_T, e_R}^{x_g, z_g}$:	espectro do sinal refletido pelo grão localizado em (x_g, z_g) para o par de elementos do <i>array</i> $e_T - e_R$	
H_{e_T, e_R}^{total} :	espectro do sinal refletido por todos os grãos para o par de elementos do <i>array</i> $e_T - e_R$	
$\mathbf{I}(\mathbf{r})$:	intensidade de imagem de TFM para o pixel na posição \mathbf{r}	
\hat{I}_{SF} :	valor de intensidade máximo na imagem de TFM do sinal de fundo da amostra	
I_{RMS} :	valor RMS da intensidade do ruído de grão da imagem do interior da peça	
k :	número de onda	
k_e :	constante definida pela razão entre o comprimento e largura do elemento	
k_g :	constante relativa à relação entre sobreposição de grãos e espaços vazios na RDI	
l, m e n :	constantes de Murnaghan	[GPa]
l_e :	largura do elemento piezelétrico	[mm]
l_T :	largura total dos elementos de um <i>array</i>	[mm]

L_{11} :	constante acustoelástica da onda longitudinal se propagando na mesma direção da tensão para materiais isotrópicos	[GPa]
L_{11}^1 :	constante acustoelástica da onda longitudinal se propagando na mesma direção da tensão para materiais ortotrópicos	[GPa]
MQ :	média quadrática	
n_λ :	cosseno diretor da direção de propagação da onda	
N_{cp} :	comprimento do campo próximo do feixe sônico	
N_r :	número de pixels definido para uma imagem de TFM	
N_x, N_z :	número de grãos nas direções x e z da RDI	
N_y :	número de grãos estimados na direção y da amostra	
p :	passo (<i>pitch</i>) ou distância centro-a-centro de cada elemento sucessivo do <i>array</i>	[mm]
\mathbf{r} :	vetor posição de um pixel qualquer na imagem	
\mathbf{r}_{e_T} :	vetor que representam a posição do elemento e_T do <i>array</i> atuando como transmissor	
\mathbf{r}_{e_R} :	vetor que representa a posição do elemento e_R do <i>array</i> atuando como receptor	
R :	distância entre o elemento central da sonda e ponto onde se deseja focalizar $F(x, z)$	[mm]
$R_{e_T, e_R}^{x_b, z_b}$:	coeficiente de reflexão para o par de elementos do <i>array</i> $e_T - e_R$ e posição fundo da amostra (x_b, z_b)	
t_0 :	tempo de percurso da onda no material sem tensão	[ns]
T :	temperatura medida nas amostras	[°C]
TOF_{corr} :	TOF corrigido em função da temperatura	[ns]
TOF_{med} :	TOF medido na amostra	[ns]
u_i :	deslocamento nas direção i	
v_{ij} :	velocidade da onda se propagando na direção i e polarizada na direção j	[m/s]
x_i :	coordenadas na direção i	
x_n :	posição do n -ésimo elemento do <i>array</i> na direção x	
x_b, z_b :	coordenadas de fundo da amostra	
x_g, z_g :	coordenadas do grão na amostra	

Xp, Zp :	matrizes de coordenadas de posição dos grãos nas direções x e z	
W :	largura da amostra na direção y	[mm]
$W(E_{ij})$:	energia de deformação	

Letras Gregas

α_i :	ângulo entre elemento do <i>array</i> e fundo da amostra	[°]
δ_{ik} :	delta de Kronecker	
ε :	deformação no corpo na direção da tensão	
θ :	ângulo entre a linha central normal ao <i>array</i> e o ponto F	[°]
θ_c :	ângulo crítico	[°]
θ_d :	ângulo entre centro de um elemento do <i>array</i> e um ponto na amostra	[°]
λ, μ :	constantes de Lamé	[GPa]
ρ :	Densidade	[kg/m³]
σ :	tensão normal	[GPa]
τ :	tensão cisalhante	[GPa]
ν :	coeficiente de Poisson do material isotrópico ou cúbico	
ν_{ij} :	coeficiente de Poisson do material ortotrópico	
ϕ_g, θ_g :	ângulos de orientação para grão simetria cúbica	[°]
ω :	frequência angular	[rad/s]
$\Delta\tau_n$:	diferença de tempo de excitação entre o elemento na posição central da sonda com o elemento posicionado em x_n	[s]

Siglas

API:	<i>American Petroleum Institute</i>
ASTM:	<i>American Society for Testing and Materials</i>
DWT:	<i>Digital Wavelet Transform</i>
FIR:	<i>Finite Impulse Response</i>

FMC:	<i>Full Matrix Capture</i>
IIR:	<i>Infinite Impulse Response</i>
L _{cr} :	Ondas Longitudinais Criticamente Refratadas
PCI:	<i>Phase-coherent Imaging</i>
PMMA:	Polimetil-Metacrilato
RDI:	Região de interesse
RMS:	<i>Root Mean Square</i>
SCI:	<i>Spatial Compounding Imaging</i>
SNR:	<i>Signal-to-noise Ratio</i>
TFM:	<i>Total Focusing Method</i>
TOF:	<i>Time-of-Flight</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Objetivos do trabalho.....	5
2	REVISÃO DA LITERATURA E ASPECTOS TEÓRICOS.....	8
2.1	Ondas ultrassônicas	8
2.2	Elasticidade	12
2.3	Acustoelasticidade	15
2.4	<i>Arrays</i> ultrassônicos	19
2.5	Revisão Bibliográfica	27
2.5.1	Medição de tensão com ultrassom	27
2.5.2	Caracterização de microestruturas com ultrassom	32
2.5.3	Uso de <i>arrays</i> e imagens de ultrassom para ensaios não destrutivos	34
2.5.4	Conclusão da Revisão Bibliográfica.....	37
3	MODELAGEM TEÓRICA	39
3.1	Distribuição de grãos	40
3.2	Geração de sinais	44
3.3	Geração de imagens	52
4	MATERIAIS E MÉTODOS	55
4.1	Corpos de prova	56
4.2	Sistemas de medição	61
4.2.1	Sistema de medição com ondas L_{cr}	62
4.2.2	Sistema para geração de imagens ultrassônicas (64 canais)	69
4.2.3	Sistema para geração de imagens ultrassônicas (128 canais)	73
4.3	Procedimentos experimentais	74
4.3.1	Avaliação da influência da temperatura no tempo de percurso da onda L_{cr}	74
4.3.2	Avaliação da influência do tamanho de grão no tempo de percurso da onda L_{cr}	76
4.3.3	Avaliação da influência da direção de laminação no tempo de percurso da onda L_{cr}	77

4.3.4	Avaliação da influência da posição de medição no tempo de percurso da onda L_{cr}	78
4.3.5	Avaliação da influência da tensão no tempo de percurso da onda L_{cr}	78
4.3.6	Avaliação da influência da temperatura na intensidade do ruído nas imagens ultrassônicas	79
4.3.7	Avaliação da influência do tamanho de grão na intensidade do ruído nas imagens ultrassônicas	81
4.3.8	Avaliação da influência da direção de laminação na intensidade do ruído nas imagens ultrassônicas	83
4.3.9	Avaliação da influência da posição de medição na intensidade do ruído nas imagens ultrassônicas	84
4.3.10	Avaliação da influência da tensão na intensidade do ruído nas imagens ultrassônicas ..	85
4.4	Processamento de imagens ultrassônicas	86
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	90
5.1	Influência da temperatura no tempo de percurso da onda L_{cr}	90
5.2	Influência da temperatura na intensidade do ruído nas imagens ultrassônicas	92
5.3	Influência do tamanho de grão no tempo de percurso da onda L_{cr} e intensidade do ruído nas imagens ultrassônicas	101
5.4	Influência da direção de laminação no tempo de percurso da onda L_{cr} e intensidade do ruído nas imagens ultrassônicas	112
5.5	Influência da posição de medição no tempo de percurso da onda L_{cr} e intensidade do ruído nas imagens ultrassônicas	113
5.6	Influência da tensão no tempo de percurso da onda L_{cr} e intensidade do ruído nas imagens ultrassônicas	115
5.7	Resumo dos resultados obtidos	120
6	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PRÓXIMOS TRABALHOS	122
	REFERÊNCIAS	127
	APÊNDICE A – Código para geração de coordenadas e tamanhos de grão	136
	APÊNDICE B – Relações sinal-ruído obtidas nas peças tratadas termicamente	140
	APÊNDICE C - Avaliação da variação da relação sinal-ruído em função de diferentes	

distribuições de grãos.....	142
APÊNDICE D – Relações sinal-ruído obtidas para ensaio de verificação da influência da direção de laminação no ruído de imagens ultrassônicas.....	144
APÊNDICE E – Relações sinal-ruído obtidas para ensaio de verificação da influência da posição de medição no ruído de imagens ultrassônicas.....	149
APÊNDICE F – Relações sinal-ruído obtidas para ensaio de verificação da influência da tensão no ruído de imagens ultrassônicas	157

1 INTRODUÇÃO

A manutenção corretiva de componentes mecânicos compõe parte significativa dos custos de operação nos mais diversos setores de engenharia. Nesse sentido, a demanda e exigência por robustez dos níveis de segurança em processos e serviços é cada vez mais alta. Mesmo quando a possibilidade de acidentes por falhas estruturais não está relacionada a riscos humanos e ambientais, todos os custos relacionados com manutenções corretivas fazem com que a prevenção seja quase sempre mais vantajosa. Partindo dessa premissa, o desenvolvimento de técnicas de inspeção capazes de avaliar a integridade estrutural de componentes mecânicos contribui para a garantia de maior nível de confiança com custos de operação reduzidos. Inspeções mais baratas significam principalmente versatilidade, rapidez e simplicidade de operação. Apesar de desejável, o desenvolvimento de técnicas de inspeções que aliem confiança e baixo custo é, na grande maioria dos casos, desafiadora.

Falhas estruturais em componentes mecânicos podem ter as mais diversas causas. Dentre as principais estão as tensões mecânicas às quais pode estar sujeito um componente. Tensões acima do limite de escoamento ou até mesmo de ruptura do material do qual é feito o componente levam a falhas estruturais. Mesmo tensões abaixo dos limites citados podem comprometer a integridade estrutural do componente, pelo fenômeno de fadiga. Nesse caso, carregamentos cíclicos mesmo com valores de tensão muito abaixo do limite de escoamento do material resultam em falhas após certo número de ciclos. Além da fadiga, em um material sujeito a tensões em determinadas direções, pode ocorrer a propagação de micro trincas pré-existentes no material e seu consequente crescimento a níveis comprometedores. Para evitar esse tipo de fenômeno, muitos componentes necessitam de tratamentos especiais que geram tensões residuais de compressão. Diante dessas situações, torna-se importante o monitoramento regular do estado de tensões em componentes críticos sujeitos a carregamentos.

A forma mais utilizada para estimar o estado de tensão de um material é por meio do uso de extensômetros (*strain gages*). Pela extensiometria, a variação de deformação do material é medida e, por meio dela, é calculada a variação de tensão no material pelas equações constitutivas da elasticidade. Contudo, a técnica apresenta duas desvantagens: a primeira deve-se

ao fato de que só é possível medir variações de tensão e não valores absolutos e a segunda é que os extensômetros devem ser permanentemente fixados na estrutura na posição em que se deseja ser feito o monitoramento. Tensões residuais, por exemplo, não podem ser obtidas de forma não destrutiva somente com o uso de extensômetros. Quando não se conhece um estado de deformação, ou tensão, de um material em um estado livre de carregamentos, como é muitas vezes o caso para componentes sob tensão residual, não é possível fazer esse tipo de avaliação. Como alternativa, utiliza-se geralmente a técnica de *hole drilling* que consiste basicamente em realizar um pequeno furo no componente inspecionado e medir com extensômetros deformações ocasionadas pela presença do furo. Como pode ser notado, o método implica, para uma grande parte de aplicações, na inutilização do componente devido ao processo de furação. A técnica de *hole drilling*, portanto, é considerada como um método destrutivo de medição de tensão.

Técnicas consideradas não destrutivas de medição de tensão vêm sendo propostas ao longo do tempo e desenvolvidas em substituição às técnicas destrutivas. Por meio da utilização de tais técnicas, o material inspecionado não é danificado e, em certos casos, não é necessária nem mesmo a remoção do componente em operação do local onde está instalado. Em termos de custo, essa possibilidade de inspeção de forma não invasiva torna-se bastante interessante. Principais exemplos de técnicas de medição de tensão não destrutivas são: difração de raios-x, difração de nêutrons e ultrassom. Dentre as três técnicas, a baseada em ondas ultrassônicas é talvez hoje a mais promissora e vantajosa do ponto vista econômico. As técnicas baseadas na difração de raios-x e nêutrons oferecem certo grau de risco à operação por lidar com radiação. Outro empecilho é a utilização em campo, em especial para a difração de nêutrons onde um reator de grande porte faz-se necessário. A profundidade superficial de penetração dos raios-x e nêutrons também pode ser um problema em casos onde se deseja medir o estado de tensões abaixo da superfície do material.

As técnicas baseadas em ondas ultrassônicas têm características interessantes. Os equipamentos empregados não necessitam na maioria dos casos serem usados apenas em laboratórios. Existem equipamentos portáteis disponíveis no mercado para a geração e recepção de ondas ultrassônicas que podem ser controlados por computadores portáteis como *laptops*, *tablets* e até mesmo *smartphones*. Alguns equipamentos permitem acesso remoto. Os níveis de energia utilizados para gerar as ondas ultrassônicas para esse tipo de aplicação são relativamente

baixos e não oferecem grandes riscos ao operador da inspeção ou ao meio ambiente. Além disso, os custos envolvidos relacionados à utilização de ondas ultrassônicas para inspeções tendem a ser consideravelmente inferiores se comparados às outras técnicas não destrutivas.

A avaliação da tensão por ondas ultrassônicas baseia-se principalmente na medição da velocidade das ondas geradas no material inspecionado. O efeito que relaciona o estado de tensão em um corpo com a velocidade de ondas elásticas emitidas nesse corpo é conhecido como acustoelástico. A teoria desenvolvida que descreve esse efeito fornece equações que relacionam tensão, velocidade de onda e propriedades elásticas do corpo como sua densidade e constantes elásticas. Diferentes tipos de onda podem ser utilizados para avaliar tensões. Podem-se destacar três técnicas principais baseadas no tipo de onda utilizada: birrefringência acústica, ondas Rayleigh e ondas longitudinais criticamente refratadas, ou ondas L_{cr} . Na birrefringência acústica, ondas transversais são utilizadas e a tensão média na direção de profundidade do material pode ser estimada. Com ondas Rayleigh, tensões na superfície do material podem ser avaliadas, pois esse tipo de onda se propaga na superfície do corpo. Ondas L_{cr} , como seu próprio nome sugere, são ondas longitudinais e se propagam próximas da superfície, mas em uma profundidade que faz com que elas não sejam afetadas por possíveis irregularidades na superfície do material. Outra característica interessante das ondas L_{cr} , observada tanto por meio da teoria acustoelástica quanto por experimentos (EGLE; BRAY, 1976), reside no fato de que a velocidade da onda longitudinal é mais sensível à variação de tensão quando comparada com a onda de cisalhamento. Por esse motivo, a técnica com ondas L_{cr} tende a apresentar maior sensibilidade a variações de tensão que a técnica de birrefringência acústica, por exemplo.

A variação da velocidade da onda ultrassônica viajando em um corpo elástico pode ter outras causas além da influência do estado de tensão atuando no material. A temperatura tem efeito substancial na velocidade de onda, por exemplo. Contudo, a relação entre temperatura e velocidade de onda é relativamente bem conhecida e estudada. A relação entre os dois parâmetros pode ser considerada linear para materiais como aços e ligas de alumínio e essa característica facilita possíveis correções de valores de velocidade medidos, quando necessário. A grande dificuldade para a aplicação efetiva de técnicas baseadas na acustoelasticidade para medição de tensão está na influência que variações de ordem microestrutural podem exercer na velocidade de ondas elásticas. Variações no tamanho e forma de grãos em metais, na textura e a presença de

outras não-uniformidades no material podem ter influência significativa na velocidade da onda ultrassônica utilizada para avaliar tensões (BUENOS, 2014). Tais desvios podem levar a erros de avaliação do estado de tensão do material. Vale salientar que o efeito acustoelástico é bastante sutil. Como exemplo, uma variação de 7 m/s na velocidade de onda no aço corresponde à aproximadamente 100 MPa em variação de tensão (ANDRINO, 2007). Avaliar o efeito de variações na microestrutura do material na velocidade da onda ultrassônica é mais complexo do que avaliar o efeito da temperatura. Enquanto a medição de temperatura pode ser feita com um simples termômetro, por exemplo, medições de tamanho de grão e textura geralmente requerem avaliações bem mais complexas, muitas vezes destrutivas e realizadas em laboratório.

Ondas ultrassônicas, também podem ser utilizadas para caracterizar materiais de forma não destrutiva. Neste caso, não só a variação da velocidade de onda ultrassônica pode ser utilizada para a obtenção de propriedades relativas à estrutura do material, mas outros parâmetros da onda também, como a atenuação e o nível do ruído retro espalhado (*backscattered*) de grão, ou estrutural. O uso de técnicas de avaliação da microestrutura do material através de ondas ultrassônicas, combinadas com técnicas de avaliação de tensão pode ser uma alternativa interessante para compensar o efeito da microestrutura na velocidade de onda. A caracterização pelo nível de ruído de grão apresenta algumas vantagens sobre as outras técnicas citadas, sendo a principal delas a possibilidade de avaliar variações estruturais localizadas ao passo que a velocidade de onda e o coeficiente de atenuação representam uma média sobre o caminho da onda (WILLEMS; GOEBBELS, 1981). Contudo, pelas técnicas não destrutivas atuais de avaliação de tamanho e forma de grãos pela medição do ruído estrutural, um grande número de medições faz-se necessário para supressão de ruídos de natureza elétrica. Na maior parte dos casos, as medições também são feitas em ambiente laboratorial utilizando tanques de imersão para evitar variações no acoplamento entre peça e transdutor durante as medições.

Transdutores multielementos, ou *arrays*, ultrassônicos são uma alternativa ao método ultrassônico tradicional utilizando transdutores monoelementos. As sondas de *arrays* ultrassônicos são formadas por vários elementos piezelétricos que podem funcionar de forma independente de acordo com o número de canais da unidade de controle empregada, responsável pela emissão e recepção de sinais da sonda. Com o uso de *arrays*, múltiplas medições podem ser realizadas em um curto intervalo de tempo para os padrões de ensaios não destrutivos e sem a

necessidade de movimentação da sonda, ao contrário do que acontece com a utilização de transdutores de elementos piezelétricos simples.

O uso de *arrays* permite ainda a formação de imagens do interior do material inspecionado com a sonda estática. Dentre a grande variedade de técnicas de formação de imagens ultrassônicas a partir de ensaios com *arrays* vale destacar a técnica *Total Focusing Method* (TFM). Para criar imagens pelo TFM, é necessário adquirir sinais referentes a todas as combinações para os elementos da sonda funcionando como emissores e receptores. Esse processo de aquisição de sinais é conhecido com *Full Matrix Capture* (FMC). No TFM cada *pixel* da imagem gerada é resultado da soma das amplitudes de todos os sinais adquiridos por meio do FMC. A vantagem do emprego TFM/FMC reside no fato de que o somatório de sinais faz com que os ruídos de natureza elétrica sejam substancialmente reduzidos (HOLMES *et al.*, 2005), enquanto o ruído de grão utilizado para caracterização microestrutural do material é mantido no sinal.

1.1 Objetivos do trabalho

O objetivo deste trabalho é verificar a viabilidade da utilização de imagens ultrassônicas para identificar as características microestruturais de tamanho e forma de grão que influenciam a velocidade de propagação da onda longitudinal criticamente refratada (L_{cr}) usada para medição de tensão. As imagens ultrassônicas foram obtidas pelo método TFM/FMC em amostras de aço ASTM A36 laminadas e em diferentes posições de medição com o *array* na amostra para avaliar o efeito da laminação, ligada à forma dos grãos. Foram medidas também amostras de aço A36 tratadas termicamente para crescimento de grão austenítico de diferentes tamanhos médios. Medidas também foram feitas do tempo de percurso da onda L_{cr} nessas amostras para verificar a possibilidade de estabelecer uma relação entre ruído de grão em imagens ultrassônicas e velocidade da onda L_{cr} . O ruído de grão nas imagens de TFM é apresentado na forma de uma relação calculada entre a intensidade máxima do eco de fundo na peça e a raiz do valor quadrático médio do ruído para uma determinada região no interior do material. Essa relação,

chamada de sinal-ruído no trabalho (SNR, de *signal-to-noise ratio*), também foi utilizada como parâmetro para comparar resultados obtidos experimentalmente e por meio de simulação de um modelo sugerido para o estudo da influência do tamanho de grão nas imagens de TFM. O modelo proposto tem a finalidade de possibilitar estimar o SNR em função da distribuição de grãos no material, se esta for previamente conhecida. Por fim, foi avaliada a influência da tensão e da temperatura no SNR das imagens de TFM. Verificando o grau de influência dos fatores microestruturais e da tensão no ruído de grão das imagens ultrassônicas, foi possível avaliar a viabilidade de utilizar esse parâmetro para caracterizar a microestrutura em um nível que possibilite serem feitas correções na velocidade da onda ultrassônica para medição de tensão. Se por exemplo, o SNR for apenas influenciado pelo tamanho ou a forma dos grãos e não pela tensão, as imagens podem ser utilizadas para fornecer informações sobre microestrutura do material. Se a relação entre microestrutura e velocidade da onda L_{cr} for conhecida, isso possibilita possíveis correções nos valores de velocidade medidos pelo de tempo de percurso da onda L_{cr} .

Este trabalho é inovador por não ser conhecido até o momento nenhum estudo sobre a relação da intensidade do ruído de grão em imagens ultrassônicas com a velocidade da onda L_{cr} usada para medições de tensão em função de variações microestruturais. De fato, os estudos de Dupond *et al.* (2011) e Shahjahan *et al.* (2014), por exemplo, estão relacionadas à geração de imagens ultrassônicas de amostras de tamanho de grão conhecido, mas apenas para efeito de comparação com resultados obtidos por um código para simulação por elementos finitos desenvolvido pelos autores. Panetta *et al.* (2014) estudaram o ruído de grão ultrassônico, mas para propor especificamente uma técnica para medição do tamanho de grão das amostras inspecionadas. Entretanto, a técnica proposta pelos autores aplica-se a medições laboratoriais com amostra e transdutor posicionadas em um tanque de imersão, dificultando a aplicação da técnica em campo. Buenos (2014), por outro lado, estudou a influência do tamanho de grão e textura na velocidade da onda L_{cr} , com intuito de estabelecer uma relação entre os parâmetros. Conhecida essa relação, a velocidade de onda pode ser corrigida para medição de tensão desde que detalhes da microestrutura do material sejam previamente conhecidos, o que em muitos casos, não ocorre na prática. Dessa forma, este trabalho está em consonância com os estudos atuais e apresenta uma contribuição para o estado atual do conhecimento.

O trabalho inicia-se com esta introdução, que apresenta o ordenamento lógico que permitiu a proposição desta tese. No Capítulo 2 é apresentada a teoria relacionada principalmente à acustoelasticidade e uma revisão da literatura abordando trabalhos relevantes e atuais, relacionados ao tema proposto na tese. No capítulo seguinte, propõe-se o modelo desenvolvido para simular o efeito do tamanho de grão na intensidade do ruído nas imagens TFM. No Capítulo 4 são descritos todos os procedimentos experimentais para avaliar a influência da direção de laminação, tamanho de grão, posição de medição, temperatura e tensão aplicada tanto no tempo de percurso da onda L_{cr} quanto no SNR das imagens de TFM. Todos os resultados são apresentados com as respectivas discussões no Capítulo 5. No Capítulo 6 é feita a conclusão do trabalho com sugestões de trabalhos futuros relacionados ao tema proposto na Tese.

2 REVISÃO DA LITERATURA E ASPECTOS TEÓRICOS

Os principais conceitos teóricos sobre a teoria acustoelástica são apresentados neste capítulo, assim como os trabalhos mais relevantes e atuais sobre os temas abordados no presente trabalho. Para apresentação da teoria acustoelástica, faz-se necessário abordar primeiramente alguns conceitos de propagação de ondas ultrassônicas e da teoria da elasticidade. Em consonância com os objetivos da tese, o próximo tópico abordado neste capítulo versa sobre *arrays* ultrassônicos, com a apresentação de conceitos sobre seu funcionamento e aplicações.

Uma seção de revisão bibliográfica foi incluída ao final do capítulo. A pesquisa feita foi focada em artigos relevantes e atuais sobre os três temas principais do trabalho: técnicas de medição de tensão com ondas ultrassônicas, caracterização de materiais utilizando ultrassom e técnicas de geração de imagens com ultrassom, aplicadas em ensaios não destrutivos. Nas técnicas de medições de tensão, os trabalhos com a utilização da onda L_{cr} receberam maior destaque tendo em vista que é o tipo de onda escolhida para esse estudo. No estudo sobre a utilização de técnicas ultrassônicas para caracterizar microestruturas é abordada a relação entre a intensidade do ruído em inspeções ultrassônicas e características microestruturais dos materiais avaliados. Concluindo, será mostrado o desenvolvimento de técnicas de imagens aplicadas na avaliação não destrutiva de materiais, com ênfase nos materiais metálicos, foco do trabalho.

2.1 Ondas ultrassônicas

O limite máximo de frequência com que o ouvido humano consegue detectar ondas acústicas é de aproximadamente 20 kHz. Ondas acústicas com frequência superior a partir dessa frequência são consideradas ondas ultrassônicas. Para aplicações em ensaios não destrutivos, entretanto, as frequências raramente excedem 20 MHz (KUNDU, 2007), por razões práticas, como as características dos materiais e a capacidade dos sistemas de transdução e aquisição de sinais ultrassônicos.

Além da frequência, as ondas ultrassônicas também são caracterizadas pela forma como elas se propagam no meio. Para meios sólidos, os principais tipos de ondas usados em ensaios não destrutivos são:

- Longitudinais,
- De cisalhamento,
- Rayleigh,
- Lamb,
- Longitudinais Criticamente Refratadas (L_{cr}).

Ondas longitudinais ocorrem quando o movimento do meio ocorre na mesma direção de propagação da onda. Já para as ondas de cisalhamento, ou transversais, o meio se movimenta perpendicularmente à direção de propagação. Ondas de Rayleigh são ondas superficiais, ou seja, se propagam na superfície do sólido, e apresentam movimento elíptico combinando o movimento longitudinal e o transversal. Ondas de Lamb são ondas guiadas que se propagam em chapas finas e podem apresentar dois tipos de propagação principais, simétrico e antissimétrico. Na Figura 2.1 são apresentados desenhos esquemáticos para esses quatro tipos de onda.

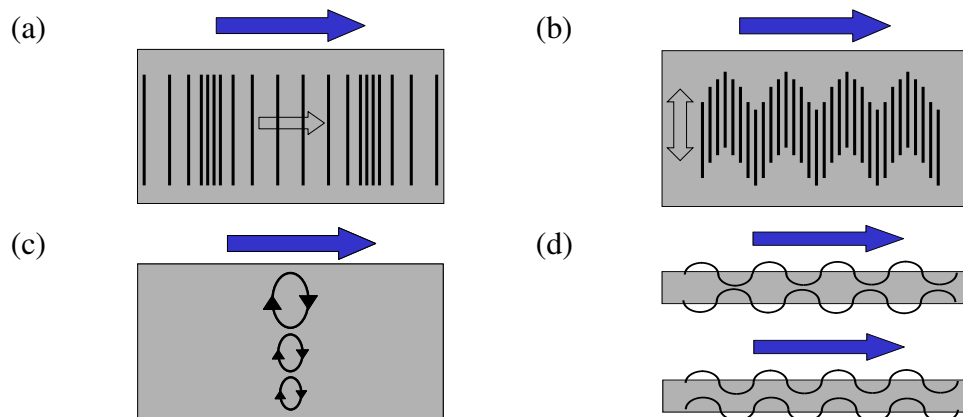


Figura 2.1. Representação gráfica dos tipos mais comuns de ondas usadas em ensaios não destrutivos: (a) longitudinais, (b) de cisalhamento, (c) Rayleigh, (d) Lamb simétrica (acima) e assimétrica (abaixo). Seta azul representa a direção de propagação da onda e linhas pretas o movimento das partículas.

Ondas L_{cr} são ondas longitudinais que se propagam até dois comprimentos de onda em profundidade, aproximadamente, da superfície (FRAGA, 2007). Por esse motivo e por se propagarem paralelas à superfície, mas abaixo desta, são chamadas de sub-superficiais. Essa característica faz com que elas sejam menos susceptíveis a possíveis imperfeições superficiais do material onde se propagam.

Por serem ondas refratadas em um ângulo crítico (1°), uma cunha é utilizada para a geração das ondas L_{cr} . Essa cunha (ou sapata) é geralmente fabricada de acrílico (PMMA) ou Rexolite[®] e é acoplada a um transdutor de ondas ultrassônicas longitudinais. A geometria dessa sapata deve permitir que a onda emitida pelo transdutor incida no ângulo crítico adequado em relação a vertical. Esse ângulo é definido pela lei de Snell (Equação 2.1), que está relacionada às velocidades da onda longitudinal na sapata (c_{sap}) e no material inspecionado (c_L), de forma que o ângulo da onda refratada no material seja igual a 90° em relação ao eixo vertical. Na Figura 2.2 é apresentado um esquema demonstrando a geração de ondas L_{cr} com representações geométricas da sapata e transdutor. O mesmo tipo de arranjo é utilizado para a recepção da onda L_{cr} .

$$\theta_c = \text{sen}^{-1}\left(\frac{c_{sap}}{c_L}\right) \quad (2.1)$$

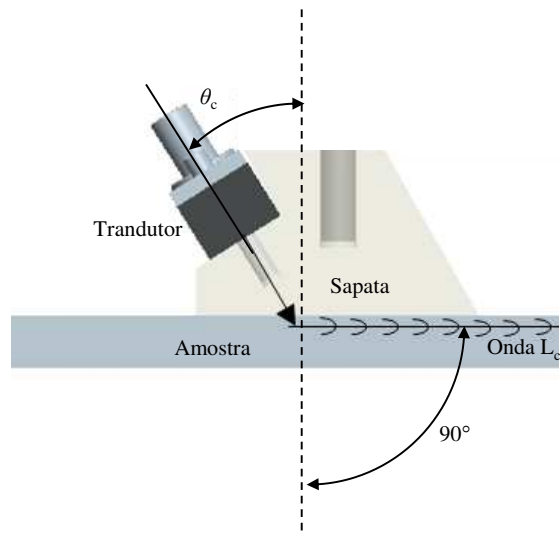


Figura 2.2. Desenho esquemático da geração da onda L_{cr} (PEREIRA JUNIOR, 2011).

O campo ultrassônico produzido por um transdutor pode ser dividido em duas regiões: o campo próximo e o campo distante, conforme pode ser visto na Figura 2.3 para um transdutor de elemento piezelétrico circular. No campo próximo o feixe apresenta variações de amplitude que dificultam, por exemplo, a medição e a caracterização de artefatos presentes nessa região no material inspecionado. No campo distante, a pressão do feixe sônico decresce gradativamente até chegar a zero. O cálculo do comprimento do campo próximo (N_{cp}) para um elemento piezelétrico retangular é dado pela seguinte equação (GINZEL, 2014):

$$N_{cp} = \frac{k_e l_e^2 f}{4c} \quad (2.2)$$

onde l_e é o comprimento do elemento, f é a frequência, c é a velocidade de onda no material e k_e é uma constante definida pela razão entre o comprimento e largura do elemento (Tabela 2.1). Para elementos circulares, k_e é igual a 1 e l_e é substituído pelo o diâmetro do elemento.

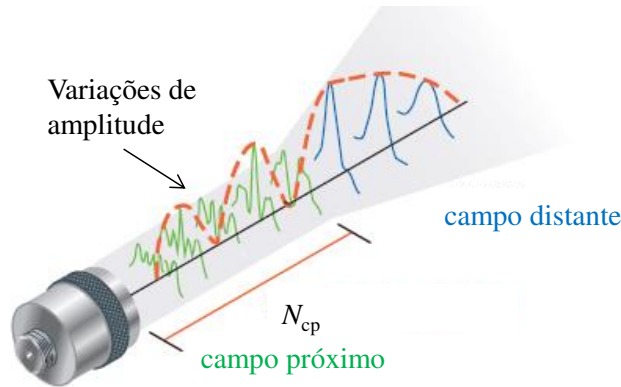


Figura 2.3. Representação do campo próximo e distante para um transdutor circular (OLYMPUS, 2010).

Tabela 2.1. Valor da constante k_e em função da razão entre a menor e a maior dimensão do elemento retangular (OLYMPUS, 2010).

Razão menor/menor dimensão	Valor de k_e
1,0	1,37
0,9	1,25
0,8	1,15
0,7	1,09
0,6	1,04
0,5	1,01
0,4	1,00
0,3 e menor	0,99

2.2 Elasticidade

Um corpo sujeito a um estado de tensões sofre deformações em decorrência de variações em sua dimensão e forma. Considerada a teoria da elasticidade clássica (também conhecida como infinitesimal) e definindo u_i com sendo o deslocamento que sofre o corpo na direção x_i , pode-se definir o tensor de deformação e_{ij} como (SADD, 2005):

$$e_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad i, j = 1, 2, 3. \quad (2.3)$$

O tensor de deformação definido na Equação 2.3 é uma aproximação considerando deslocamentos muito pequenos. Não considerando essa aproximação, pode-se utilizar a teoria das deformações finitas elaborada por Murnaghan (1952). Nesse caso, o novo tensor de deformação pode ser escrito como:

$$E_{ij} = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_k}{\partial x_i} \frac{\partial u_k}{\partial x_j} \right] \quad (2.4)$$

Vale notar na Equação 2.4 que para pequenos deslocamentos o termo $(\partial u_k / \partial x_i)(\partial u_k / \partial x_j)$ pode ser aproximado a zero e a equação se iguala a Equação 2.3 da elasticidade infinitesimal. Aqui é usada a convenção do somatório de Einstein para o subscrito repetido k .

A lei de Hooke generalizada relaciona linearmente os tensores de tensão de deformação para um meio considerado elástico e pode ser escrita como:

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} e_{kl} \quad i, j, k \text{ e } l = 1, 2 \text{ e } 3 \quad (2.5)$$

onde C_{ijkl} é a matriz de rigidez do material, um tensor de quarta ordem que contém 81 componentes chamados de constantes elásticas do material. Considerando as simetrias dos tensores de tensão e deformação, é possível realizar simplificações que reduzem o número de constantes para 36, permitindo que a notação possa ser reduzida para dois índices, como pode ser vista na lei de Hooke escrita na forma matricial como:

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_x \\ e_y \\ e_z \\ 2e_{xy} \\ 2e_{yz} \\ 2e_{zx} \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Um corpo elástico sob influência de tensões mecânicas, além de se deformar, armazena energia. Essa energia é chamada de energia de deformação. Assim, é possível também relacionar os tensores de tensão e deformação por meio de uma função de energia armazenada $W(E_{ij})$, ou energia de deformação, de acordo com a seguinte relação:

$$\sigma_{ij} = \frac{\partial W}{\partial E_{ij}} \quad (2.7a)$$

$$W(E) = \frac{1}{2} C_{ijkl} E_{ij} E_{kl} + \frac{1}{6} C_{ijklmn} E_{ij} E_{kl} E_{mn} + \dots \quad (2.7b)$$

Na Equação 2.7a o número de componentes de matriz de rigidez do material pode ser reduzido de 36 para 21, fazendo $C_{ij} = C_{ji}$ (LAI *et al.*, 1999). Vale notar que para obter a relação linear entre tensão e deformação da Equação 2.5, só o primeiro termo da equação para energia de deformação é considerado na Equação 2.7b.

Para percepção do efeito acustoelástico, a relação linear entre tensão e deformação apresentada na Equação 2.5 não é suficiente. É necessário considerar pelo menos termos de terceira ordem na função de energia de deformação. Fazendo isso, a nova relação entre tensão e deformação pode ser escrita como:

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} E_{kl} + C_{ijklmn} E_{kl} E_{mn} \quad (2.8)$$

As constantes elásticas do tensor de quarta ordem presentes nas Equações 2.5 e 2.8 são chamadas constantes elásticas de segunda ordem do material enquanto as do tensor de sexta ordem C_{ijklmn} constituem as constantes de terceira ordem do material. Apesar de conter 729 constantes de terceira ordem nesse tensor, são consideradas apenas 56 por simetria de deformação (PAO; GAMER, 1985). Entretanto, se for considerado um material ortotrópico, formado por cristais com simetria ortorrômbica, o número de constantes de terceira ordem reduz-se para 20 e o de constantes de segunda ordem passa para 9. Esse é o caso, por exemplo, de metais laminados que apresentam propriedades elásticas distintas nas três direções principais. No caso dos materiais isotrópicos, são apenas três constantes elásticas de terceira ordem independentes e duas de segunda ordem.

2.3 Acustoelasticidade

De acordo com Pao *et al.* (1984), a equação de movimento para um meio pré-deformado homogeneamente é dado por:

$$B_{ijkl} \frac{\partial^2 u_x}{\partial x_j \partial x_l} = \rho \ddot{u}_i \quad (2.9a)$$

$$B_{ijkl} = \sigma_{jl} \delta_{ik} + C_{ijkl} + C_{mjkl} \frac{\partial u_i}{\partial x_m} + C_{imkl} \frac{\partial u_j}{\partial x_m} + C_{ijml} \frac{\partial u_k}{\partial x_m} + C_{ijkm} \frac{\partial u_l}{\partial x_m} + C_{ijklmn} e_{mn} \quad (2.9b)$$

onde σ_{jl} na expressão de B_{ijkl} corresponde à tensão estática inicial à qual o corpo está submetido, δ_{ik} é o delta de Kronecker e ρ é a densidade do material no estado livre de tensão.

Seja uma onda plana descrita pela equação:

$$u_\gamma = A_\gamma \exp[ik(n_\lambda x_\lambda - ct)] \quad (2.10)$$

onde A é a amplitude da onda, k é o número de onda, n é o cosseno diretor da direção de propagação e c é a velocidade da onda.

Inserindo a equação de onda (Equação 2.10) na equação de movimento (Equação 2.9), é possível obter as velocidades de onda em função das constantes elásticas do material e das deformações pela resolução da seguinte equação característica:

$$|B_{ijkl} n_j n_l - \rho c^2 \delta_{ik}| = 0 \quad (2.11)$$

Para um meio isotrópico, com eixos definidos pelos números 1, 2 e 3, têm-se duas constantes elásticas de segunda ordem independentes no tensor de rigidez, C_{11} e C_{12} e três de terceira ordem, C_{112} , C_{661} e C_{663} (MUIR, 2009). Substituindo essas constantes no termo B_{ijkl} e considerando que as direções principais de propagação de onda e deformação sejam coincidentes, obtêm-se as seguintes equações de velocidade de onda:

$$\rho(v_{11})^2 = C_{11} + (5C_{11} + C_{112} + 4C_{661})e_{11} + (C_{12} + C_{112})e_{22} + (C_{12} + C_{112})e_{33} \quad (2.12a)$$

$$\rho(v_{12})^2 = \frac{1}{2}(C_{11} - C_{12}) + (2C_{11} - C_{12} + C_{661})e_{11} + (C_{11} + C_{663})e_{22} + (C_{12} + C_{663})e_{33} \quad (2.12b)$$

$$\rho(v_{13})^2 = \frac{1}{2}(C_{11} - C_{12}) + (2C_{11} - C_{12} + C_{661})e_{11} + (C_{12} + C_{663})e_{22} + (C_{11} + C_{663})e_{33} \quad (2.12c)$$

Nas Equações 2.12, as ondas estão se propagando na direção 1 conforme indicado no primeiro índice do sobrescrito de v . O segundo índice refere-se à direção de polarização da onda (direção de movimento das partículas). Portanto, v_{11} é a velocidade da onda longitudinal se propagando na direção 1 e v_{12} e v_{13} são velocidades de ondas de cisalhamento que se propagam na direção 1, mas estão polarizadas nas direções 2 e 3, respectivamente. e_{11} , e_{22} e e_{33} são as deformações nas direções principais.

Para materiais isotrópicos é mais comum utilizar as constantes de Lamé, λ e μ , para representar as constantes elásticas de segunda ordem e as chamadas constantes de Murnaghan, l , m e n , para as constantes elásticas de terceira ordem. A relação entre elas é mostrada na Equação 2.12 enquanto as equações de velocidade com as constantes de Lamé e Murnaghan são mostradas na Equação 2.13 (HUGHES; KELLY, 1953).

$$C_{11} = \lambda + 2\mu \quad (2.13a)$$

$$C_{12} = \lambda \quad (2.13b)$$

$$C_{112} = 2l \quad (2.13c)$$

$$C_{661} = m \quad (2.13d)$$

$$C_{663} = m - \frac{n}{2} \quad (2.13e)$$

$$\rho(v_{11})^2 = \lambda + 2\mu + (\lambda + 2l)\theta + (4\lambda + 10\mu + 4m)e_{11} \quad (2.14a)$$

$$\rho(v_{12})^2 = \mu + (\lambda + m)\theta + 4\mu e_{11} + 2\mu e_{22} - \frac{1}{2}ne_{33} \quad (2.14b)$$

$$\rho(v_{13})^2 = \mu + (\lambda + m)\theta + 4\mu e_{11} + 2\mu e_{33} - \frac{1}{2}ne_{22} \quad (2.14c)$$

$$\theta = e_{11} + e_{22} + e_{33} \quad (2.14d)$$

Considerando uma tensão uniaxial sendo aplicada na direção principal 1, pode-se substituir nas Equações 2.14 e_{11} por ε e e_{22} e e_{33} por $-\nu\varepsilon$, onde ε é a deformação no corpo na direção da tensão e ν é o coeficiente de Poisson do material. As novas equações podem ser escritas como:

$$\rho(v_{11})^2 = \lambda + 2\mu + \left[4(\lambda + 2\mu) + 2(\lambda + 2m) + 2\nu\mu \left(1 + \frac{2l}{\lambda} \right) \right] \varepsilon \quad (2.15a)$$

$$\rho(v_{12})^2 = \rho(v_{13})^2 = \mu + \left[4\mu + \nu \left(\frac{n}{2} \right) + m(1 - 2\nu) \right] \varepsilon \quad (2.15b)$$

Percebe-se pelas Equações 2.15 a relação linear entre deformação e o quadrado das velocidades de onda. Calculando a variação relativa da velocidade em função da deformação e considerando pequena a variação da deformação, obtém-se a constante acustoelástica L , que para o caso da onda longitudinal se propagando na mesma direção da tensão pode ser escrita como (BRAY; STANLEY, 1997):

$$\frac{dv_{11}/v_{11}}{d\varepsilon} = 2 + \frac{\mu + 2m + \nu\mu \left(1 + \frac{2l}{\lambda} \right)}{\lambda + 2\mu} = L_{11} \quad (2.16)$$

Nota-se que a constante acustoelástica é apenas função das constantes elásticas de segunda e terceira ordem. Para matérias ortotrópicos, a constante acustoelástica pode ser escrita como (PEREIRA JUNIOR, 2011):

$$L_{11}^1 = \frac{5C_{11} + C_{111} - (C_{12} + C_{112})\nu_{12} - (C_{13} + C_{113})\nu_{13}}{2C_{11}} \quad (2.17)$$

onde L_{11}^1 é a constante acustoelástica para a onda longitudinal se propagando na direção 1 e a tensão uniaxial também atuando na direção 1; C_{11} , C_{12} e C_{13} são as constantes elásticas de segunda ordem; C_{111} , C_{112} e C_{113} são as constantes de terceira ordem e ν_{12} e ν_{13} são os coeficientes de Poisson.

Ao invés de relacionar a velocidade com a variação da deformação $d\varepsilon$, é possível relacioná-la diretamente à variação de tensão aplicada $d\sigma$ usando a mesma constante acustoelástica. Assim, pode-se reescrever a Equação 2.16 como:

$$\frac{dv_{11}/v_{11}}{d\varepsilon} = \frac{dv_{11}/v_{11}}{\frac{d\sigma}{E}} = L_{11} \Leftrightarrow d\sigma = \frac{E(dv_{11}/v_{11})}{L_{11}} \quad (2.18)$$

onde E é o módulo de elasticidade de material.

A variação de tensão pode ser ainda relacionada com a variação do tempo de percurso dt da onda, se a distância percorrida pela onda ultrassônica não se alterar. Nesse caso, a Equação 2.18 é reescrita como sendo:

$$d\sigma = \frac{E(dt/t_0)}{L_{11}} \quad (2.19)$$

onde t_0 é tempo de percurso da onda no material sem tensão.

A Equação 2.19 é mais comumente empregada para medição de tensão por ondas L_{cr} , pois a obtenção do tempo de percurso é mais direta do que da velocidade e menos passível de imprecisões de medição, já que a distância percorrida é fixa.

É importante também ressaltar que outras constantes acustoelásticas podem ser obtidas para outras direções de tensão em relação à direção de propagação de onda e também ao tipo de onda. Na técnica da birrefringência acústica, por exemplo, a tensão do material é obtida pela diferença entre as velocidades de ondas de cisalhamento se propagando na mesma direção, mas polarizadas

em direções ortogonais. Entretanto, valores experimentais para variações relativas da velocidade com a deformação mostram que a variação da velocidade da onda longitudinal paralela à aplicação da tensão é mais significativa do que de outras ondas (EGLE; BRAY, 1976).

2.4 Arrays ultrassônicos

A sonda ultrassônica de elementos piezelétricos multielementos (*array*) é composta por um conjunto de elementos piezelétricos conectada a uma unidade de controle de múltiplos canais responsável pela emissão e recepção das ondas ultrassônicas. As formas mais comuns com que os elementos piezelétricos podem ser arranjados na sonda de *array* são na forma linear (1-D), matricial (2-D) e circular ou anular (Figura 2.4). Tradicionalmente, os elementos das sondas são fabricados a partir de cerâmica piezelétrica, como por exemplo, o titanato zirconato de chumbo (DRINKWATER; WILCOX, 2006). O número de elementos em uma sonda comercial pode variar de 16 até 256 elementos.

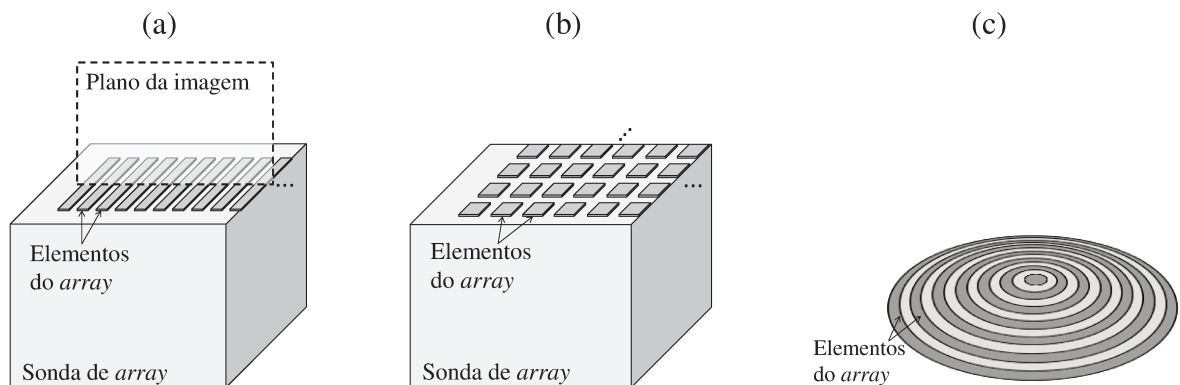


Figura 2.4. Formas de arranjos para sondas de *array* (DRINKWATER; WILCOX, 2006). (a) *Array* linear, (b) *array* matricial e (c) *array* anular.

Os elementos da sonda de *array* são ativados de forma sincronizada com intuito de gerar imagens ou feixes ultrassônicos de características desejáveis. Quando usados para essa última

finalidade, são geralmente chamados de *phased arrays*, pois pela sincronização da excitação dos elementos da sonda, as ondas ultrassônicas geradas podem apresentar diferenças em suas fases. A superimposição das ondas geradas com diferenças de fase por cada elemento piezoelétrico possibilita a geração de feixes ultrassônicos com diferentes direções e profundidade de foco. Esse efeito é possível graças às interferências construtivas ou destrutivas entre as ondas emitidas com fases distintas. Na Figura 2.5 pode-se visualizar o esquema de dois exemplos de feixes gerados com diferenças de tempo de excitação dos elementos para uma sonda linear.

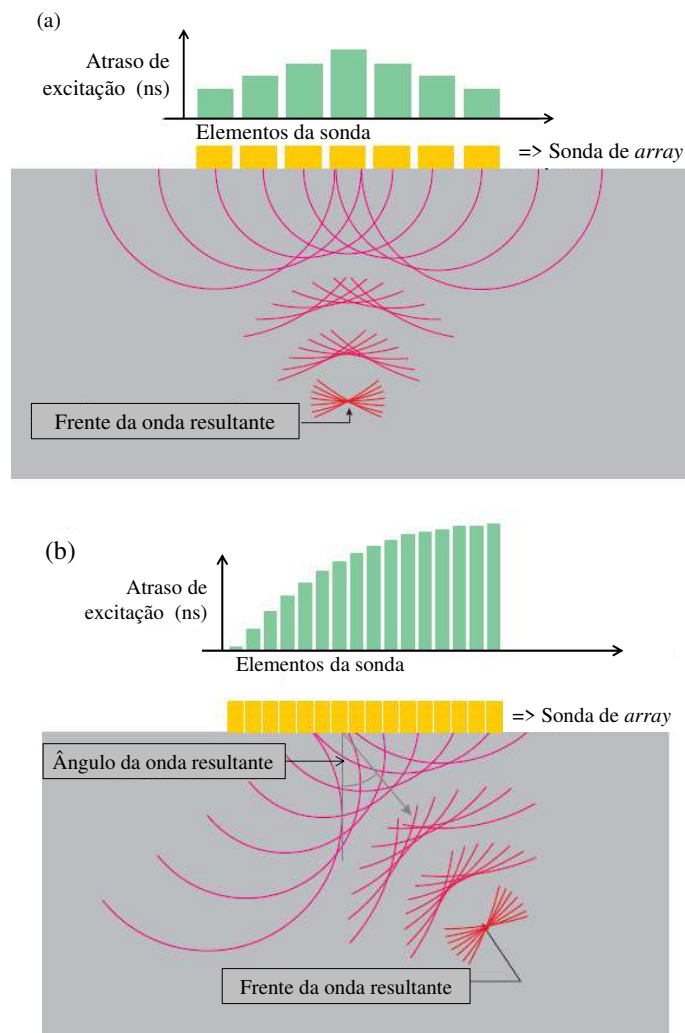


Figura 2.5. Esquema de geração de um feixe de incidência (a) normal e (b) angular (OLYMPUS, 2007a).

Os principais parâmetros dimensionais de um *array* linear são apresentados na Figura 2.6 e são: largura total (l_T); altura ou elevação do elemento (h); passo (*pitch*) ou distância centro-a-centro de cada elemento sucessivo (p); largura de um elemento individual (l_e); e espaço entre os elementos (e).

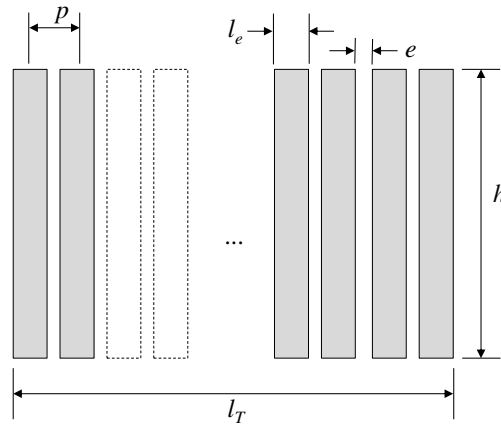


Figura 2.6. Principais parâmetros dimensionais da sonda de *array* linear.

O ajuste da direção do feixe sônico pela diferença de tempo de excitação dos elementos é regido por leis de atraso (*delay laws*). Na Figura 2.7 está representado o sistema de coordenadas para um *array* linear com foco no ponto $F(x,z)$.

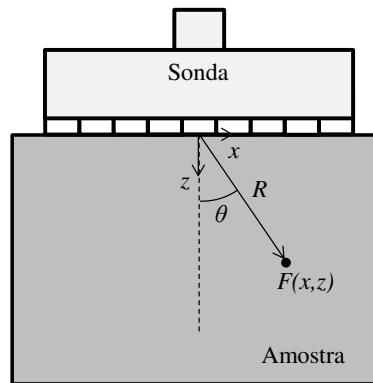


Figura 2.7: Sistema de coordenadas com distância com foco no ponto F (NAKAHATA; KONO, 2012).

A diferença de tempo de excitação $\Delta\tau_n$ entre o elemento na posição central da sonda com o elemento posicionado em x_n é dada pela equação:

$$\Delta\tau_n = R \left[1 - \sqrt{(\sin\theta - x_n/R)^2 + \cos^2\theta} \right] / c \quad (2.20)$$

onde R é a distância entre o elemento central da sonda e ponto onde se deseja focalizar F , θ é o ângulo entre a linha central normal ao *array* e o ponto $F(x,z)$ e c é a velocidade da onda ultrassônica no material inspecionado se esse for homogêneo e isotrópico.

Devido à limitação da distância de foco R , a Equação 2.20 pode ser simplificada por:

$$\Delta\tau_n = x_n \sin\theta / c \quad (2.21)$$

Na recepção, as diferenças nos tempos de excitação calculadas utilizando a Equação 2.20 podem ser utilizadas no processamento dos sinais referentes às ondas refletidas. Os atrasos calculados respectivos a cada elemento, quando aplicados às formas de onda gravadas, podem ser somados e obtém-se um sinal de saída único e de maior amplitude (SCHMERR, 2015).

Com o *array* também é possível fazer, por exemplo, uma varredura da peça inspecionada sem a necessidade de movimentar a sonda, ativando apenas um grupo de elementos de cada vez (Figura 2.8). Essa característica possibilita a criação de uma imagem de perfil (*B-scan*) do material inspecionado a partir das formas de onda gravadas em função do tempo (*A-scan*). Nessas imagens, a amplitude da onda é geralmente representada em escala de cor, o eixo vertical representa o caminho percorrido pela onda na peça e o vertical a direção da varredura. Outros tipos de imagens podem ser gerados com uma sonda de *array* como, por exemplo, o *C-scan* onde é feita uma imagem do topo da peça. Nesse caso existe uma varredura física em uma direção e uma varredura eletrônica do *array* na outra direção do plano. Outro tipo de imagem é o *S-scan*, uma imagem setorial que pode ser gerada com *arrays* criada a partir de feixes direcionados em sucessivos ângulos na peça usando um mesmo conjunto de elementos e distância focal. Exemplos de imagens de *B-scan*, *C-scan* e *S-scan* de peças com furos simulando defeitos são mostrados na Figura 2.9.

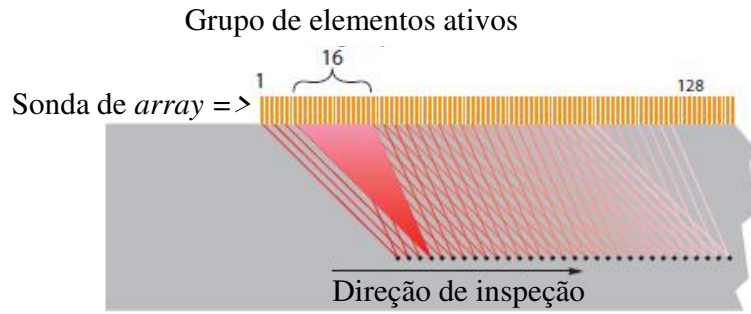


Figura 2.8: Exemplo de varredura linear (OLYMPUS, 2007b).

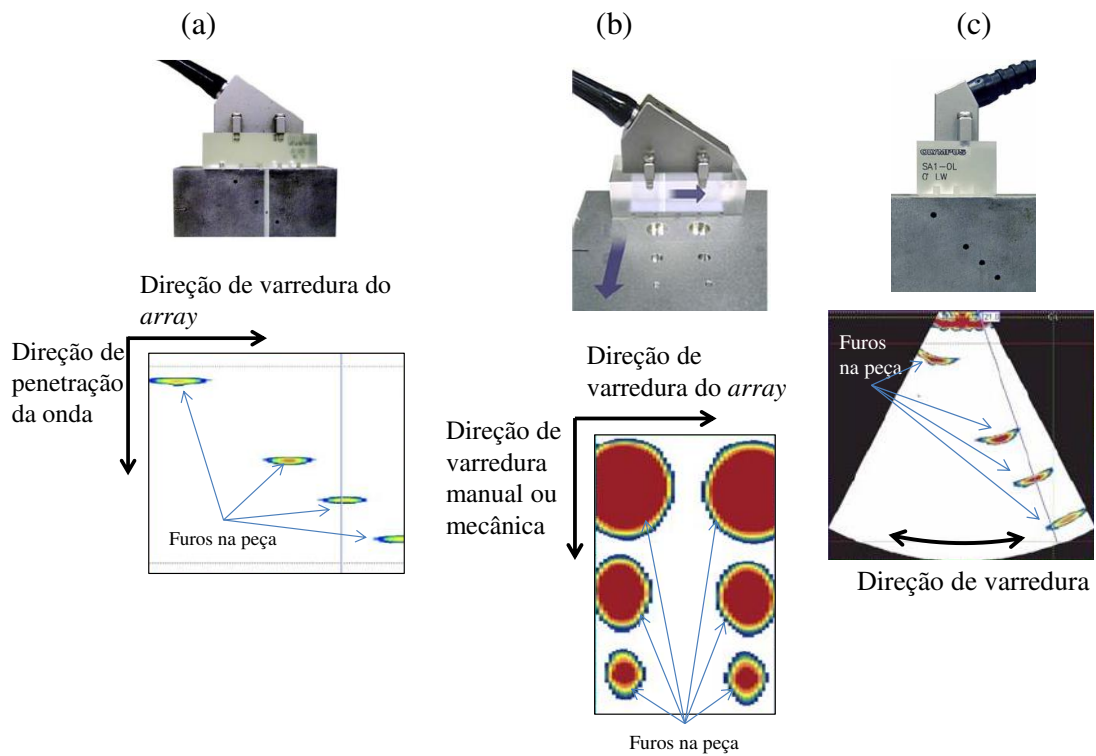


Figura 2.9. Exemplos de imagens geradas por array ultrassônico. (a) *B-scan*, (b) *C-scan*, (c) *S-scan* (OLYMPUS, 2010).

Outro método para geração de imagens ultrassônicas que começa a ser utilizado em aplicações de ensaios não destrutivos é o *Total Focusing Method* (TFM) (DRINKWATER; WILCOX, 2006). Para a geração de imagens pelo TFM é necessária a gravação das formas de onda de todas as combinações de pares de elementos transmissores e receptores de onda do

array. Para isso, o controlador do *array* deve ser configurado para emitir com um elemento da sonda e gravar os sinais recebidos por todos os seus elementos. Após a gravação dos sinais, deve ser disparado o próximo elemento do *array* e novamente deve-se armazenar os sinais de todos os elementos. Esse processo, que é conhecido como *Full Matrix Captue* (FMC), é exemplificado na Figura 2.10.

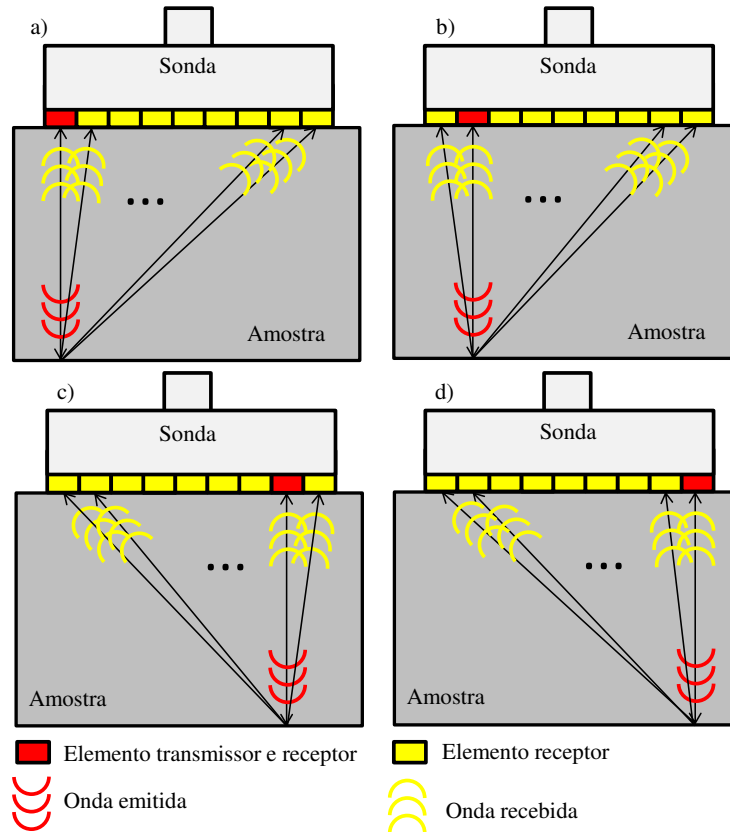


Figura 2.10. Sequência de disparo dos elementos no FMC. a) 1º elemento emitindo; b) 2º elemento emitindo; c) penúltimo elemento emitindo; d) último elemento emitindo.

Pelo TFM, sendo \mathbf{r} o vetor posição de um pixel qualquer na imagem que se queira gerar, \mathbf{r}_{e_T} e \mathbf{r}_{e_R} vetores que representam as posições de um elemento atuando como transmissor e elemento receptor, respectivamente, a intensidade da imagem do pixel localizado em \mathbf{r} é dada por (WILCOX *et al.*, 2007):

$$I(\mathbf{r}) = \left| \sum_{e_T=1}^N \sum_{e_R=1}^N h_{e_T, e_R} \left(\frac{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_{e_T}| + |\mathbf{r}_{e_R} - \mathbf{r}|}{c} \right) \right| \quad (2.22)$$

onde $h_{e_R, e_T}(t)$ é a amplitude da onda em função do tempo captada pelo elemento e_R (receptor) quanto o elemento e_T transmite a onda no instante t .

Nota-se pela Equação 2.22 que a intensidade de cada pixel na imagem gerada é resultado do somatório das amplitudes de todas as formas de onda gravadas para as posições correspondentes à localização do pixel na amostra. Nesse processo de sucessivas somas, reside a principal vantagem do TFM que é o de reduzir ruídos elétricos de natureza randômica na imagem gerada (HOLMES *et al.*, 2005). Com isso, a sensibilidade para detecção de defeitos menores aumenta, e, para a aplicação deste trabalho, as imagens se mostram mais sensíveis ao ruído de grão com a redução do ruído elétrico. Em um primeiro momento, como desvantagem, pode-se apontar para o custo computacional de se gravar e processar N^2 formas de onda, entretanto, esse inconveniente vem sendo reduzido com o aumento constante das velocidades de processamento e redução de custos computacionais. Equipamentos portáteis de inspeção capazes de realizar o TFM em tempo real, por exemplo, já estão disponíveis no mercado (M2M, 2015).

Na Figura 2.11 é apresentado um desenho esquemático representando a formação de imagem pela combinação de métodos FMC/TFM. No exemplo de imagem formada pelo TFM, na Figura 2.11, a intensidade do pixel em uma posição \mathbf{r} é mostrada em uma escala colorida.

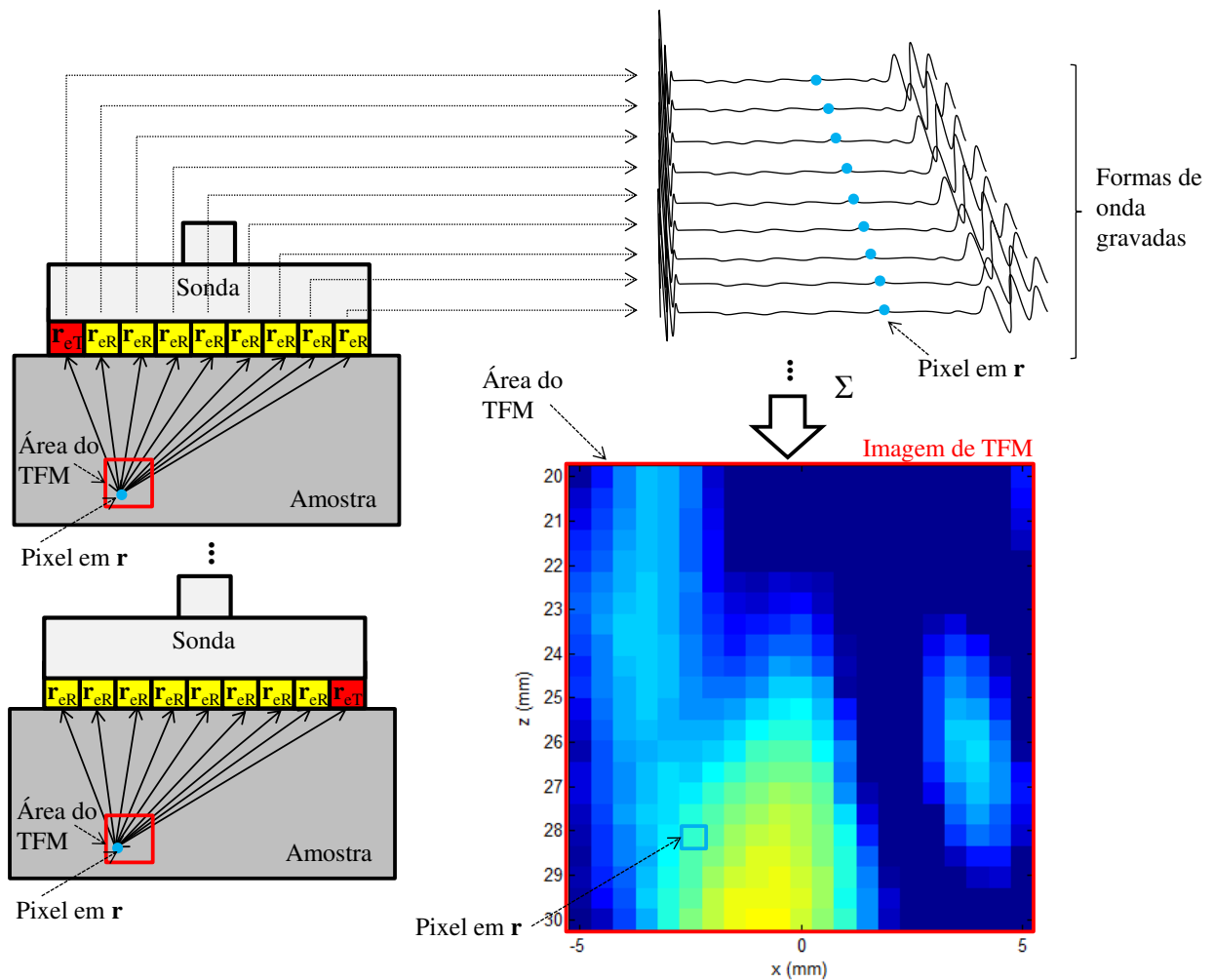


Figura 2.11. Desenho esquemático representando a formação de imagem pelo os métodos FMC e TFM.

Em resumo, as principais vantagens da utilização de *arrays* em relação a outros métodos convencionais de ultrassom são: rapidez na inspeção com o uso da varredura eletrônica ao invés da tradicional varredura mecânica; o ajuste do foco eletronicamente permite o uso de apenas uma sonda de *array* para inspeções em diferentes profundidades; e a deflexão eletrônica permite que os ângulos de incidência do feixe sônico possam ser variados com uso de apenas uma sonda (POGUET *et al.*, 2002).

2.5 Revisão bibliográfica

Nesta seção são apresentados resultados de trabalhos considerados mais relevantes para o tema desta tese. Aqui os trabalhos foram divididos em três grupos: o primeiro é voltado aos trabalhos relacionados à medição de tensão por técnicas ultrassônicas, com especial atenção dada aos trabalhos que utilizam ondas L_{cr} . No segundo grupo são apresentados resultados para trabalhos que utilizam técnicas ultrassônicas para obter características das microestruturas dos materiais inspecionados ou que relacionem tais características com parâmetros medidos. Por fim, o enfoque é dado a trabalhos relacionados à utilização de *arrays* ultrassônicos em ensaios não destrutivos e também à formação de imagens por ultrassom.

2.5.1 Medição de tensão com ultrassom

Uma parte substancial dos trabalhos que aplicam o efeito acustoelástico é voltada a medição de tensão residual em chapas soldadas. Andrino (2003), por exemplo, realizou medições com ondas L_{cr} em chapas soldadas de aço API 5L X65 e API 5L X70 com o intuito de verificar a distribuição de tensão residual em função da distância com o arco de solda. Os perfis de tensão obtidos aplicando a técnica de ondas L_{cr} foram comparados com os obtidos teoricamente. Os resultados apresentarem boa concordância, mostrando um aumento substancial na tensão de tração na região da solda e anulação da tensão com afastamento da região da solda. Entretanto, foram verificadas discrepâncias de valores medidos e calculados nas vizinhanças do cordão de solda.

Javadi e Najafabadi (2013) avaliaram a tensão residual em juntas soldadas dissimilares de aço inoxidável 304 em aço carbono A106, usando ondas L_{cr} geradas tanto com transdutores de contato direto quanto com transdutores de imersão (ambos de frequência de 2 MHz). Os resultados são comparados com simulações de elementos finitos e validados pelo método destrutivo de *hole drilling*. Os autores notaram que as maiores diferenças entre os métodos

empregados ocorreram na zona afetada pelo calor da solda, aproximadamente 59 MPa. Não foi notada diferença nos resultados obtidos empregando os dois métodos de imersão e contato para geração da onda L_{cr} propostos no trabalho.

Javadi *et al.* (2013) compararam resultados de medição de tensão residual em chapas de aço austenítico não inoxidável, usando ondas L_{cr} com resultados de simulação por elementos finitos. Com os resultados obtidos pelas medições de tempo de percurso da onda L_{cr} , os autores conseguiram formar um mapa de tensões em três dimensões das chapas avaliadas. Quatro frequências de transdutores foram utilizadas: 1, 2, 4 e 5 MHz. O desvio máximo nos resultados entre medição com ondas L_{cr} e método dos elementos finitos foi de 44,72 MPa.

Joseph *et al.* (2014) avaliaram a influência da variação do parâmetro de energia de soldagem na tensão residual em juntas de baixo carbono. Também foi utilizada pelos autores a técnica de ondas ultrassônicas L_{cr} para avaliar a tensão residual em peças com soldas feitas a arco manual e eletrodo metálico. O estudo indicou menores valores de tensão residual para a utilização do parâmetro de energia de soldagem marginalmente abaixo do valor ótimo previamente calculado se comparado com as amostras onde foram utilizados os parâmetros ótimos e acima do valor ótimo de energia. As tensões máximas estimadas para os parâmetros ótimos, marginalmente abaixo e acima do valor ótimo de energia de soldagem, foram 237, 214 e 283 MPa, respectivamente.

Javadi *et al.* (2014) usaram o método combinado de ondas L_{cr} e elementos finitos já citado para avaliar o estado de tensões residuais resultantes do processo de soldagem em um vaso de pressão. Usando transdutores de diferentes frequências (1, 2, 4 e 5 MHz), foi possível avaliar tanto a tensão residual na direção axial quanto radial do vaso. Os resultados são comparados com o método de *hole drilling* e mostraram a diferença esperada existente entre as tensões nas direções radial e axial. Os autores também consideraram como satisfatória a concordância entre as medições com ondas L_{cr} e elementos finitos (< 40 MPa). Entretanto, foi notado que a concordância piora para maiores frequências de transdutores. Como limitações, os autores apontaram para o fato de que a tensão medida pela onda L_{cr} é uma tensão média para a profundidade de penetração da onda, que é definida pela frequência do transdutor. Com isso, a determinação da tensão em uma profundidade específica não é possível pelo método proposto.

Javadi *et al.* (2015) também investigaram o efeito da utilização de braçadeiras durante o processo de soldagem na tensão residual. A tensão residual sub superficial em chapas de aço 304L inoxidável resultado do processo de soldagem foi medida com a técnica com ondas L_{cr} e o resultado comparado com simulações utilizando elementos finitos. Os autores usaram transdutores de quatro frequências diferentes (1, 2, 4 e 5 MHz) para mapear a tensão residual em diferentes profundidades. Nos resultados, os autores notaram aumento na tensão residual nas peças presas tanto para medições com ondas L_{cr} , simulação por elementos finitos e pelo método *hole drilling* usado para validação dos resultados. A diferença entre os resultados da medição e os simulados não excedeu 20 MPa.

Uzum e Bilge (2015) estudaram o efeito da quantidade de carbono na tensão residual de solda em amostras de “ultra baixo”, baixo e médio aço carbono pela medição da velocidade da onda ultrassônica. No trabalho, os autores utilizam a técnica de imersão com um transdutor de 10 MHz de ondas longitudinais. Os resultados mostraram que o teor de carbono tem baixa influência nos perfis de tensão obtidos pela medição da velocidade da onda ultrassônica em diversos pontos nas amostras. Entretanto, os autores notaram variação nos valores de constante acustoelástica obtidos para os três tipos de amostras utilizadas.

Existem também trabalhos de pesquisas relacionados à medição de tensão por ultrassom em dutos para transporte de óleo e gás. Andrino (2007) realizou medições de tensões nas direções axiais e radiais com ondas L_{cr} em um duto feito com aço API 5L X65. Para validar os resultados medidos foram fixados extensômetros no duto para medir a deformação e permitir o cálculo de tensão à medida que uma bomba hidráulica era usada para pressurizar o interior do duto. Apesar da concordância entre as medições com ondas L_{cr} e extensômetros, o desvio padrão encontrado nas medições com ondas L_{cr} no estado livre de tensão foi de aproximadamente 25 MPa. Utilizando o mesmo duto como corpo de prova, Santos (2013) desenvolveu um dispositivo automático de medição de tensão por ondas L_{cr} para movimentação ao redor do duto com melhora significativa dos resultados (desvio padrão de 13 MPa no estado livre de tensão).

Rodas ferroviárias também podem ser inspecionadas por ultrassom para avaliação do estado de tensão. Minicucci (2003) avaliou as tensões residuais de compressão em aros de rodas ferroviárias com ondas L_{cr} . Essa tensão é ocasionada pelo tratamento térmico ao qual são submetidas às rodas. Os valores estimados de tensão para o aro interno das rodas foi de -276 MPa

pela técnica por ondas L_{cr} , enquanto que por simulação por elementos finitos obteve-se o valor de -300 MPa. Szelazek (2015) avaliou a tensão residual radial em aro de rodas ferroviárias utilizando a técnica de birrefringência acústica e a técnica com ondas L_{cr} (referidas pelo autor como ondas sub superficiais) para rodas fundidas e para rodas forjadas. Os resultados mostraram que para as rodas forjadas os valores de tensão estimados pela birrefringência foram coerentes com que era esperado, entretanto o mesmo não ocorreu com as rodas fundidas onde a anisotropia devido à textura do material é mais acentuada. Para esse caso a medição com ondas L_{cr} apresentou resultados com menores variações, sendo ± 20 MPa para ondas L_{cr} e ± 60 MPa pela técnica da birrefringência.

A aplicação da acustoelasticidade não se restringe somente a metais. Hasegawa *et al.* (2012), por exemplo, estudaram os efeitos da acustoelasticidade em amostras retiradas de diferentes profundidades do tronco de cedro japonês. Aplicando tensão nas amostras, os autores mediram as constantes acustoelásticas do material para ondas de cisalhamento e longitudinais se propagando perpendicularmente à direção de aplicação de tensão. Transdutores de frequência central de 500 kHz foram utilizados tanto para os ensaios com ondas cisalhantes como para ondas longitudinais. Os autores notaram diferenças nos valores medidos para os resultados das constantes acustoelásticas para as amostras retiradas da parte mais interna (cerne) e da parte mais externa (alburno) dos troncos. A razão entre as constantes acustoelásticas do cerne para o alburno encontrada variou de 1,4 a 1,7.

Pesquisas com concreto também são conduzidas para avaliação do estado de tensões. Como exemplo, Lillamand *et al.* (2010) verificaram o efeito acustoelástico em amostras de concreto sob aplicação de tensão de compressão. Os autores mediram a variação da velocidade para ondas longitudinais e de cisalhamento geradas usando transdutores com frequência central de 500 kHz. Foram medidas as velocidades de onda se propagando tanto na direção de aplicação de tensão no material quanto na direção perpendicular. Como já observado para metais, a maior variação de velocidade de onda em função da tensão ocorreu para a onda longitudinal se propagando na direção de aplicação de tensão. O valor da constante acustoelástica para onda longitudinal se propagando na direção da tensão foi mais de 6 vezes maior do que o valor de constante para a onda se propagando na direção perpendicular.

Santos *et al.* (2014) estudaram o efeito acustoelástico em amostras de material compósito com fibras de carbono unidirecionais em matriz epóxi. Os autores utilizaram a técnica de ondas L_{cr} para avaliar o efeito acustoelástico com a onda se propagando na direção de aplicação de tensão para fibras nas direções de 0, 45 e 90°. Verificou-se que o tempo de percurso da onda L_{cr} para amostras com fibras a 45° em relação à direção de propagação de onda não apresentou variação significativa quando da aplicação de tensão. Para 90° graus, foi verificada uma ligeira variação de aumento do tempo de percurso enquanto que para 0° uma variação muito mais significativa foi verificada (10.000 vezes maior) e com redução do tempo de percurso com aumento da tensão. Obviamente, a resistência do material em direções não alinhadas com as fibras é muito menor, limitando a tensão aplicada nessas direções.

Estudos sobre a influência dos efeitos da microestrutura do material na velocidade da onda ultrassônica são importantes para tentar isolar esses efeitos do efeito acustoelástico. Nesse sentido, Buenos (2014) estudou os efeitos do tamanho médio de grão e textura na velocidade da onda L_{cr} no aço ASTM A36. Para o tamanho de grão, o autor realizou tratamentos térmicos com diferentes temperaturas com intuito de criar amostras com grãos austeníticos de diferentes diâmetros médios. Observou-se uma redução na diferença entre as velocidades de onda medidas antes e depois do tratamento para amostras com grãos maiores. O autor percebeu também a relação entre a velocidade de propagação com a direção de laminação, com a velocidade sendo menor na direção de laminação e maior na direção transversal à laminação. Essa diferença encontrada, em torno de 120 ns para o tempo de percurso, equivaleria a 600 MPa em termos de medição de tensão. Essa diferença exemplifica a necessidade de se conhecer aspectos da microestrutura e processo de fabricação do material sendo inspecionado para medições de tensão pelo efeito acustoelástico. Quanto à textura, não foi possível estabelecer relação entre a velocidade de onda e os tipos de texturas encontradas por ensaio de raios-X.

Ao invés de utilizar a variação da velocidade de onda para realizar medições de tensão, Kube *et al.* (2012) propôs um novo método que relaciona tensão com o espalhamento (“*scattering*”) ultrassônico. Os autores apresentam o conceito do coeficiente de espalhamento difuso, um parâmetro dependente do tempo e é relacionado tanto às propriedades elásticas como ao estado de tensão do material. Os autores verificaram que, com o corpo sob tensão, o pico da função do coeficiente de espalhamento difuso em função do tempo decai. Aplicando sucessivos

valores de tensão em uma amostra de aço, os autores mediram os sinais retro espalhados pela estrutura de grãos da amostra com um transdutor de 10 MHz, em um tanque de imersão. Cada sinal resulta de 1000 medições em diferentes posições em uma área de 10x10 mm na amostra. Calculando o coeficiente de espalhamento difuso, os autores verificaram uma tendência de queda em função da tensão aplicada, confirmando o modelo teórico apresentado. Entretanto, o desvio entre o modelo e o teórico foi relativamente alto, com os autores admitindo a necessidade de melhorias na técnica para a sua efetiva aplicação.

2.5.2 Caracterização de microestruturas com ultrassom

Algumas pesquisas de maior relevância sobre a avaliação por ondas ultrassônicas da microestrutura de componentes mecânicos são apresentadas nesta seção. Em especial, são abordadas técnicas que visam caracterizar tamanho e forma de grãos de materiais metálicos. O tamanho médio de grão em componentes metálicos pode ser relacionado com a velocidade, atenuação e retro espalhamento (*backscattering*) de ondas ultrassônicas. De acordo com Willems e Goebbels (1981), a última técnica, que relaciona a intensidade do ruído de grão retro espalhado com o tamanho de grão da estrutura, apresenta algumas vantagens se comparada com as outras técnicas citadas. Como exemplo, ela pode ser utilizada na inspeção de componentes com geometria complexa ou onde o acoplamento entre transdutor e material não é perfeito.

A relação entre ruído de grão ultrassônico e tamanho de grão é também importante para a predição de ruído em sinais representando ondas ultrassônicas. O ruído de grão em muitos casos influencia fortemente a relação sinal ruído e limita a detecção de defeitos. Margetan *et al.* (1994) e Yalda *et al.* (1996) usaram um modelo para prever o ruído de grão retro espalhado em inspeções utilizando a técnica de imersão. Eles também obtiveram o parâmetro chamado de “figura de mérito” (*Figure-of-Merit*), que caracteriza a contribuição da microestrutura para o ruído de grão de materiais com espalhamento fraco (*weak scattering*). Para testar o modelo, os autores usaram um método de Monte Carlo para criar um conjunto de grãos com posição, orientação cristalográfica e tamanho de cada grão definidos aleatoriamente em um volume e

densidade de grãos pré-estabelecida. A amplitude de espalhamento de cada grão é calculada baseada na aproximação de Born (GUBERNATIS *et al.*, 1977). Para um dado sinal de referência, o componente espectral das ondas espalhadas para cada grão foi obtido. Os ecos para todos os grãos são somados e convertidos para o domínio do tempo, resultando em um sinal de ruído sintético. Repetindo o processo para vários conjuntos de grãos, os autores obtiveram a figura de mérito sintética para ser comparada com dados experimentais utilizando a técnica de pulso eco em imersão. Vale ressaltar que esses modelos são aplicáveis para microestruturas policristalinas onde efeitos de espalhamento múltiplos são negligenciáveis.

Usando o método de medição de sinais de ruído retro espalhado em interfaces líquido-sólido desenvolvido por Thompson e Gray (1983), Panetta *et al.* (2014) desenvolveram uma ferramenta automática para medir tamanho de grão em amostras imersas. O sistema foi testado em ligas baseadas em níquel e em alguns casos foi possível fazer a distinção de microestruturas com uma diferença de 2 μm em diâmetro de grão para tamanhos de grão variando entre 10 e 40 μm . Pelo sistema desenvolvido pelos os autores, foi possível também criar um mapa de tamanho de grão de um disco fabricado com dois tipos de microestruturas, cada uma com tamanhos de grãos diferentes. Na imagem gerada apresentada no trabalho, é claramente notada a diferença entre as microestruturas.

O fenômeno de espalhamento múltiplo também foi considerado em alguns estudos como, por exemplo, o de Kruger *et al.* (2004), que usaram o espectro de sinais retro espalhados para medir o tamanho de partículas no regime de transição entre o espalhamento simples e múltiplo em ferro fundido. No trabalho, os autores mediram partículas de grafite precipitadas em uma matriz formada por ferrita e perlita, por ultrassom e metalografia. O modelo proposto pelos autores relaciona a frequência de máxima amplitude do sinal retro espalhado com o diâmetro das partículas espalhadoras. Os resultados mostraram boa correlação quando a concentração das partículas era conhecida com precisão.

Mais recentemente, Li *et al.* (2014) apresentaram um modelo mais complexo para relacionar a intensidade do retro espalhamento ultrassônico não apenas com o tamanho de grão, mas também com a forma dos grãos e textura macroscópica para um meio policristalino. Uma simulação numérica foi feita do modelo para obter a razão da amplitude de retro espelhamento

entre direções ortogonais. Os resultados foram comparados com resultados experimentais obtidos da literatura para alumínio laminado e foi alcançada razoável concordância.

Modelos baseados em métodos de elementos finitos foram usados por Dupond *et al.* (2011) para relacionar o ruído de espalhamento e a microestrutura de ligas de níquel em amostras com diferentes tamanhos de grão. O mesmo modelo foi aperfeiçoado e usado por Shahjahan *et al.* (2014) para reproduzir o ruído de grão devido a espalhamentos múltiplos em imagens geradas por *arrays* ultrassônicos. Os autores notaram evidências de espalhamento múltiplo em amostras da liga Incomel600® pela observação do aumento da intensidade do sinal retro espalhado na direção de emissão da onda ultrassônica devido ao efeito chamado de retro espalhamento coerente. Em resumo, esse fenômeno é demonstrado por um aumento em dobro na intensidade média de retro espalhamento do sinal na direção de emissão. Para o caminho da onda começando em um elemento do *array* e alcançando no mínimo dois espalhadores em sequência antes de ser recebido pelo mesmo elemento no *array*, existe um caminho reverso onde os espalhadores são alcançados pela onda na ordem reversa e com isso, as ondas refletidas permanecem em fase e sua intensidade é duplicada.

2.5.3 Uso de *arrays* e imagens de ultrassom para ensaios não destrutivos

Arrays tiveram suas primeiras pesquisas e aplicações na área médica entre o final da década de 60 e início da década de 80 (SOMER, 1968; VON RAMM; THURSTONE, 1976; VON RAMM; SMITH, 1983). Durante a década de 80, foram iniciados estudos para a utilização de *phased arrays* para ensaios não destrutivos voltados principalmente para a indústria nuclear, com a finalidade de detectar e dimensionar defeitos (UCHIDA *et al.*, 1984; ERHARD *et al.*, 1986). O desenvolvimento de novas tecnologias de micro usinagem de elementos piezocompósitos e a redução dos custos de componentes eletrônicos necessários para aquisição de dados e controle desse tipo de *array* possibilitou o aumento do número de aplicações da tecnologia em ensaios não destrutivos (MCNAB; CAMPBELL, 1987; SMITH, 1989). Atualmente, encontram-se no

mercado diversos sistemas de *phased array* portáteis e normas foram criadas para a utilização desses novos sistemas (ASME, 2008; ASME, 2009).

Pesquisas sobre *phased array* referem-se principalmente à inspeção em materiais compósitos (LI *et al.*, 2013) e concreto (KRAUSE *et al.*, 2001); ao desenvolvimento de novos materiais e sondas, como por exemplo, *arrays* flexíveis (POWELL; HAYWARD, 1996); à geração e detecção de ondas guiadas/Lamb (YANEZ *et al.*, 2008; WILCOX, 2003); ao modelamento e simulação de elementos do *array* visando obter melhoria de desempenho de inspeção (DUXBURY *et al.*, 2012; NAKAHATA; KONO, 2012); e à medição de deformações internas (BOWLER *et al.*, 2011). Para esta última aplicação, vale destacar que os autores utilizaram um *array* ultrassônico para coletar formas de onda a partir de reflexões de ruído de grão em uma estrutura metálica. A partir das formas de onda coletadas, uma imagem é gerada utilizando o TFM. Aplicando tensão nas amostras e obtendo imagens de TFM para estados de tensão diferentes, os autores conseguiram estimar a deformação no interior do material comparando as imagens. Nelas, os autores identificaram manchas (“*speckles*”) que mudavam de posição com a aplicação da tensão. Pelo deslocamento das manchas foi possível estimar a deformação dentro do material. Entretanto, como para a obtenção de imagens de TFM é necessário conhecer a velocidade da onda ultrassônica no material (Equação 2.22), os autores precisaram compensar o efeito acustoelástico que afeta a velocidade da onda emitida pelos elementos do *array*. Essa compensação consistiu em variar a velocidade de onda usada para obter as imagens de TFM em função da tensão aplicada. Se fosse usada uma velocidade constante, a posição das manchas nas imagens não seria correta, resultando em erros na estimativa da deformação interna. Deve-se salientar que, por esse método, necessita-se a obtenção de duas imagens de TFM em dois estados diferentes de tensão para ser possível a medição dos deslocamentos e o cálculo da deformação causada por essa diferença de tensão.

O desenvolvimento e a aplicação em ensaios não destrutivos de imagens formadas pelo TFM têm sido bastante significativos nos últimos anos. Trabalhos do grupo de pesquisa da Universidade de Bristol, no Reino Unido, têm se destacado e alguns de seus trabalhos mais relevantes serão apresentados a seguir, devido à relação entre o grupo de pesquisa da Unicamp e dessa Universidade. Holmes *et al.* (2005) compararam a relação sinal ruído de imagens de amostras com defeitos pontuais gerados por B-scan e TFM. Foram utilizadas tanto formas de

onda obtidas por meio de simulação como por experimento com sinais provenientes de ensaio usando um bloco de alumínio com um entalhe representando um defeito. A relação sinal ruído para a imagem de TFM foi maior se comparada à técnica de B-scan (42,8 contra 36,2 dB).

Wilcox *et al.* (2007) desenvolveram algoritmos acoplados ao TFM para a caracterização de defeitos com dimensões menores que o comprimento de onda. Em um bloco de alumínio, foram produzidas ranhuras simulando defeitos com dimensão de aproximadamente 1 mm e com diferentes ângulos de inclinação em relação ao feixe sônico gerado pelo *array*. Os algoritmos foram baseados em funções vetoriais de posição que descrevem a orientação e amplitude da onda refletida. O erro máximo encontrado para definição da orientação dos defeitos foi de aproximadamente 5° e as ranhuras puderam ser distinguidas de furos de dimensões próximas nas imagens de TFM.

Zhang *et al.* (2010) propuseram um novo algoritmo de geração de imagens, o “*multi-mode total focusing method*”, que consiste em utilizar a combinação de ondas geradas pela conversão de modos devido a reflexões que ocorrem dentro do material. Os pesquisadores utilizaram o conceito de matriz de coeficientes de espalhamento para a caracterização de defeitos. Este conceito descreve o sinal espalhado por um defeito em função dos ângulos da onda incidente e da onda espalhada. Além de ser possível obter essa matriz analiticamente, ela também pode ser obtida por meio de simulação numérica com elementos finitos. O algoritmo de pós-processamento proposto combina matrizes de coeficientes de espalhamento que modelam interações entre onda e defeito para um meio de múltiplas camadas. Nesse meio, tanto ondas longitudinais quanto de cisalhamento estão presentes, assim como reflexões de onda pelas camadas. Como experimento, utilizando o algoritmo proposto foram geradas imagens de ranhuras criadas em um bloco de alumínio. As imagens geradas experimentalmente foram comparadas com imagens geradas por meio de simulação com elementos finitos e em ambos os casos foi possível visualizar as ranhuras. As diferenças nas relações de amplitude entre o sinal relativo aos defeitos e o sinal de fundo da peça variou entre 1 e 10 dB para as imagens experimentais e simuladas.

Wilcox (2011) analisou o ruído em imagens ultrassônicas obtidas pelo TFM utilizando dados experimentais para um bloco de cobre, material caracterizado pelo alto nível de ruído estrutural. O autor desenvolveu no artigo um modelo que relaciona a razão sinal ruído (“*signal-*

to-noise ratio” ou SNR) e a função que descreve a imagem de um defeito pontual (“*point spread function*”). No modelo foi considerado o espalhamento simples (“*single scattering*”). Usando um corpo de prova feito de cobre com um furo vazado, o autor mediu o SNR entre o sinal característico do refletor e o ruído na imagem e verificou como esse SNR medido e obtido pelo modelo proposto se comporta em função da frequência, na faixa de 1 a 2,5 MHz. Verificou ainda que o SNR experimental e do modelo se comportaram de forma similar, com ambos aumentando em função da frequência até aproximadamente 1,7 MHz. A partir dessa frequência, entretanto, o SNR experimental começou a cair enquanto o SNR do modelo continuou a crescer. O autor sugeriu que a partir da frequência citada o fenômeno de espalhamento múltiplo seja dominante e o modelo baseado no espalhamento simples não seja mais apropriado.

Zhang *et al.* (2013) compararam a técnica de TFM com outras duas técnicas de formação de imagens ultrassônicas: *phase-coherent imaging* (PCI) e *spatial compounding imaging* (SCI). No PCI, a imagem é formada a partir das formas de onda adquiridas pelo método FMC e a intensidade da imagem em cada pixel é multiplicada por uma função de ponderação. Essa função é obtida a partir de informações do refletor e tem a finalidade de atenuar os valores de intensidade da imagem associados ao ruído de grão. Pelo SCI, a imagem final é formada pela superposição de várias outras imagens obtidas com uso de diferentes grupos de elementos do *array*. O desempenho dos três métodos foi avaliado com o uso de amostras de materiais com diferentes níveis de ruído de grão (bronze, aço, alumínio e cobre) e tipos de defeito (trinca vertical, trinca inclinada e furo circular). Em geral, o TFM se mostrou o método mais robusto em termos de resolução de imagem, relação sinal-ruído e redução da distorção das representações dos defeitos nas imagens.

2.5.4 Conclusão da Revisão Bibliográfica

Concluindo a revisão bibliográfica, nota-se pelos trabalhos apresentados que apesar do avanço recente das pesquisas relacionadas ao desenvolvimento da técnica de medição de tensão com ondas L_{cr} , verificam-se variações e desvios significativos nos resultados obtidos com a

técnica. Tais desvios são muitas vezes relacionados às variações na microestrutura do material inspecionado. Por outro lado, as técnicas atuais de caracterização de materiais por meio de ondas ultrassônicas, que poderiam ser utilizadas em conjunto com a técnica de ondas L_{cr} , muitas vezes não apresentam flexibilidade para serem utilizadas em campo, onde a inspeção do estado de tensões se mostra mais necessária. Nesse sentido, *arrays* ultrassônicos podem ser utilizados como forma de contornar o principal empecilho para a utilização das técnicas ultrassônicas de caracterização que é a necessidade da realização de sucessivas medições na amostra inspecionada. O desenvolvimento de técnicas de obtenção de imagens ultrassônicas utilizando *arrays*, em especial a técnica de TFM, permite a redução de ruídos de outra natureza que não o estrutural, ou de grão, relacionado à microestrutura do material. Deste modo, este trabalho está inserido no âmbito da pesquisa atual em ensaios não destrutivos e tem o intuito de apresentar uma proposta inovadora para solucionar um problema real.

3 MODELAGEM TEÓRICA

Neste capítulo é apresentado um modelo matemático para obter sinais representando o ruído de grão a partir de uma distribuição de grãos do material estudado, de propriedades da amostra inspecionada e de características da sonda de *array* utilizada. Tendo todos os sinais previstos pelo *Full Matrix Capture* (FMC), é possível gerar imagens pelo *Total Focusing Method* (TFM) utilizando a Equação 2.22 e, a partir das imagens, calcular a relação sinal-ruído (SNR).

Conforme apontado na literatura, o tamanho de grão de um material tem influência considerável na velocidade da onda ultrassônica. Como se espera que a intensidade do ruído de grão tenha relação direta com o tamanho de grão, tal relação seria refletida no SNR obtido das amostras.

O modelo apresentado é derivado de modelos previamente desenvolvidos para localização e caracterização de defeitos em imagens de TFM. Para esse trabalho, cada grão é considerado um espalhador (*scatterer*) da onda ultrassônica incidente a partir dos elementos piezelétricos do *array* (sonda). No desenvolvimento do modelo, primeiramente é apresentado o detalhamento sobre a distribuição dos espalhadores considerada; em seguida é explicada a geração dos sinais retro espelhados (*backscattered*) pelos grãos e, por fim, a forma de geração das imagens ultrassônicas. Todo o modelo foi desenvolvido no software MATLAB.

Vale notar que a utilidade do modelo para prever a intensidade de ruído em imagens ultrassônicas em função do tamanho de grão da microestrutura do material pode ir além do escopo deste trabalho. O modelo pode ser utilizado, por exemplo, para própria medição de tamanho de grão ou servir de base para o desenvolvimento de técnicas de filtragem de sinais para remoção do ruído de grão. Em aplicações de detecção de defeitos, a intensidade do ruído de grão no sinal pode muitas vezes “encobrir” o eco do defeito. Na Figura 3.1 é apresentado um fluxograma representando o modelo que é apresentado neste Capítulo.

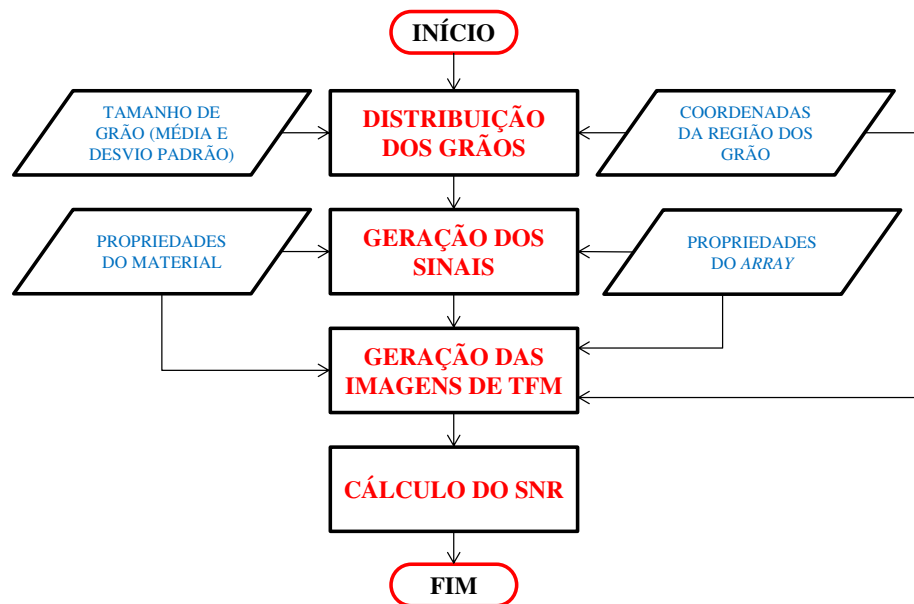


Figura 3.1. Fluxograma do modelo para obtenção do SNR de imagens de TFM.

3.1 Distribuição de grãos

O número de grãos usados no modelo para a simulação foi baseado (a) no prévio estabelecimento de uma região de interesse (RDI), bidimensional, no interior da amostra, e (b) no diâmetro dos grãos, considerando-os como círculos no modelo. O diâmetro dos grãos é definido com base em dados das amostras reais que serão utilizadas na parte experimental do trabalho. Os detalhes sobre as amostras serão apresentados no Capítulo 4. Mais especificamente, os dados das amostras físicas utilizados são, além de suas dimensões principais, o diâmetro médio dos grãos e o desvio padrão obtido durante sua medida. Como a alocação dos círculos representando os grãos de diferentes diâmetros de forma a ocupar toda uma área pré-definida não é um problema trivial, foi escrito um algoritmo especialmente para essa finalidade. O algoritmo escrito usando o software MATLAB é apresentado no Apêndice A. Considerando z e x os eixos que definem o plano onde se localizam os grãos, os passos do algoritmo desenvolvido são:

- O número de grãos nas direções x e z , N_x e N_z , são calculados pela divisão do tamanho da RDI na respectiva direção pelo diâmetro médio dos grãos.
- Os diâmetros dos grãos são distribuídos aleatoriamente de acordo com uma distribuição uniforme usando o diâmetro médio e desvio padrão obtidos das medidas reais. Uma matriz, denominada Ag , com número de linhas igual a N_x e colunas a N_z é usada para guardar os diâmetros, com os valores também sendo alocados aleatoriamente na matriz.
- Duas outras matrizes, Xp e Zp , com as mesmas dimensões de Ag são geradas para alocar as coordenadas dos grãos no plano. Xp é usada para alocar as posições na direção x e Zp as posições na direção z .
- Os elementos da matriz Xp são definidos para permitir que os grãos sejam alocados lado a lado na direção x . Por exemplo, a posição do grão na direção x situado na primeira linha e segunda coluna da matriz Ag (ou seja, $Ag(1,2)$) é igual a posição do grão em $Ag(1,1)$ mais a soma do seu raio e do raio do grão em $Ag(1,2)$. Esse resultado é guardado em $Xp(1,2)$. Os primeiros elementos de cada linha da matriz são definidos considerando os limites da RDI em x .
- As posições dos grãos na direção z são inicialmente as mesmas para todos os grãos em uma mesma linha da matriz Ag . Dada uma linha em Ag , a posição em z para os grãos da próxima linha é dada pela posição dos grãos da linha anterior mais a soma dos raios dos maiores grãos das duas linhas multiplicados por uma constante k_g . Essa constante define um compromisso entre sobreposição de grãos e espaços vazios na RDI. Por exemplo, se k_g é maior que 1, o número de ocorrências de sobreposições de grãos é pequeno, entretanto, haverá mais espaços vazios na RDI. Neste trabalho, definiu-se k_g igual a 0,75. Na Figura 3.2 são apresentadas as representações de grãos considerando k_g igual a 0,5, 0,75 e 1. A posição dos grãos da primeira linha é definida pelo início da RDI.

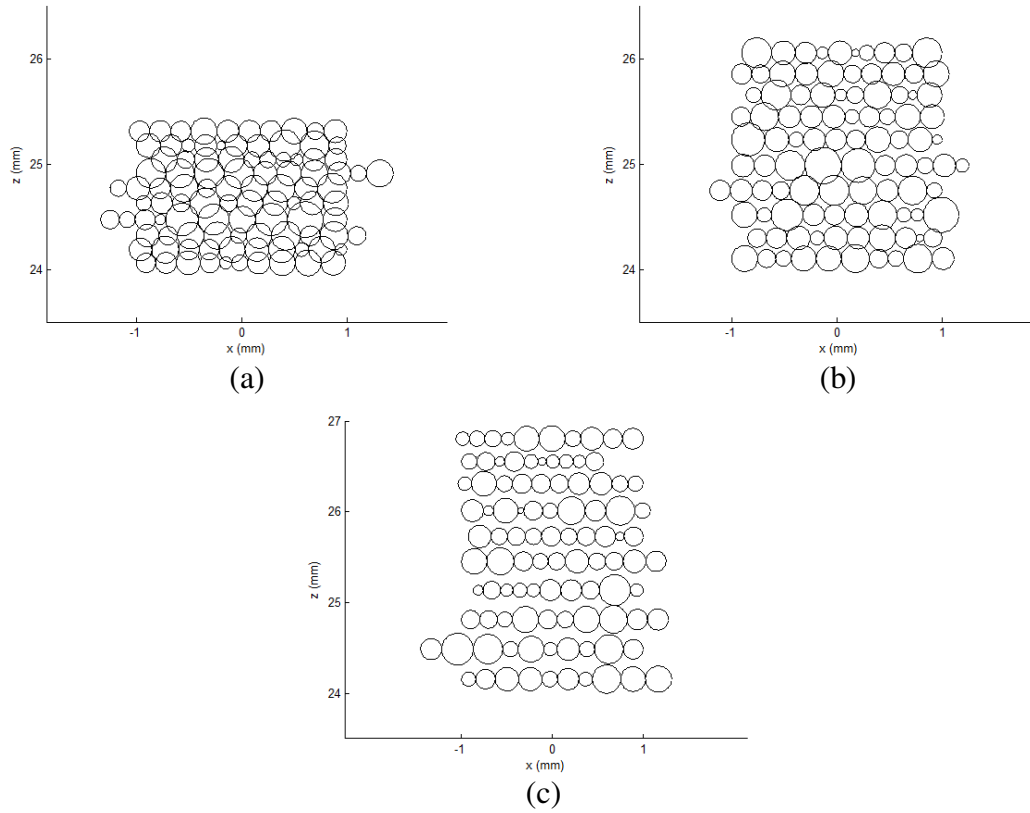


Figura 3.2. Representações de grãos para k_g igual (a) 0,5, (b) 0,75 e (c) 1. Parâmetros de simulação utilizados: diâmetro de grão médio igual 209 μm , desvio padrão igual 59 μm , RDI: $x = -1:1$ mm e $z = 24:26$ mm.

- O próximo passo é variar levemente e aleatoriamente as coordenadas dos grãos com o intuito de remover a distribuição regular criada pelo algoritmo de posicionamento até agora. Essa regularidade, conforme pode ser visto na Figura 3.3a, não reflete a distribuição natural dos grãos em uma amostra real. Uma matriz do mesmo tamanho de X_p e Z_p é criada com números aleatórios escolhidos de uma distribuição normal de média zero e desvio padrão equivalente a 20% do diâmetro médio do grão considerado na simulação. Essa matriz é adicionada à X_p e Z_p . Na Figura 3.3 está um exemplo de uma representação antes e depois da aleatorização de posição dos grãos. É importante salientar que se optou em enfatizar no modelo o posicionamento mais aleatorizado dos grãos mesmo que isso aumente o número de sobreposições e espaços vazios conforme pode ser visto na Figura 3.3b. Como será visto adiante, neste trabalho é levado em

consideração apenas o ruído médio na imagem gerada pela contribuição de cada grão dentro da RDI, e por esse motivo, espera-se que a condição irreal de sobreposição de alguns grãos não crie diferenças significativas no ruído médio se comparada a uma situação mais realista.

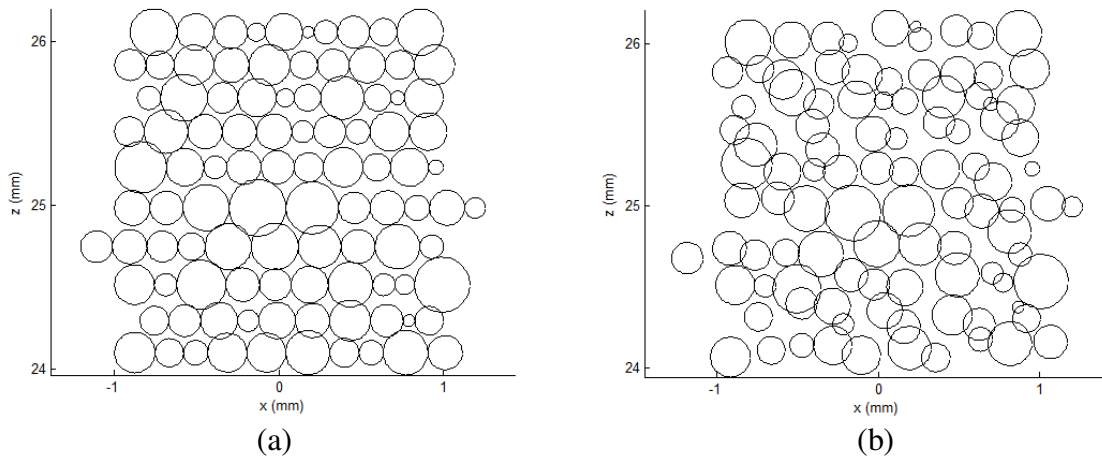


Figura 3.3. Representação de grãos (a) antes e (b) depois da aleatorização de posições. Diâmetro médio de grãos = 209 μm e desvio padrão = 59 μm .

- As coordenadas dos grãos são verificadas para ver se todas elas estão dentro da RDI. Caso contrário, uma nova posição dentro da RDI é aleatoriamente escolhida para grãos fora da RDI.
- As áreas de todos os grãos são somadas e a área total é comparada com a área da RDI. A razão entre a área dos grãos e a área da RDI fornece uma fração de área que se for menor que 100%, novos grãos são adicionados na RDI em uma posição aleatória e seguindo as mesmas regras dos demais grãos para obtenção de seu diâmetro. Esse processo é repetido até que a fração de área atinja 100%.

Um exemplo de distribuição final de grãos após a aplicação dos passos do algoritmo descrito é mostrado na Figura 3.4, onde a RDI é delimitada por um retângulo de cor azul.

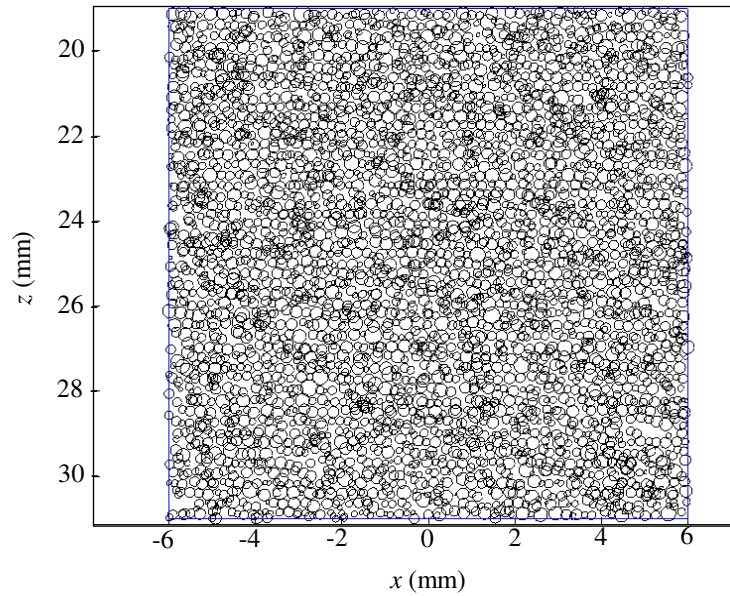


Figura 3.4. Exemplo de distribuição de grãos (diâmetro médio de grãos = $209\ \mu\text{m}$ e desvio padrão = $59\ \mu\text{m}$).

3.2 Geração de sinais

Neste trabalho, é considerado o caso onde os grãos são pequenos se comparados ao comprimento de onda e, portanto, o espalhamento pode ser considerado com sendo fraco. Assim o fenômeno é considerado de espalhamento simples (*single scattering*) (SIMONETTI, 2006). Neste caso, admite-se que a onda recebida pelo elemento receptor do *array* é resultado apenas da reflexão direta da onda emitida por um único grão e reflexões de onda entre outros grãos são desprezadas. Na Figura 3.5 é apresentando um exemplo gráfico mostrando a diferença dos dois tipos de espalhamento considerando dois grãos e na Figura 3.6 é mostrada a geometria 2D usada para o modelo, no qual cada grão é considerado como um espalhador (*scatterer*).

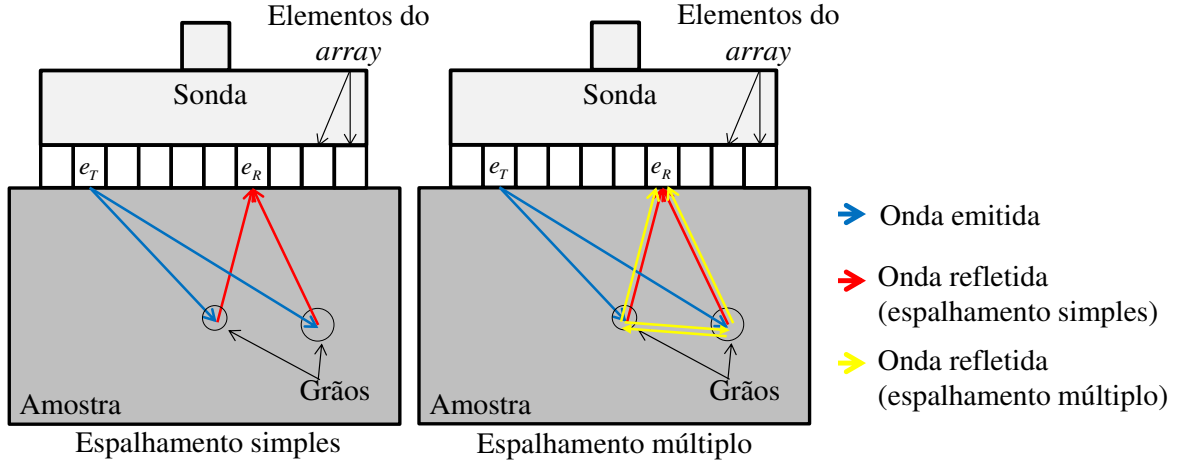


Figura 3.5. Exemplos de espalhamento simples e múltiplo para dois grãos.

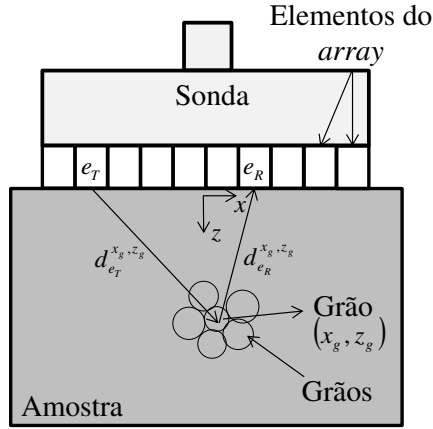


Figura 3.6. Esquema geométrico para o modelo de grãos como espalhadores.

No campo distante, o espectro de um sinal recebido $H_{e_T, e_R}^{x_g, z_g}(\omega)$ no elemento receptor e_R , após o sinal transmitido pelo elemento e_T , é refletido pelo grão posicionado em (x_g, z_g) . Esse espectro pode ser escrito como (ZHANG *et al.*, 2010):

$$H_{e_T, e_R}^{x_g, z_g}(\omega) = \frac{S(\omega) A_{e_T, e_R}^{x_g, z_g}(\omega) D_{e_T}^{x_g, z_g}(\omega) D_{e_R}^{x_g, z_g}(\omega) \exp\left(-i \frac{\omega}{c_L} (d_{e_T}^{x_g, z_g} + d_{e_R}^{x_g, z_g})\right)}{d_{e_R}^{x_g, z_g} \sqrt{d_{e_T}^{x_g, z_g}}} \quad (3.1)$$

onde ω é a frequência angular; $S(\omega)$ é o espectro do sinal transmitido; $A_{e_T, e_R}^{x_g, z_g}(\omega)$ é a amplitude do sinal refletido pelo grão; c_L é a velocidade da onda longitudinal; e $d_{e_R}^{x_g, z_g}$ e $d_{e_T}^{x_g, z_g}$ são as distâncias entre o elemento do *array* e o grão. $D_{e_T}^{x_g, z_g}(\omega)$ e $D_{e_R}^{x_g, z_g}(\omega)$ são funções de diretividade (*directivity*) que descrevem a distribuição angular do feixe sônico emitido ou recebido para cada elemento do *array*. Os termos $1/d_{e_R}^{x_g, z_g}$ e $1/\sqrt{d_{e_T}^{x_g, z_g}}$ na Equação 3.1 referem-se às funções de espalhamento do feixe sônico para sistemas 3-D e 2-D, respectivamente (WILCOX *et al.*, 2007). Neste caso, está sendo considerado a fonte do feixe emitido pelo elemento do *array* e_T como uma “linha” e por isso é utilizada a equação para sistemas 2-D. Já a fonte do feixe recebido pelo elemento receptor e_R é considerado um “ponto” pois corresponde ao feixe refletido pelo grão, sendo assim mais apropriado o uso do termo da função de espalhamento do feixe para sistemas 3-D. A atenuação devido ao processo de conversão de energia cinética causada pela propagação da onda no interior do material em calor não foi considerada no modelo.

Considerando o caso bidimensional, onde cada elemento do *array* é considerado uma longa tira na direção y , a diretividade $D(\omega, \theta_d)$ em função da frequência angular e ângulo definido na Figura 3.7 é dada por (DRINKWATER; WILCOX, 2006):

$$D(\omega, \theta_d) = \text{sinc}\left(\frac{l_e \omega \sin \theta_d}{2c_L}\right) \frac{\left((c_L / c_s)^2 - 2 \sin^2 \theta_d\right) \cos \theta_d}{F_0(\sin \theta_d)} \quad (3.2)$$

onde l_e é a largura do elemento do *array*, c_s é a velocidade da onda cisalhante no material estudado e

$$F_0(\xi) = \left(2\xi^2 - (c_L / c_s)^2\right)^2 - 4\xi^2(\xi^2 - 1)^{1/2}(\xi^2 - (c_L / c_s)^2)^{1/2}. \quad (3.3)$$

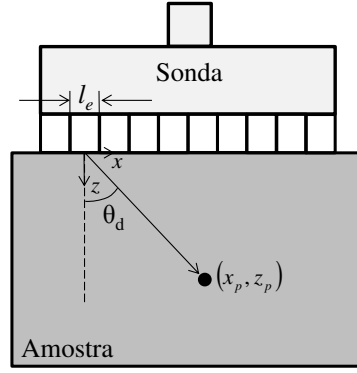


Figura 3.7. Representação do ângulo entre elemento do *array* e um ponto em (x_p, z_p) para cálculo da diretividade.

A amplitude da onda espalhada $A_{e_T, e_R}^{x_g, z_g}(\omega)$, considerando apenas a propagação de ondas longitudinais, é definida usando a aproximação de Born. Essa aproximação, inspirada no método usado por Max Born em problemas de mecânica quântica, fornece expressões para amplitude de espalhamento para o caso em que as propriedades elásticas do espalhador não diferem substancialmente de seu meio ao redor. Nesse caso, a onda é apenas levemente afetada pelo espalhador. A expressão para a aproximação de Born pode ser escrita como (GUBERNATIS *et al.*, 1977; SCHMERR, 1998):

$$A_{e_T, e_R}^{x_g, z_g}(\omega) = \frac{a_x a_y a_z B(\mathbf{e}_i; \mathbf{e}_s)}{(|\mathbf{e}_i - \mathbf{e}_s| r_e)^2} \left[\frac{\sin(k|\mathbf{e}_i - \mathbf{e}_s| r_e) - k|\mathbf{e}_i - \mathbf{e}_s| r_e \cos(k|\mathbf{e}_i - \mathbf{e}_s| r_e)}{k|\mathbf{e}_i - \mathbf{e}_s| r_e} \right] \quad (3.4)$$

onde

$$B(\mathbf{e}_i; \mathbf{e}_s) = \left[\frac{\Delta \rho}{\rho} (\mathbf{e}_i \cdot \mathbf{e}_s) - \frac{\Delta \lambda + 2\Delta \mu (\mathbf{e}_i \cdot \mathbf{e}_s)^2}{\rho c_L^2} \right] \quad (3.5a)$$

$$r_e = \sqrt{a_x^2 \left(\frac{(\mathbf{e}_i - \mathbf{e}_s)}{|\mathbf{e}_i - \mathbf{e}_s|} \cdot \mathbf{u}_x \right)^2 + a_y^2 \left(\frac{(\mathbf{e}_i - \mathbf{e}_s)}{|\mathbf{e}_i - \mathbf{e}_s|} \cdot \mathbf{u}_y \right)^2 + a_z^2 \left(\frac{(\mathbf{e}_i - \mathbf{e}_s)}{|\mathbf{e}_i - \mathbf{e}_s|} \cdot \mathbf{u}_z \right)^2} \quad (3.5b)$$

$$k = \frac{\omega}{c_L} \quad (3.5c)$$

Nas Equações 3.4 e 3.5, a_{x-z} são as dimensões de um espalhador (grão) elipsoidal, e \mathbf{u}_{x-z} , são os vetores unitários nas direções x , y e z , respectivamente. Para esse cálculo específico, os grãos foram considerados como esferas de raio a ($a = a_x = a_y = a_z$). \mathbf{e}_i e \mathbf{e}_s são os vetores das direções da onda incidente e espalhada, respectivamente; ρ é a densidade do material; λ e μ são as constantes de Lamé (considerando o material como isotrópico); e Δ representa a diferença nas propriedades elásticas entre o espalhador e o meio ao redor. Os componentes dos vetores \mathbf{e}_i e \mathbf{e}_s na direção y são igualados a zero, pois apenas as direções x e z são consideradas no modelo. Entretanto, o volume do grão foi considerado ($a_y = a$) para obter o valor de amplitude da onda espalhada. De acordo com a Equação 3.4, a amplitude da onda espalhada é diretamente proporcional ao volume do espalhador.

Para grãos exibindo simetria cúbica, ao invés de isotrópica, as Equações 3.5 são alteradas para (YALDA *et al.*, 1996):

$$B(\mathbf{e}_i; \mathbf{e}_s) = \left[\frac{\Delta\rho}{\rho} (\mathbf{e}_i \cdot \mathbf{e}_s) - \frac{\Delta C_{33} (\mathbf{e}_i \cdot \mathbf{e}_s)^2}{\rho C_L^2} \right] \quad (3.6a)$$

$$\Delta C_{33} = C'_{33} - (C_{33})_{\text{meio}} \quad (3.6b)$$

$$C'_{33} = \left[(\sin^4 \phi_g + \cos^4 \phi_g) \sin^4 \theta_g + \cos^4 \theta_g \right] C_{11} + \left[2 \sin^2 \theta_g (\sin^2 \phi_g \cos^2 \phi_g \sin^2 \theta_g + \cos^2 \theta_g) \right] (C_{12} + 2C_{44}) \quad (3.6c)$$

$$(C_{33})_{\text{meio}} = \frac{3C_{11} + 4C_{12} + 4C_{44}}{5} \quad (3.6d)$$

Nas Equações 3.6, dois ângulos são definidos para cada grão: ϕ_g que é uniformemente e aleatoriamente distribuído para todos os grãos entre $[0, 2\pi]$ e θ_g para o qual o cosseno deve estar entre $[-1, 1]$. C_{11}, C_{12}, C_{33} e C_{44} são as constantes elásticas do material e as direções x , y e z correspondem à 1, 2 e 3 para essas constantes, respectivamente. Novamente, os componentes dos vetores \mathbf{e}_i e \mathbf{e}_s na direção y são igualados a zero.

Para a simulação, foram consideradas as propriedades do aço ASTM A36. Amostras do mesmo material serão utilizadas na parte experimental do trabalho e serão descritas no Capítulo 4

de Materiais e Métodos. Outras definições comuns da parte experimental e da simulação como, por exemplo, especificações das sondas de *array* utilizadas e tamanhos de grão das amostras serão também apresentadas no Capítulo 4. As propriedades elásticas necessárias para a simulação são apresentadas na Tabela 3.1 onde se considerou a simetria cúbica para os grãos do material estudado (DUBOIS *et al.*, 1998).

Tabela 3.1. Propriedades elásticas para cálculo das amplitudes de espalhamento usando a aproximação de Born.

Propriedades elásticas do aço ASTM A36 (MATWEB, 2015)		
Densidade ρ (kg/m³):	7850	
Módulo de elasticidade E (GPa):	200	
Módulo de cisalhamento G (GPa):	79,3	
Coefficiente de Poisson ν :	0,26	
Relações entre constantes elásticas (BOWER, 2009)		
Constantes elásticas:	$C_{11} = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}$	$C_{12} = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)}$ $C_{44} = G$
Velocidades de onda:	$c_L = \sqrt{\frac{C_{11}}{\rho}}$	$c_S = \sqrt{\frac{C_{44}}{\rho}}$

As respostas no domínio da frequência para cada grão, obtidas usando a Equação 3.1, são somadas para obter o sinal contendo a contribuição de todos os grãos:

$$H_{e_T, e_R}^{total}(\omega) = \left(\frac{W}{2a_m} \right) \sum_{g=1}^{N_y} H_{e_T, e_R}^{x_g, z_g}(\omega) \quad (3.7)$$

onde N_y é o número total de grãos na RDI, W é a largura da amostra na direção y e a_m é o raio médio dos grãos. No intuito de comparar os resultados obtidos do modelo bidimensional com resultados experimentais e levar em conta a largura da amostra, um fator dado por (W/a_m) foi introduzido na Equação 3.7 para multiplicar a amplitude de cada sinal simulado. Nesse modelo,

os grãos estão no plano x - z e isso pode ser visto como uma “fatia” em $y = 0$. O volume então pode ser considerado como um conjunto de fatias com a mesma distribuição de grãos cada. Essas fatias estão distanciadas entre si a um diâmetro médio de grão na direção y . Na Figura 3.8 é apresentado um exemplo de sinal representando o ruído de grão simulado pelo modelo, já transformado para o domínio do tempo pela aplicação da transformada inversa de Fourier.

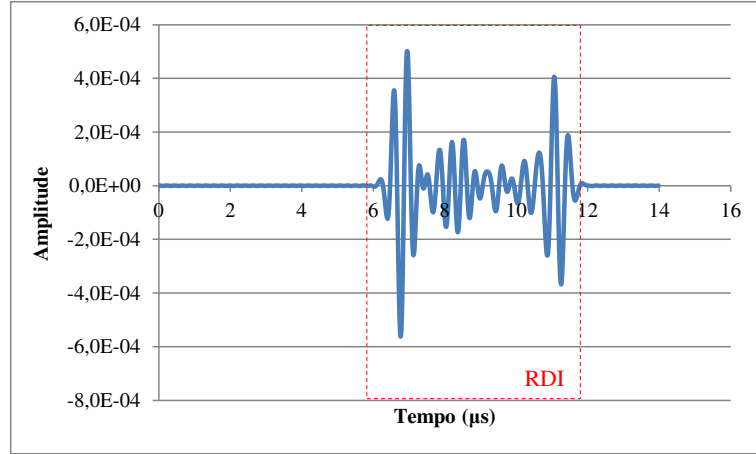


Figura 3.8. Exemplo de sinal simulado representando o ruído de grão (frequência de 2,5 MHz).

Para permitir a comparação entre dados experimentais e simulados, fez-se necessário também modelar o sinal de fundo da amostra conforme o esquema mostrado na Figura 3.9. A partir desse modelo geométrico, a resposta no domínio da frequência do sinal de fundo pode ser escrita como (ZHANG *et al.*, 2011):

$$H_{e_T, e_R}^{x_b, z_b}(\omega) = \frac{S(\omega) R_{e_T, e_R}^{x_b, z_b}(\omega) D_{e_T}^{x_b, z_b}(\omega) D_{e_R}^{x_b, z_b}(\omega) \exp\left(-i \frac{\omega}{c_L} (d_{e_T}^{x_b, z_b} + d_{e_R}^{x_b, z_b})\right)}{\sqrt{d_{e_T}^{x_b, z_b} + d_{e_R}^{x_b, z_b}}} \quad (3.8)$$

onde $R_{e_T, e_R}^{x_b, z_b}$ é o coeficiente de reflexão definido por:

$$R_{e_T, e_R}^{x_b, z_b} = \frac{(c_s/c_l)^2 \sin(2\alpha_l) \sin(2\alpha_s) - \cos^2(2\alpha_s)}{(c_s/c_l)^2 \sin(2\alpha_l) \sin(2\alpha_s) + \cos^2(2\alpha_s)} \quad (3.9a)$$

$$\alpha_s = \sin^{-1}[(c_s/c_l)\sin \alpha_l] \quad (3.9b)$$

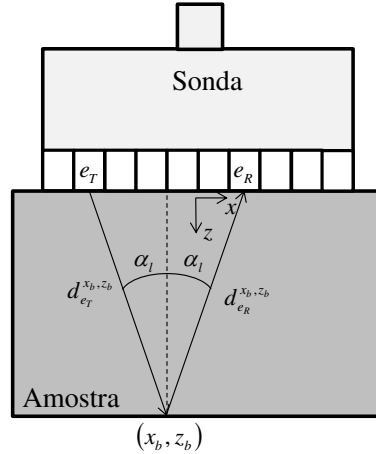


Figura 3.9. Esquema geométrico para modelamento do sinal de fundo.

Os sinais para todas as combinações entre elementos transmissores e receptores são simulados, levando em consideração que sinal para a combinação de um transmissor i e receptor j é igual ao sinal para a combinação do transmissor j e receptor i . Esse processo de aquisição de sinais para posterior formação de imagens ultrassônicas é chamado de *Full Matrix Capture* (FMC). Na Figura 3.10 é apresentado um exemplo de sinal no domínio do tempo representando o eco de fundo simulado.

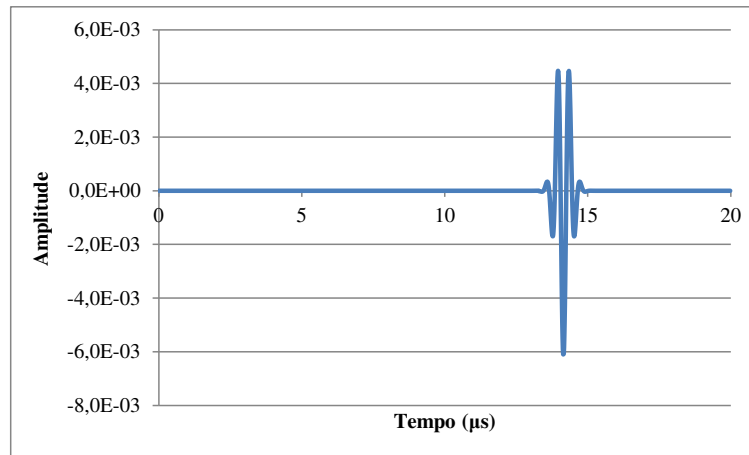


Figura 3.10. Exemplo de sinal simulado representando o eco de fundo (frequência de 2,5 MHz).

3.3 Geração de imagens

As imagens de ultrassom são geradas com os sinais simulados usando a técnica *Total Focusing Method* (TFM). Exemplos de imagens de TFM para o ruído de grão e para o sinal de fundo da peça são mostrados na Figura 3.11. Na escala em dB da intensidade das imagens, a intensidade máxima da imagem de sinal de fundo é definida como sendo igual a 0 dB.

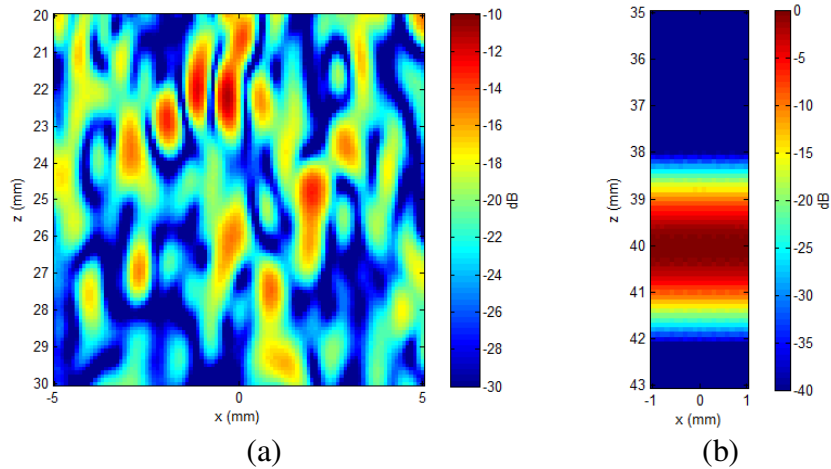


Figura 3.11. Exemplo de imagem de TFM simulado para sinais de (a) ruído de grão e de (b) fundo da peça (frequência de 5 MHz e tamanho de grão médio de 209 μm).

Para quantificar a intensidade do ruído de grão nas imagens e permitir a comparação entre dados experimentais e da simulação optou-se pela razão sinal-ruído (*signal to noise ratio* ou SNR) entre o sinal de fundo e ruído de grão. O SNR é calculado em decibéis usando a relação entre o valor máximo de intensidade na imagem do sinal de fundo e a raiz do valor quadrático médio (*root mean square*, ou RMS) da intensidade do ruído de grão em uma região determinada na peça. Sua equação pode ser escrita como:

$$SNR = 20 \log_{10} \left(\frac{\hat{I}_{SF}}{I_{RMS}} \right) \quad (3.10)$$

onde \hat{I}_{SF} é o valor máximo de intensidade da imagem de TFM do sinal de fundo e I_{RMS} é o valor RMS do ruído de grão da imagem do interior da peça, dado pela Equação 3.11, onde N_r é o número de pixels definido para a imagem de TFM e \mathbf{r} é o vetor que indica a posição de cada pixel na imagem. As imagens de TFM são calculadas, usando a Equação 2.22, a partir das formas de onda obtidas pelas Equações 3.7 e 3.8, após a aplicação da transformada inversa de Fourier discreta para obtenção dos sinais no domínio do tempo.

$$I_{RMS} = \sqrt{\left(\frac{1}{N_r}\right) \sum_{\mathbf{r}} [I(\mathbf{r})]^2} \quad (3.11)$$

As dimensões da RDI para geração das coordenadas dos grãos e das áreas correspondentes às imagens de TFM para ruído de grão e sinal de fundo da peça são mostradas na Figura 3.12.

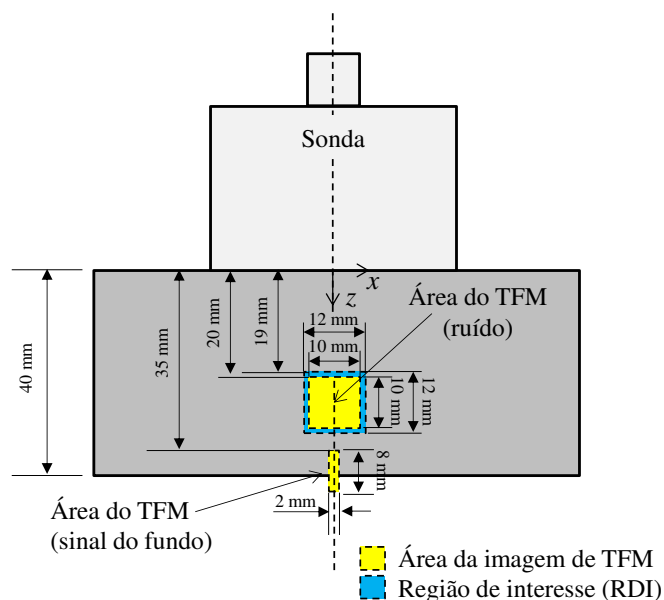


Figura 3.12. RDI e área das imagens de TFM considerada para a simulação.

Nota-se na Figura 3.12 que a área da imagem de TFM é menor que a da RDI para minimizar o efeito dos grãos da borda. O centro de coordenadas é estabelecido no centro do *array* e região de contato entre sonda e amostra. As posições e dimensões da RDI e da área da imagem

de TFM foram escolhidas de modo que os resultados pudessem ser comparados com as medições nas amostras reais. As regiões foram definidas para que os grãos estivessem localizados no campo distante (onde o modelo é válido) em relação aos elementos do *array*. Definiu-se também que o número de grãos na RDI fosse suficiente para que a imagem gerada pudesse levar em conta grãos com tamanhos diversos, conforme a distribuição pré-estabelecida. Porém, o número de grãos precisou ser limitado para que o tempo de simulação não fosse impraticável, tendo em vista que a Equação 3.1 precisa ser calculada para cada grão na RDI. Através de testes preliminares com diversos tamanhos de RDI e da área da imagem de TFM, verificou-se que as dimensões apresentadas na Figura 3.12 eram satisfatórias quanto ao tempo de simulação.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são descritos os materiais estudados e os procedimentos experimentais utilizados no trabalho. Primeiramente, detalhes acerca dos corpos de prova são apresentados, tais como composição química, processo de fabricação e dimensões geométricas das amostras. Em seguida, os procedimentos experimentais são detalhados com descrições dos métodos e dos dispositivos empregados durante os experimentos, bem como dos sistemas e softwares utilizados para efetuar as medições.

O objetivo principal dos experimentos é verificar de que forma variações na microestrutura do material influenciam no ruído de grão em imagens geradas com *arrays* ultrassônicos. As variações na microestrutura consideradas foram: (a) o tamanho de grão médio e (b) a direção preferencial de alinhamento dos grãos causada pelo processo de laminação das amostras. Possíveis não uniformidades presentes nas amostras estudadas também foram avaliadas através de medições em diferentes pontos de várias amostras. Os efeitos das mesmas variações já citadas na microestrutura foram verificados na velocidade da onda L_{cr} , que apesar de conhecidos e documentados na literatura, precisam ser confirmados para os sistemas de medição utilizados neste trabalho. Com os dados das medições, espera-se estabelecer uma relação entre ruído de grão e velocidade de onda. Também é verificado se o ruído de grão nas imagens ultrassônicas é influenciado por variações de temperatura e tensão aplicada no material.

Neste trabalho, é utilizado um sistema único de medição de ondas L_{cr} em que a onda percorre necessariamente a mesma distância no material sendo inspecionado. Por isso é utilizado o tempo de percurso (TOF, de *Time-Of-Flight*) e não a velocidade de onda como parâmetro de estudo. A métrica utilizada para avaliar a intensidade do ruído de grão nas imagens ultrassônicas é a relação sinal-ruído (SNR), definida Capítulo 3. Na Tabela 4.1 são apresentados os experimentos realizados e os objetivos que se deseja alcançar com cada um deles.

Tabela 4.1. Experimentos realizados no trabalho.

Parâmetro analisado	Fator de influência	Objetivo do experimento
TOF	Tamanho de grão	Determinar a influência do tamanho de grão no TOF da onda L_{cr} .
	Direção de laminação	Determinar a influência da direção de laminação no TOF da onda L_{cr} .
	Posição de medição	Determinar a influência da posição de medição no TOF da onda L_{cr} .
	Temperatura	Determinar a influência da temperatura no TOF da onda L_{cr} .
	Tensão	Verificar a influência da tensão no TOF da onda L_{cr} .
SNR	Tamanho de grão	Verificar se o SNR é influenciado pelo tamanho de grão.
	Direção de laminação	Verificar se o SNR é influenciado pela direção de laminação.
	Posição de medição	Verificar se o SNR é influenciado pela posição de medição nas amostras.
	Temperatura	Verificar se o SNR é influenciado pela temperatura.
	Tensão	Verificar se o SNR é influenciado pela tensão aplicada.

4.1 Corpos de prova

O material utilizado para avaliar a influência da microestrutura no ruído de grão nas imagens ultrassônicas e na velocidade da onda L_{cr} é o aço estrutural ASTM A36. Contudo, para

verificar se existe influência do efeito acustoelástico nas imagens ultrassônicas, o material escolhido foi o aço API 5L X70. Este último foi escolhido para esta etapa do trabalho porque a influência do efeito acustoelástico para ondas L_{cr} neste material é bem conhecida e estudada (SANTOS, 2007; ANDRINO, 2007; FRAGA, 2007; SANTOS, 2013). Vale salientar também que a variação entre valores de constantes acustoelásticas para diferentes tipos de aços não é significativa (BRAY, 2015).

A composição química do aço ASTM A36 é dada na Tabela 4.2 enquanto suas propriedades mecânicas estão na Tabela 4.3. Este aço tem ampla utilização para fins estruturais na construção civil. A composição e propriedades mecânicas do aço API 5L X70 são apresentadas na Tabela 4.4 e Tabela 4.5, respectivamente. O aço API 5L X70 é especialmente empregado na fabricação de dutos utilizados pela indústria petrolífera.

Tabela 4.2. Composição química do aço ASTM A36 (ASTM, 2014).

Elemento	C	P	S	Si	Cu
Quantidade	0,26	0,04	0,05	0,40	0,20
máxima (%)					(mínimo)

Tabela 4.3. Propriedades mecânicas principais do aço ASTM A36 (ASTM, 2014).

Propriedade	Limite de resistência (MPa)	Limite de escoamento (MPa)
Valor	400 - 550	250

Tabela 4.4. Composição química do aço API 5L X70 (SANTOS, 2007).

Elemento	Quantidade (%)	Elemento	Quantidade (%)
C	0,069	Mn	1,529
Si	0,339	S	0,0004
P	0,01	Cu	0,017
Al	0,031	V	0,059
Nb	0,043	Cr	0,02
Ti	0,001	Mo	0,001
Ni	0,02	N	0,0054
B	0,0001	Ca	0,0013

Tabela 4.5. Propriedades mecânicas principais do aço API 5L X70 (SANTOS, 2007).

Propriedade	Limite de resistência (MPa)	Limite de escoamento (MPa)
Valor	650	600

Dois tipos de amostras do aço ASTM A36 foram utilizadas: o primeiro tipo sem tratamento térmico e o segundo com tratamento térmico para crescimento do grão austenítico. As dimensões das dez amostras utilizadas neste trabalho sem tratamento térmico podem ser vistas na Figura 4.1. A direção de laminação é conhecida para todas as amostras. Essa informação é particularmente importante, tendo em vista que em estudos anteriores (CAETANO, 2003; BUENOS, 2014) verificou-se que a velocidade da onda L_{cr} tanto para o aço ASTM A36 quanto para o API 5L X70 é sensível à direção de laminação. As amostras são identificadas pelos números: 8, 9, 10, 15, 16, 17, 19, 21, 24 e 25.

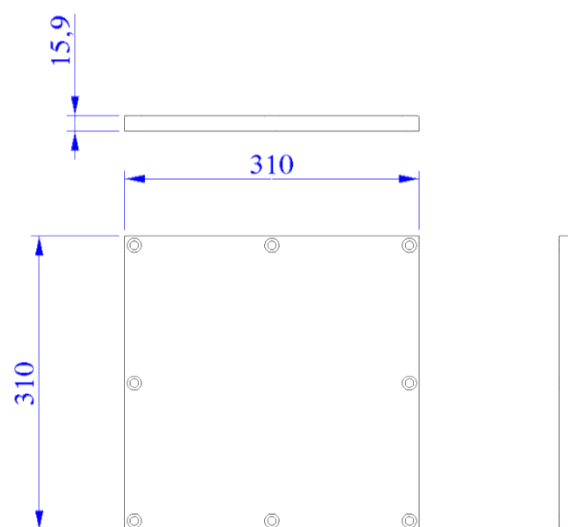


Figura 4.1. Desenho esquemático representando a amostra sem tratamento térmico (dimensões em mm).

As amostras de aço A36 tratadas termicamente foram as mesmas utilizadas por Buenos *et al.* (2014) para avaliar a influência do tamanho de grão médio na velocidade da onda L_{cr} . A geometria de uma das amostras está representada na Figura 4.2. As amostras apresentam dimensões menores se comparadas com as amostras sem tratamento térmico para poderem ser acomodadas no forno para o tratamento. Foram utilizadas cinco amostras, cada uma com um tamanho de grão médio diferente. Para obter esse resultado, cada uma delas foi tratada termicamente em uma determinada temperatura: 900, 1000, 1050, 1100 e 1200 °C. As amostras permaneceram no forno por 30 minutos sob a temperatura de tratamento estabelecida e depois foram resfriadas para a temperatura ambiente. Para a realização da medição dos tamanhos dos grãos austeníticos, um tratamento de têmpera parcial foi realizado em outras amostras e os grãos medidos por micrografia ótica utilizando a técnica de interceptos lineares (ASTM, 2010). As informações sobre as temperaturas de tratamento térmico e tamanhos de grão médio medidos e seus respectivos desvios padrão estão resumidas na Tabela 4.6. Maiores detalhes sobre as amostras e tratamentos são apresentados em (BUENOS *et al.*, 2014; BUENOS, 2014).

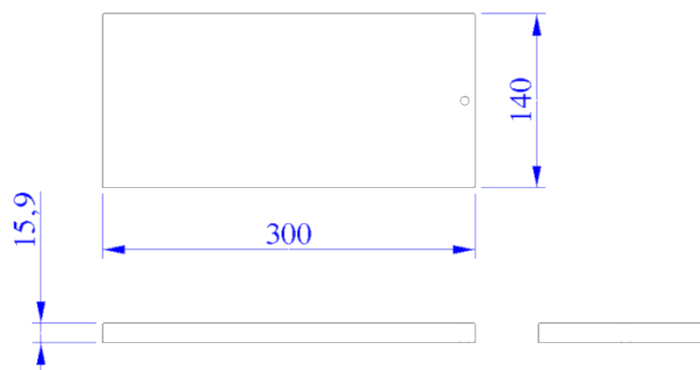


Figura 4.2. Desenho esquemático representando a amostra com tratamento térmico (dimensões em mm).

Tabela 4.6. Tamanhos de grão médios de cada amostra e os desvios padrão das medições (BUENOS *et al.*, 2014).

Amostras	Diâmetro de grão (μm)	
Temperatura de tratamento ($^{\circ}\text{C}$)	Média	Desvio padrão
900	22	3
1000	98	26
1050	131	28
1100	166	25
1200	209	59

Uma barra do aço API 5L X70 foi utilizada como amostra para verificação do efeito acustoelástico e seu desenho esquemático com dimensões está na Figura 4.3. Os furos nas extremidades da barra servem para fixação do corpo de prova no dispositivo especial de aplicação de tração que será explicado com detalhes mais adiante no texto, ainda neste Capítulo.

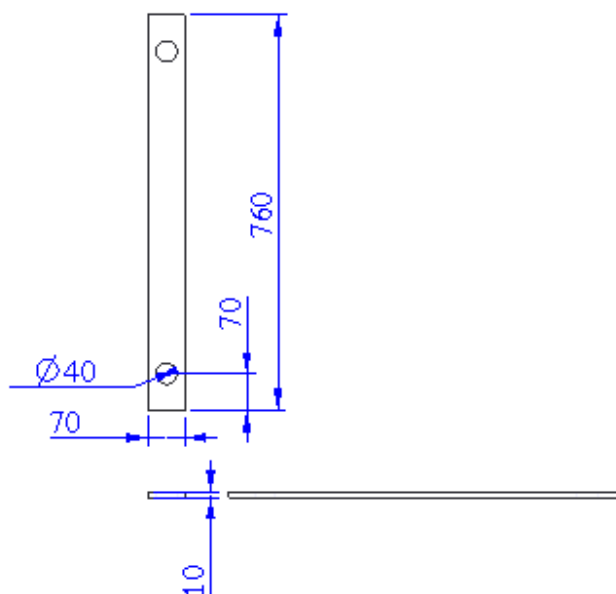


Figura 4.3. Desenho esquemático representando a amostra de aço API 5L X70 (dimensões em mm).

4.2 Sistemas de medição

Nesta seção são descritos os três principais sistemas de medição utilizados neste trabalho, o primeiro para geração, recepção e processamento de sinais para ondas L_{cr} e os outros dois para a obtenção de imagens de ruído de grão geradas a partir sinais provenientes de sensores estratificados ultrassônicos. Um dos sistemas para obtenção de imagens apresenta 64 canais e o segundo 128 canais e serão descritos com maiores detalhes nas seções seguintes.

4.2.1 Sistema de medição com ondas L_{cr}

A sonda para geração e recepção da onda L_{cr} utilizada em todo o trabalho é formada por dois transdutores ultrassônicos de ondas longitudinais de frequência de 2,25 MHz da marca Olympus com elemento piezelétrico retangular de dimensões de 12,7 x 25,4 mm (0,5 x 1 pol) (Figura 4.4). A frequência do par de transdutores utilizado neste trabalho tem se mostrado adequada para ensaios com onda L_{cr} no aço, conforme estudos anteriores (FRAGA, 2007; BUENOS, 2014).



Figura 4.4. Modelo do transdutor utilizado para geração e recepção da onda L_{cr} .

Os transdutores são acoplados em sapatas (ou cunhas) fabricadas de Rexolite® e com geometria que permita que o ângulo de incidência da onda ultrassônica no material seja igual ao primeiro ângulo crítico. Dessa forma a onda L_{cr} é formada no material e se propaga paralela à superfície e atinge a sapata onde está acoplado o transdutor para recepção da onda. Um desenho esquemático com as principais dimensões da sonda e uma foto do dispositivo real podem ser vistos na Figura 4.5.

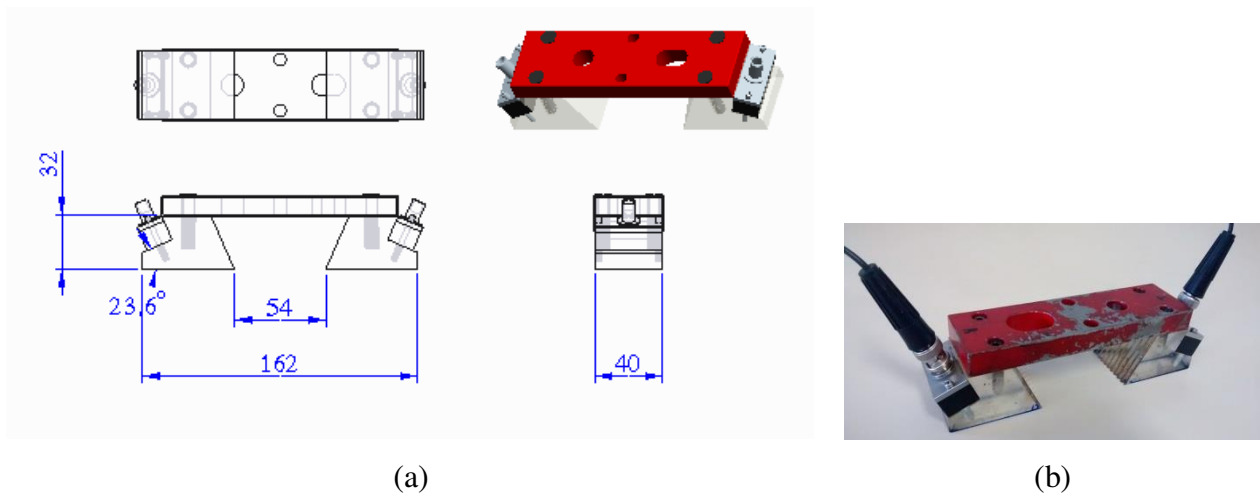


Figura 4.5. (a) Desenho esquemático da sonda de geração e recepção de ondas L_{cr} (dimensões em mm) e (b) foto da sonda real.

O Rexolite[®] foi escolhido como material da sapata por apresentar baixa atenuação para ondas ultrassônicas na frequência de trabalho utilizada se comparado, por exemplo, ao acrílico (PMMA), material comumente utilizado para fabricação de sapatas para aplicações ultrassônicas (Santos *et al.*, 2013). O ângulo de inclinação em que fica posicionado o transdutor na sapata ($23,6^\circ$) é calculado pela lei de Snell (Equação 2.1) considerando a velocidade média da onda longitudinal no aço de 5.900 m/s e no Rexolite[®] de 2.362 m/s (ENSINGER, 2011).

A distância entre sapatas na sonda é definida de modo que os transdutores emissor e receptor não fiquem muito distantes entre si e a atenuação no material não dificulte a leitura do sinal recebido, ao mesmo tempo também que não fiquem próximos demais, comprometendo a precisão de medição do tempo percurso. Como os efeitos estudados de temperatura, microestrutura e tensão afetam a velocidade de onda, o efeito no tempo de percurso, que é realmente medido, fica comprometido se a distância percorrida pela onda é reduzida.

A emissão dos sinais elétricos para o transdutor emissor na sonda bem com a recepção do sinal gerado pelo transdutor receptor é feita por um pulsador/receptor de sinais ultrassônicos da marca Panametrics, modelo 5072PR (Figura 4.6).



Figura 4.6. Pulsador/receptor de sinais ultrassônicos Panametrics.

O controle da emissão e recepção dos sinais no pulsador/receptor bem como a conversão dos sinais analógicos para digital é feita por uma “placa osciloscópio” digitalizadora da marca National Instruments, modelo NI PXI 5114, com taxa de amostragem de 250 MHz e resolução de 8 bits. Essa placa é conectada a um controlador embarcado modelo NI PXI 8108 que funciona como um PC, tendo um sistema operacional Windows XP instalado e conta com um processador Intel Core 2 Duo T9400. Uma foto do controlador pode ser vista na Figura 4.7.



Figura 4.7. Controlador embarcado NI PXI 8108.

Para medição de temperatura das amostras durante os ensaios com ondas L_{cr} , foi utilizado um termopar do tipo K conectado a um módulo condicionador de sinais para termopar e conversor analógico/digital de 14 amostras por segundo e resolução de 24 bits da National Instruments, modelo NI 9211. A conexão entre o módulo e o controlador embarcado é feita via rede Ethernet utilizando o módulo transmissor modelo NI WLS/ENET-9163, também da empresa National Instruments. O conjunto formado pelo termopar, módulo condicionador e módulo transmissor pode ser visto na Figura 4.8.



Figura 4.8. Termopar, módulo condicionador NI 9211 e módulo transmissor NI WLS/ENET-9163.

A leitura dos sinais adquiridos pelo sistema de medição de ondas L_{cr} , assim como dos valores de temperatura obtidos pelo termopar, é feita através de uma aplicação desenvolvida utilizando o programa LabVIEW chamada “L Scope GU 2015”. Essa aplicação foi adaptada a partir das pesquisas desenvolvidas por Pereira Junior (2011) e Buenos (2014). A tela principal da aplicação pode ser vista na Figura 4.9.

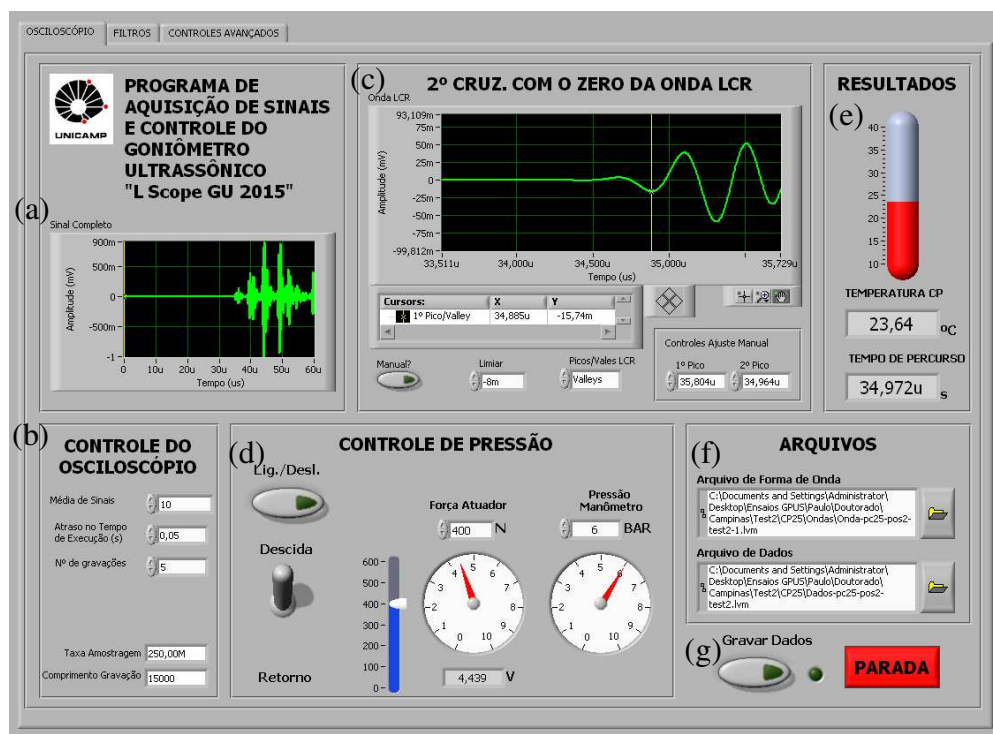


Figura 4.9. Tela principal da aplicação “L Scope GU 2015”.

A tela principal do programa denominada “osciloscópio” é dividida em 7 partes principais, designadas na Figura 4.9 pelas letras de (a) à (g), marcadas na Figura 4.9. Em (a), por exemplo, observa-se a forma de onda do sinal completo adquirido. Em (b) são apresentados os controles: “Média de Sinais”, que define o número de sinais adquiridos consecutivamente para obtenção do sinal médio calculado ponto a ponto e exibido pelo programa; “Atraso do Tempo de Execução”, que define a frequência com que o programa faz a leitura dos sinais digitalizados; “Número de Gravações”, que define a quantidade de sinais gravados quando o botão “Gravar Dados” em (g) é acionado; indicador “Taxa de Amostragem”, que mostra a taxa atual em que o sinal está sendo amostrado pela placa digitalizadora; e “Comprimento de Gravação”, que define a quantidade de pontos do sinal a ser gravado.

Na parte (c) do programa são definidos os parâmetros que determinam o tempo de percurso medido da onda. Neste trabalho, utiliza-se como ponto de medição no sinal o “segundo cruzamento com o zero” (ANDRINO, 2007) para determinação do TOF. Assim, o tempo de percurso é estabelecido de forma relativa como o segundo ponto de cruzamento com o zero do sinal, após o primeiro pico da onda L_{cr} ser detectado. Como o primeiro pico pode ter amplitude pequena o suficiente a ponto de ser confundido com ruído, o programa permite que se use o primeiro vale. Nesse caso, o segundo cruzamento com o zero após o primeiro pico corresponde ao primeiro cruzamento com o zero após o primeiro vale. Tanto o primeiro pico quanto o primeiro vale e o segundo cruzamento com o zero são indicados na Figura 4.10. Vale ainda notar, que a onda L_{cr} é a primeira a ser detectada pelo transdutor receptor, pois se trata de uma onda longitudinal (mais rápida) e que viaja em linha reta paralela à superfície (menor percurso). Tanto para o pico, como para o vale, é necessário informar para o programa um limiar (*threshold*) para o que é considerado pico ou vale, já que um ruído poderia ser utilizado por engano. O LabVIEW disponibiliza uma função para detecção de picos e vales e o resultado do cruzamento com o zero é obtido pela interpolação linear entre o ponto amostrado com valor de amplitude menor que zero e a próxima amostra com valor maior que zero.

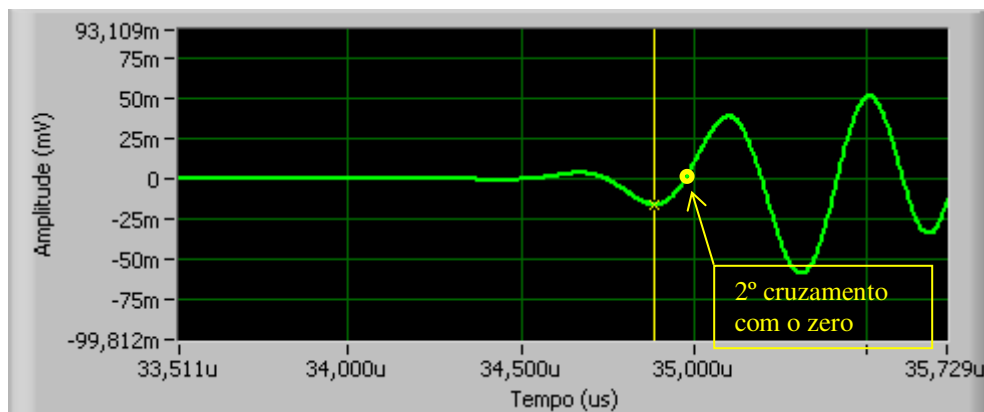


Figura 4.10. Indicação do segundo cruzamento com o zero na onda L_{cr} .

A parte indicada pela letra (d) na tela do programa na Figura 4.9 não foi utilizada neste trabalho. Em outro trabalho, foi empregada para o controle da pressão de sobre o transdutor (controle de força no contato sonda-peça), ou da força aplicada nos ensaios de tensão. Na parte (e), podem-se observar os resultados lidos de temperatura e tempo de percurso da onda. O programa permite gravar tanto os dados de temperatura e TOF, quanto as formas de onda. Na parte indicada pela letra (f), é possível definir o local de gravação desses dados. Por fim, em (g), estão localizados os botões de gravação e parada do programa.

As outras duas telas da aplicação “L Scope GU 2015” podem ser vistas na Figura 4.11. Na aba “filtros”, estão as configurações para três tipos de filtros digitais possíveis incluídos no programa: FIR (*Finite Impulse Response*), IIR (*Infinite Impulse Response*) e DWT (*Digital Wavelet Transform*). Neste trabalho, para todos os ensaios usando o sistema com ondas L_{cr} foi utilizado um filtro passa-banda FIR com frequência de corte entre 2 e 2,5 MHz, janela *Hanning*, e número de coeficientes igual a 200. Essa configuração foi escolhida após sucessivas variações dos parâmetros para obtenção do sinal livre de ruídos, da forma que pode ser vista na Figura 4.10. A presença de ruídos de natureza elétrica e do próprio ruído de grão do material dificultaria a definição do segundo cruzamento com o zero no sinal. Na aba “controles avançados”, são encontrados ajustes mais específicos na aquisição do sinal como ajustes vertical e horizontal da função osciloscópio do programa, tipo de trigger, entre outros.

Um desenho esquemático com todos os elementos necessários para medição com ondas L_{cr} é mostrado na Figura 4.12.

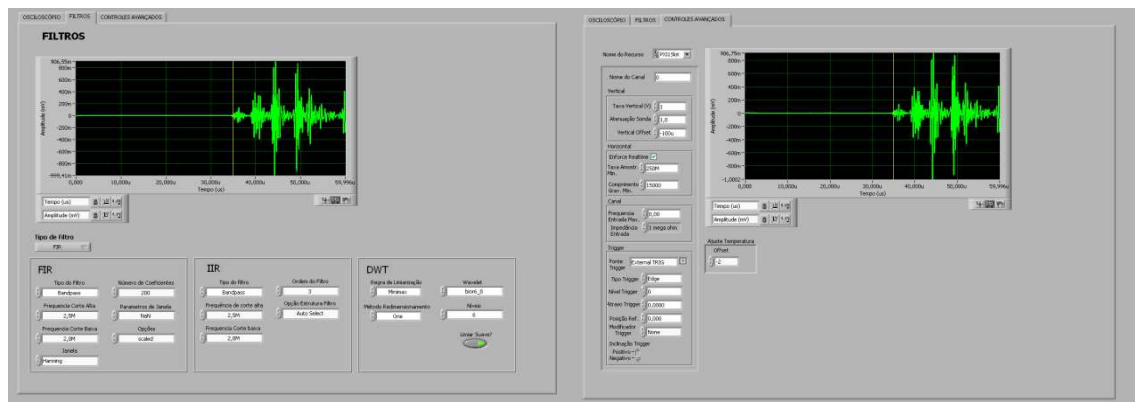
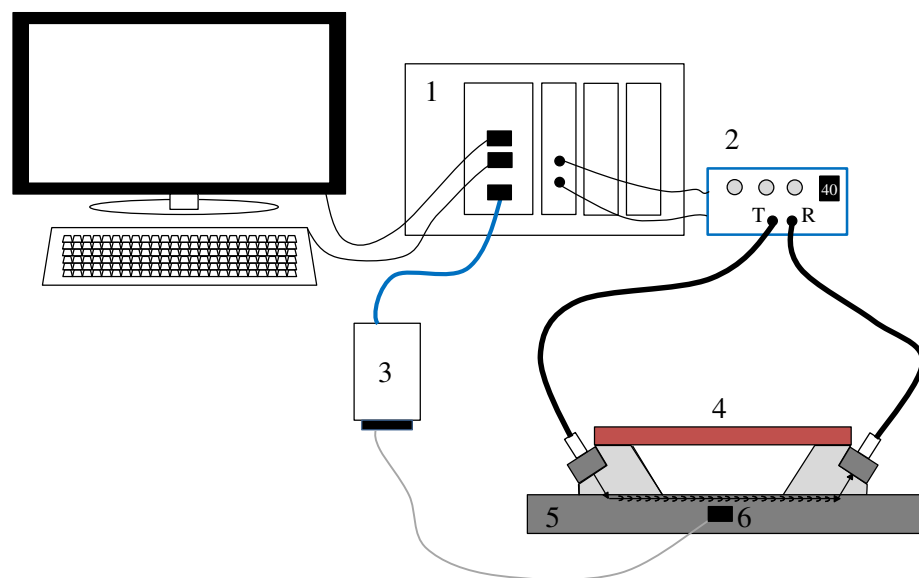


Figura 4.11. Telas de “filtros” (à esquerda) e “controles avançados” (à direita) da aplicação “L Scope GU 2015”.



1) Controlador embarcado	4) Sonda para ondas L_{cr}
2) Pulsador/receptor	5) Amostra inspecionada
3) Módulo de aquisição de temperatura	6) Termopar

Figura 4.12. Desenho esquemático do sistema de medição com ondas L_{cr} .

4.2.2 Sistema para geração de imagens ultrassônicas (64 canais)

O sistema de medição para obtenção das imagens a partir dos sinais provenientes da sonda de sensores estratificados (*array*) é composto pela própria sonda, por uma unidade controladora e um computador pessoal. Essa unidade é responsável principalmente pela emissão e recepção dos sinais para cada um dos elementos da sonda, pela conversão analógico/digital dos sinais e pela sincronização de acionamento dos elementos, dentre outras funções. Um laptop (Fabricante Dell, modelo “Latitude” E6530, processador Intel Core[®] i5-3340M CPU 2,70 GHz) com um programa específico é utilizado para controle e monitoramento dos dados da unidade controladora, via cabo USB.

Uma das unidades de controle utilizadas no trabalho é a MultiX++ da fabricante M2M (Figura 4.13) pertencente ao Laboratório de Acustoelástica da UNICAMP. Essa unidade conta com 64 canais, isso significa que ela pode controlar até 64 elementos da sonda conectada a ela independentemente. Essa característica permite que sinais sejam capturados pela técnica *Full Matrix Capture* (FMC), que consiste em gravar os sinais resultantes de todas as combinações possíveis de elemento transmissor e receptor. Portanto, para uma aquisição que utilize todos os 64 canais da unidade, 4096 (64^2) formas de onda são gravadas pelo FMC. Essas formas de onda são necessárias para formação de imagens pelo TFM.



Figura 4.13. Unidade de controle MultiX++.

Para esse sistema, foi utilizada uma sonda da fabricante Imasonic de frequência central de 5 MHz e 64 elementos (modelo M2M_114). A frequência assim como o número de elementos escolhidos para a sonda têm se mostrado adequados em ensaios para geração de imagens de TFM (HOLMES *et al.*, 2005; ZHANG *et al.*, 2013). A Figura 4.14 mostra uma foto da sonda e um desenho esquemático mostrando as principais dimensões da sonda, como tamanho dos elementos e distância entre eles.

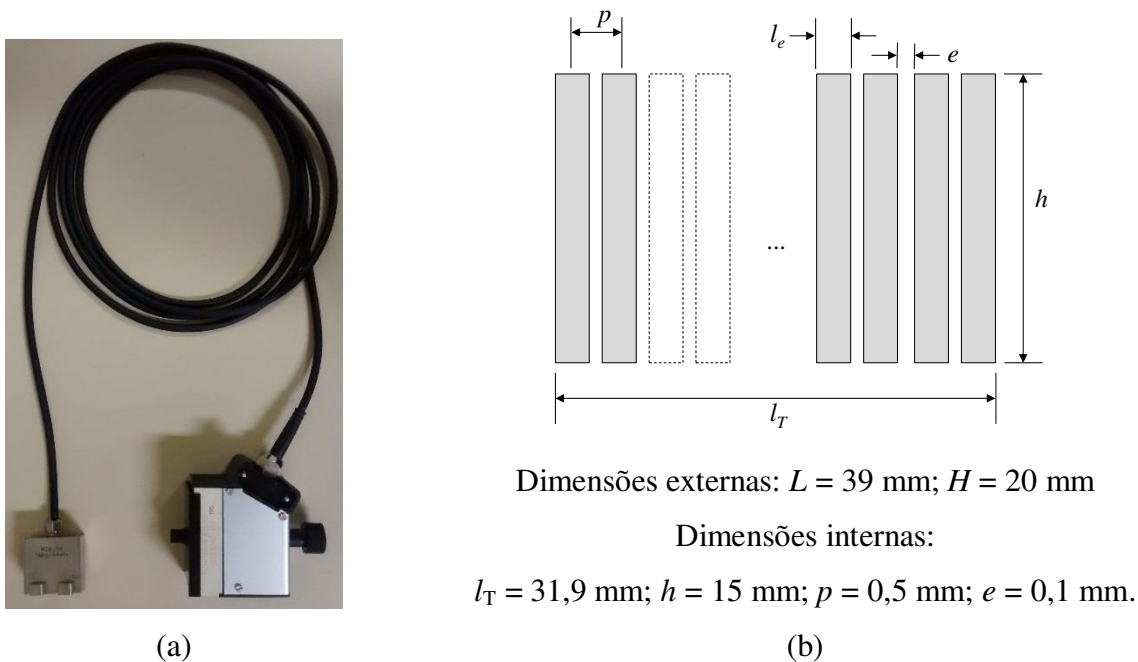


Figura 4.14. (a) Foto da sonda de 5 MHz e 64 elementos e (b) as principais dimensões dos seus elementos.

As configurações necessárias para efetuar a aquisição das formas de onda são feitas através do programa “Multi2000”, versão 6.9.25, fornecido pela fabricante da unidade controladora. O programa é dividido em três partes principais, uma para configuração, uma para definição de parâmetros e visualização das formas de onda e a terceira para a aquisição dos sinais. Na tela de configuração é definido, por exemplo, o tipo de aquisição (para este trabalho, o FMC para gerar as imagens pelo TFM) e dados sobre a sonda utilizada. Na tela de parâmetros é possível ver o

sinal em cada um dos elementos em função do elemento emissor escolhido, assim como uma representação em “B-scan” (Figura 4.15). Nessa tela também são definidos a tensão elétrica aplicada nos elementos, a largura de pulso, frequência de excitação, frequência de amostragem, comprimento do sinal e o ganho. Por fim, na tela de aquisição, como o próprio nome sugere, é onde se aciona o botão para gravação dos sinais com base nas especificações estabelecidas. Depois da gravação, um arquivo contendo todas as 4096 formas de onda é gerado em formato “txt” para que essas sirvam de entrada para o algoritmo de formação das imagens.

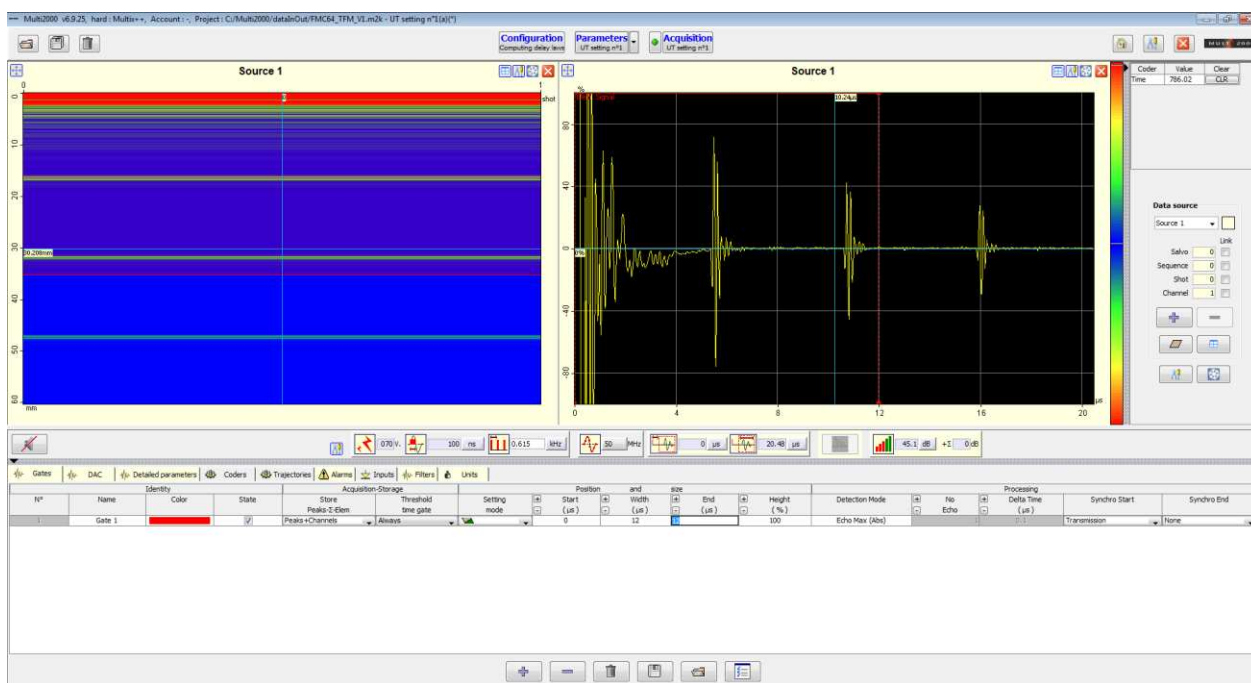


Figura 4.15. Tela principal do programa “Multi2000”.

A temperatura das amostras também foi lida durante os ensaios com o *array* ultrassônico. Para isso, os mesmos módulos utilizados para o condicionamento do sinal e o termopar do tipo K, descritos na seção anterior, foram empregados. Uma aplicação em LabVIEW foi criada especialmente para leitura e gravação dos valores de temperaturas lidos pelo termopar. A tela dessa aplicação está representada na Figura 4.16. Na Figura 4.17 está representado o desenho esquemático para o sistema de medições com *array*.

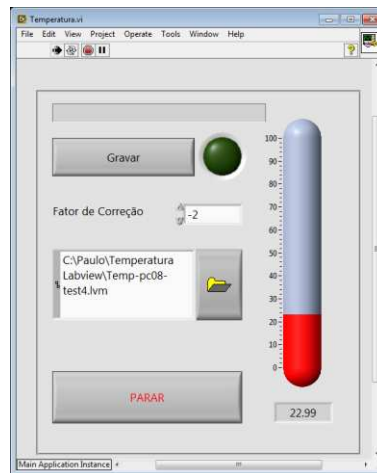
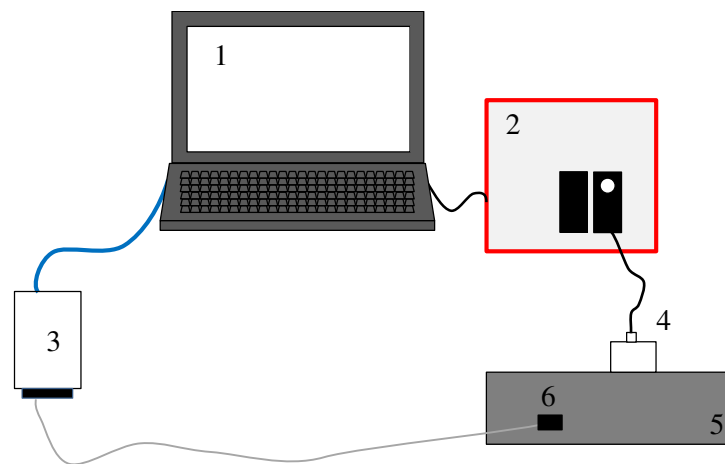


Figura 4.16. Tela do programa de medição de temperatura para sistema com *array* ultrassônico de 64 canais.



1) Laptop	4) Sonda de <i>array</i>
2) Controlador	5) Amostra inspecionada
3) Módulo de aquisição de temperatura	6) Termopar

Figura 4.17. Desenho esquemático do sistema de medição com *array* de 64 canais.

4.2.3 Sistema para geração de imagens ultrassônicas (128 canais)

Em parte do trabalho também foi utilizada uma unidade de controle de *arrays* de 128 canais, pertencente ao grupo de pesquisa em ultrassom e ensaios não destrutivos da Universidade de Bristol (Reino Unido). Essa unidade, “Micropulse FMC” (Figura 4.18), foi fabricada pela empresa Peak NDT. Para o controle da unidade, os pesquisadores desenvolveram uma aplicação em MATLAB e sua tela principal pode ser vista na Figura 4.19.



Figura 4.18. Unidade de controle “Micropulse FMC”.

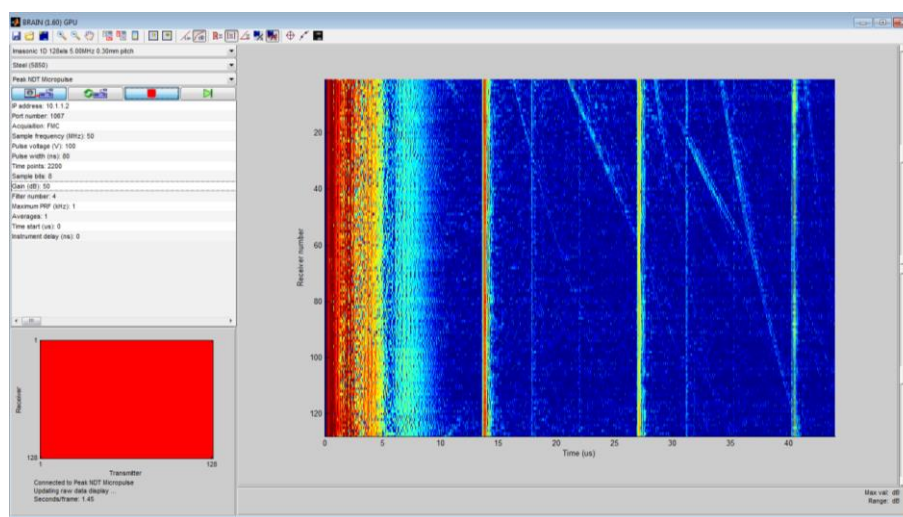


Figura 4.19. Tela do programa da unidade de controle “Micropulse FMC”.

Na tela do programa apresentado na Figura 4.19, os principais controles referentes à aquisição dos sinais são: o tipo de aquisição, a frequência de amostragem, a voltagem e a largura

do pulso, o número de pontos gravados, a resolução e a frequência de excitação. Além disso, na tela principal, há também uma imagem resultante de uma combinação dos sinais adquiridos.

As sondas utilizadas em conjunto da unidade de controle de 128 canais estão detalhadas na Tabela 4.7.

Tabela 4.7. Detalhes das sondas utilizadas com a unidade de controle “Micropulse FMC”.

Fabricante:	Imasonic		
Frequência central (MHz):	2,5	5	10
Número de elementos:	64	128	128
Distância entre elementos (<i>Pitch</i>), p (mm):	0,5	0,3	0,3
Espaço entre elementos, e (mm):	0,15	0,1	0,05
Elevação dos elementos, h (mm):	15	15	10

4.3 Procedimentos experimentais

Nesta seção são listados os experimentos realizados no trabalho. Para cada seção apresentada a seguir, os resultados obtidos correspondentes a cada experimento serão mostrados no próximo capítulo de resultados.

4.3.1 Avaliação da influência da temperatura no tempo de percurso da onda L_{cr}

A influência da temperatura na velocidade de ondas ultrassônicas já é bastante conhecida. Em especial, para ondas L_{cr} , vários trabalhos já abordaram esse tema como, por exemplo, Santos (2007) para o aço API 5L X70 e Buenos (2014) para o aço A36. Nos trabalhos citados, verificou-se que a velocidade da onda ultrassônica decresce linearmente com o aumento da temperatura e o

objetivo desse experimento é verificar se o mesmo ocorre para as amostras e sistema de medição utilizados neste trabalho. Se confirmado o efeito esperado, será obtida a taxa com que o tempo de percurso da onda L_{cr} cresce em função da temperatura, ou a taxa com que decresce a velocidade da onda em função da temperatura. Essa taxa é utilizada para realizar correções nos valores medidos em diferentes temperaturas e normalizá-los para uma temperatura padrão.

As posições de medição com a sonda de ondas L_{cr} nas duas amostras estão representadas na Figura 4.20. Em uma das amostras de aço A36 (peça 21) sem tratamento térmico e na amostra de API 5L X70 foi posicionado o termopar descrito na seção 4.2.1. No dia anterior aos experimentos, o ar condicionado do laboratório foi deixado ligado em sua potência máxima durante a noite e no dia seguinte, ainda com o ar condicionado ligado, foi feita a primeira medição com ondas L_{cr} e em seguida desligou-se o ar condicionado. À medida que a temperatura subia gradativamente ao longo do dia, foram feitas medições aproximadamente a cada grau Celsius. A faixa de temperatura definida foi de 16 a 25 °C. Devido à oscilação na leitura dos valores de TOF e temperatura, em cada medição, o programa gravava cinco valores obtidos em sequência.

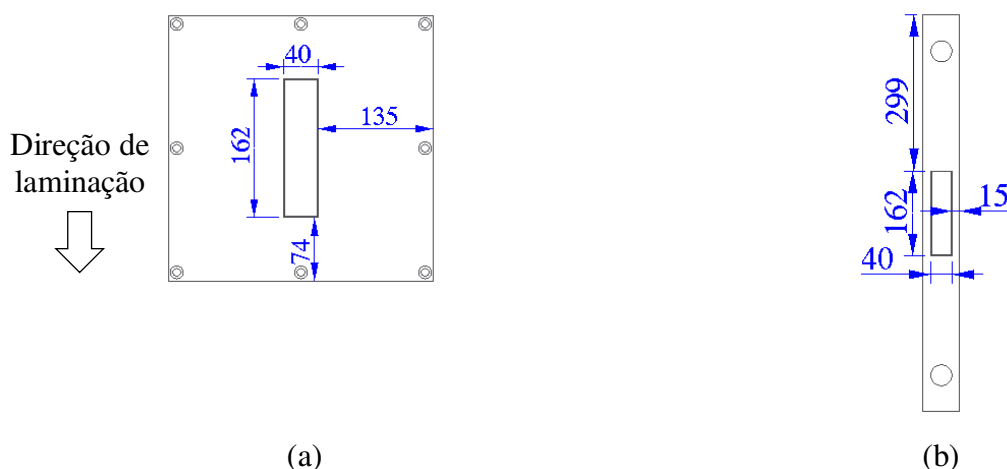


Figura 4.20. Posições de medição nas amostras de (a) aço A36 e (b) API 5L X70 nos ensaios para verificação da influência da temperatura no TOF da onda L_{cr} . Todas as dimensões estão milímetros.

Nos contatos entre transdutor e sapata e entre sapata e amostra é colocado gel para ensaios ultrassônicos (marca “Carbogel”). O gel tem a finalidade de preencher os possíveis espaços vazios entre os contatos, criados devido às irregularidades superficiais e facilitar o acoplamento. Foi colocado um peso morto de aproximadamente 2,3 kg sobre a sonda, de forma a melhorar o contato e impedir que a sonda se mova durante os ensaios (Figura 4.21). Tanto o gel quanto o peso morto foram utilizados em todos os ensaios com ondas L_{cr} .

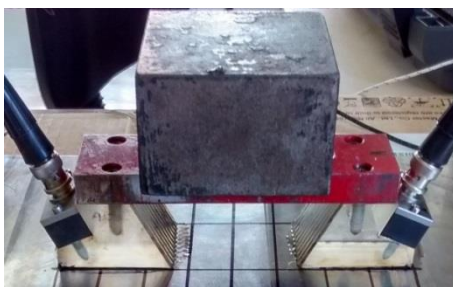


Figura 4.21. Sonda de ondas L_{cr} com peso morto.

4.3.2 Avaliação da influência do tamanho de grão no tempo de percurso da onda L_{cr}

Nas cinco amostras tratadas termicamente para crescimento do grão austenítico, foi medido o tempo de percurso da onda L_{cr} e a temperatura da amostra com os sistemas de medição já descritos, a fim de possibilitar a futura correção do valor de TOF para uma temperatura padrão escolhida. A posição da sonda de ondas L_{cr} na amostra durante as medições pode ser vista na Figura 4.22.

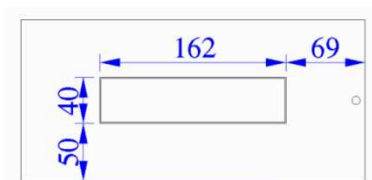


Figura 4.22. Posição de medição com a sonda de ondas L_{cr} nas amostras tratadas termicamente.

Todas as dimensões estão milímetros.

Três medições foram realizadas em cada peça, sendo que em cada medição, cinco valores de TOF e temperaturas foram lidos e gravados. Após cada uma das três medições, a sonda foi removida e o gel foi repostado. A sequência de medição das peças foi aleatorizada.

4.3.3 Avaliação da influência da direção de laminação no tempo de percurso da onda L_{cr}

Foram escolhidas duas posições de medição nas 10 amostras não tratadas onde a direção de propagação da onda L_{cr} coincide com a direção de laminação e outras duas posições onde a direção de propagação da onda é perpendicular à direção de laminação. As posições citadas são vistas na Figura 4.23. As temperaturas das amostras foram medidas usando o sistema já descrito e, da mesma forma como para as amostras tratadas para crescimento de grão, três medições foram feitas em cada posição e em cada uma delas cinco valores de TOF e temperatura foram lidos.

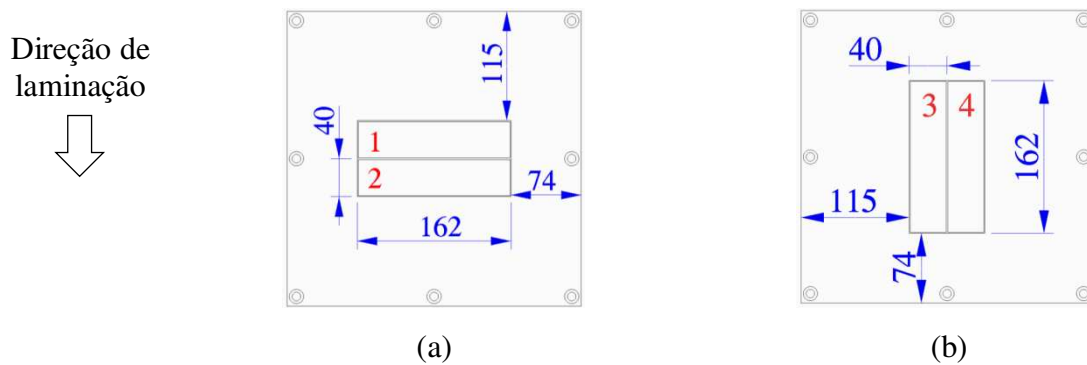


Figura 4.23. Posições de medição com a onda L_{cr} propagando (a) perpendicular (posições “1” e “2”) e (b) paralela à direção de laminação (posições “3” e “4”). Dimensões em milímetros.

4.3.4 Avaliação da influência da posição de medição no tempo de percurso da onda L_{cr}

Neste ensaio foram definidas 6 posições de medição no sentido de laminação em cada uma das 10 amostras não tratadas termicamente (Figura 4.24), totalizando 60 medições. A quantidade de medições por ponto (três) e o número de valores gravados de TOF e temperatura por medição (cinco) são as mesmas do experimento do item 4.3.3.

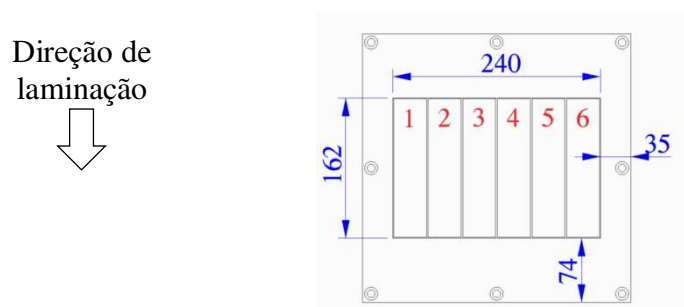


Figura 4.24. As 6 posições de medição com a onda L_{cr} em cada amostra. Dimensões em milímetros.

4.3.5 Avaliação da influência da tensão no tempo de percurso da onda L_{cr}

O sistema de aplicação de tensão nas amostras de aço API 5L X70 para verificação do efeito acustoelástico é o mesmo utilizado por Pereira Junior, (2011) e ele pode ser visto na Figura 4.25. Basicamente, o sistema é composto por uma bomba hidráulica manual (marca “Yellow Power”, pressão máxima de 300 bars) que aciona dois cilindros hidráulicos (marca “Yellow Power”, carga máxima de 20 toneladas) conectados ao dispositivo. Quando acionados, os cilindros fazem com que a barra conectada ao dispositivo por meio de pinos encaixados nos furos seja tracionada. Na bomba hidráulica, existe um manômetro digital que possibilita a leitura da pressão aplicada aos cilindros.

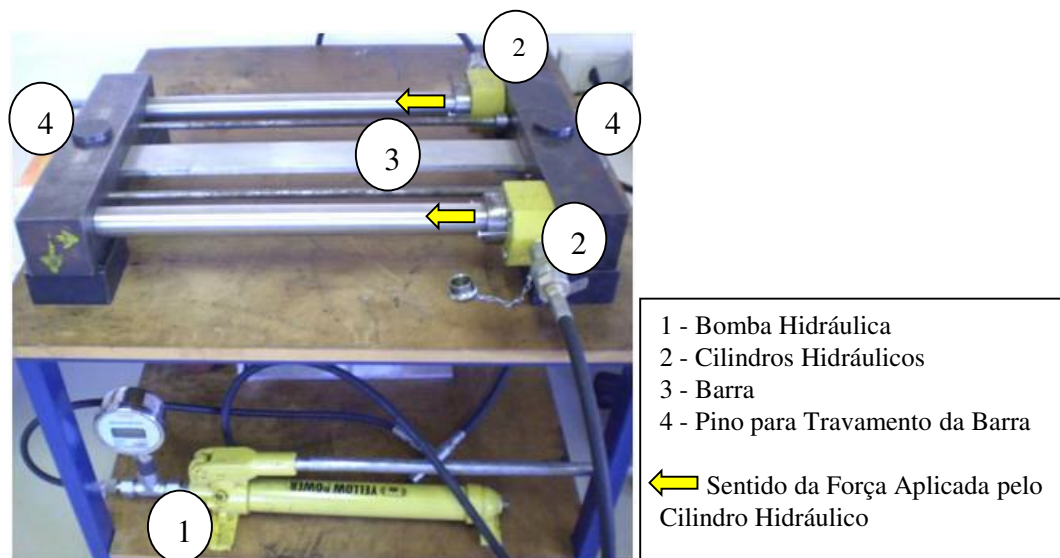


Figura 4.25. Dispositivo de aplicação de tensão na barra de aço API 5L X70 (PEREIRA JUNIOR, 2011).

A posição de medição com a sonda de L_{cr} é a mesma indicada na Figura 4.20. Os níveis de tensão aplicados pela bomba aos cilindros pneumáticos foram 50, 100 e 150 bars (5, 10 e 15 MPa). Também foi feita a medição sem aplicar pressão (0 bar). Três repetições do ensaio foram feitas, para cada uma foram feitas medidas, em sequência, a 0, 50, 100 e 150 bars. Novamente, cinco valores de TOF e temperatura foram gravados por medição.

4.3.6 Avaliação da influência da temperatura na intensidade do ruído nas imagens ultrassônicas

A peça não tratada termicamente nº 25 foi escolhida para as medições neste experimento (Figura 4.26). O mesmo procedimento descrito na seção 4.3.1 quanto ao controle de temperatura do ambiente foi utilizado, exceção feita ao sistema de medição; nesse caso foi empregado o sistema para medição com *arrays* de 64 canais. Similar ao que foi feito no ensaio com ondas L_{cr} , dois pesos mortos foram utilizados, cada um pesando aproximadamente 2,3 kg, para manter fixa

a sonda de *array* no corpo de prova (Figura 4.27). Também foi utilizado gel acoplante entre a sonda e a amostra.

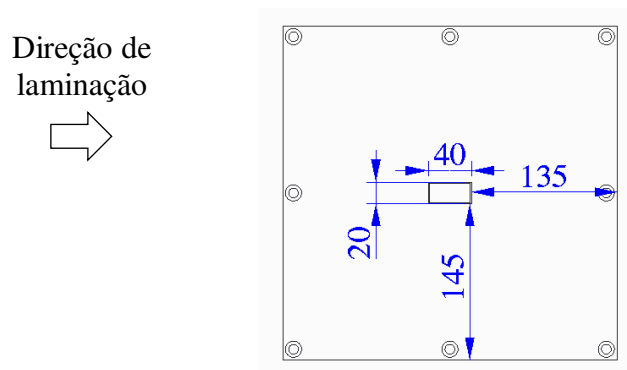


Figura 4.26. Posição de medição com a sonda de *array* para verificação da influência da temperatura.



Figura 4.27. Pesos de fixação da sonda na amostra.

Especificações sobre a aquisição das formas de onda pelo *array*, tais como frequência de amostragem, resolução, voltagem e largura do pulso, ganho e número de pontos são mostradas na Tabela 4.8.

Tabela 4.8. Especificações da aquisição para avaliação da influência da temperatura nas imagens ultrassônicas.

Frequência de amostragem (MHz):	50
Voltagem do pulso (V):	70
Largura do pulso (ns):	100
Número de pontos:	600
Resolução (bits):	8
Ganho (dB):	45,1

4.3.7 Avaliação da influência do tamanho de grão na intensidade do ruído nas imagens ultrassônicas

Para a verificação da influência do tamanho de grão na intensidade do ruído nas imagens ultrassônicas, foram feitos ensaios usando tanto o sistema de 64 canais quanto o de 128 canais. Utilizando o sistema de 64 canais, as posições de medição com o *array* foram definidas na peça conforme Figura 4.28. Para cada posição de medição por ondas L_{cr} em cada peça, foram definidas 8 posições de medição pelo *array*. Portanto, para esse ensaio com o sistema de 64 canais foram feitas 40 medições (8 por peça). Novamente, a temperatura foi monitorada em cada medição utilizando a aplicação vista na Figura 4.16. As configurações de aquisição são iguais às apresentadas na Tabela 4.8, exceção feita ao ganho que para esse ensaio foi aumentado para 52,1 dB.

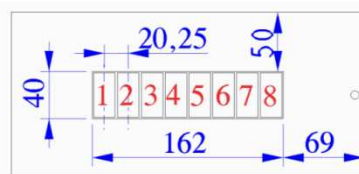


Figura 4.28. Posições de medição com o *array* nas amostras tratadas termicamente (sistema de 64 canais). Dimensões em milímetros.

Para as medições com o sistema de 128 canais no laboratório de ultrassom da Universidade de Bristol, as amostras tratadas termicamente foram cortadas na posição indicada na Figura 4.29 para facilitar o transporte das amostras. Duas novas posições de medição foram estabelecidas com as sondas de *array* definidas na Tabela 4.7. Como o tratamento térmico deixou a superfície do material com certas irregularidades que atrapalham o acoplamento entre sonda e amostra, optou-se por medir na superfície cortada. Nesse caso foram feitas três medições por posição, nas cinco amostras cortadas, para as três sondas, totalizando 90 medições ($3 \times 2 \times 5 \times 3$). As especificações de aquisição estão na Tabela 4.9. Esse experimento com as peças cortadas também foi repetido para sistema de 64 canais e a sonda de 5 MHz descrita na Figura 4.14 (especificações de gravação estão na Tabela 4.10).

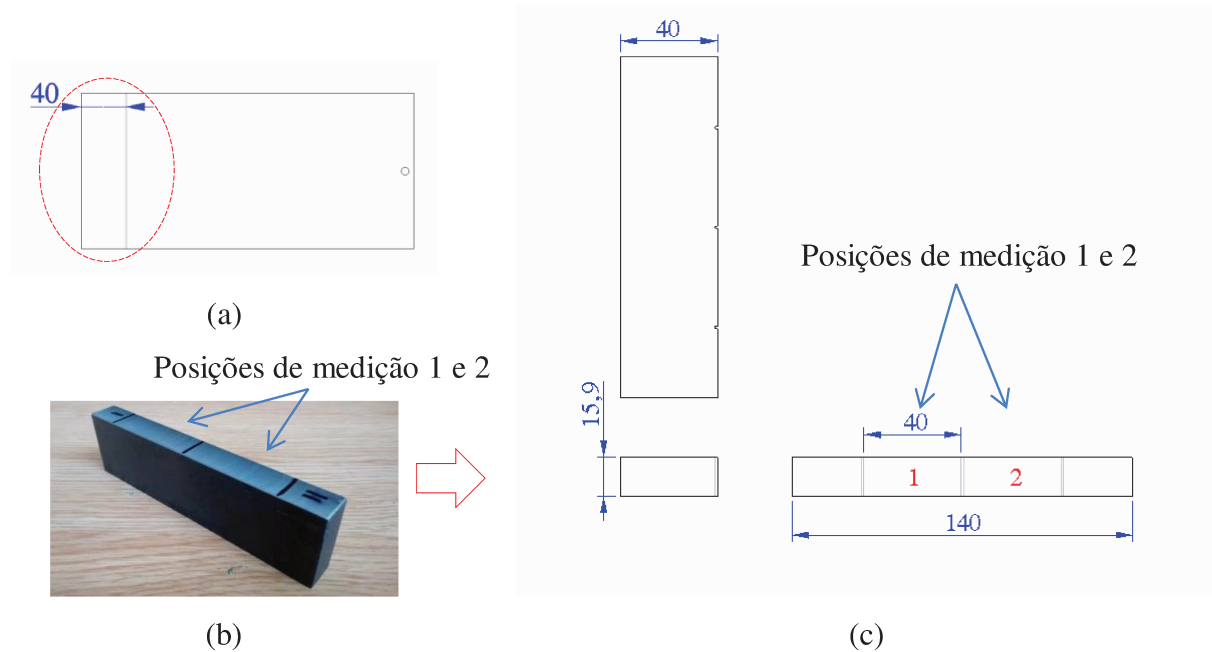


Figura 4.29. (a) Posição de corte das amostras tratadas termicamente, (b) foto de uma amostra cortada e (c) dimensões das amostras cortadas. Dimensões em milímetros.

Tabela 4.9. Especificações da aquisição para avaliação da influência do tamanho de grão nas imagens ultrassônicas para o sistema de 128 canais.

Frequência de amostragem (MHz):	50
Voltagem do pulso (V):	100
Largura do pulso (ns):	80
Número de pontos:	2200
Resolução (bits):	8
Ganho (dB):	50

Tabela 4.10. Especificações da aquisição para avaliação da influência do tamanho de grão nas imagens ultrassônicas para o sistema de 64 canais (amostra cortada).

Frequência de amostragem (MHz):	50
Voltagem do pulso (V):	70
Largura do pulso (ns):	100
Número de pontos:	900
Resolução (bits):	8
Ganho (dB):	54,1

4.3.8 Avaliação da influência da direção de laminação na intensidade do ruído nas imagens ultrassônicas

Para este experimento foi utilizado o sistema de 64 canais e as posições de medição em função da direção de laminação são mostradas na Figura 4.30. Novamente, as posições de medição com o *array* foram definidas para serem condizentes com a posição de medição da onda L_{cr} , e consequentemente com a região de propagação da onda. Neste ensaio foram feitas 320 medições, sendo 8 medições por posição, 4 posições por peça para as 10 peças. As especificações de gravação são as mesmas das apresentadas na Tabela 4.8.

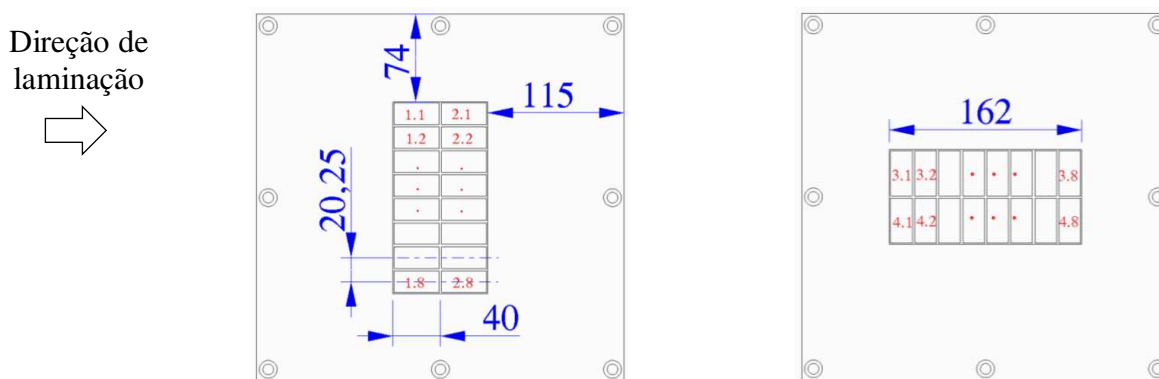


Figura 4.30. Posições de medição com *array* para estudo da influência da direção de laminação nas imagens ultrassônicas. Dimensões em milímetros.

4.3.9 Avaliação da influência da posição de medição na intensidade do ruído nas imagens ultrassônicas

Seguindo o que foi mostrado na seção anterior, as posições de medição com *array* para cada posição de medição por onda L_{cr} são mostradas na Figura 4.31 com o intuito de comparar os resultados de TOF e intensidade de ruído nas imagens. Novamente, foi utilizado o sistema de 64 canais. Como agora são 48 posições por peça, o total de medições sobe para 480. Contudo, 160 medições são condizentes com as do ensaio descrito na seção anterior. As especificações de gravação continuam as mesmas das apresentadas na Tabela 4.8.

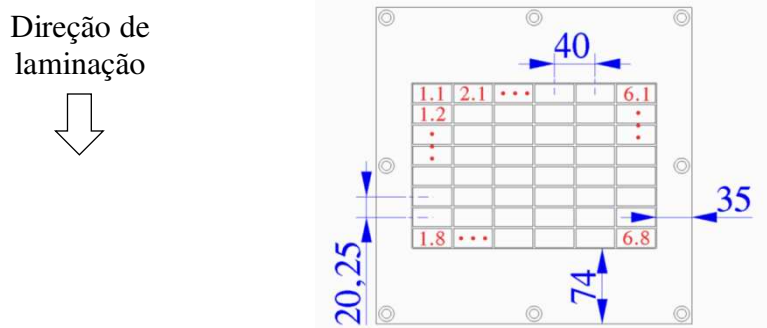


Figura 4.31. Posições de medição com *array* para estudo da influência da posição de medição nas imagens ultrassônicas. Dimensões em milímetros.

4.3.10 Avaliação da influência da tensão na intensidade do ruído nas imagens ultrassônicas

Por fim são feitas as medições com a sonda de *array* para verificar a influência da tensão na intensidade do ruído nas imagens de ultrassom. As posições de medição com o *array* são vistas na Figura 4.32. Este ensaio foi realizado de forma similar ao descrito na seção 4.3.5, utilizando os mesmos valores de pressão na bomba hidráulica e sendo repetido três vezes. As configurações de aquisição estão na Tabela 4.11.

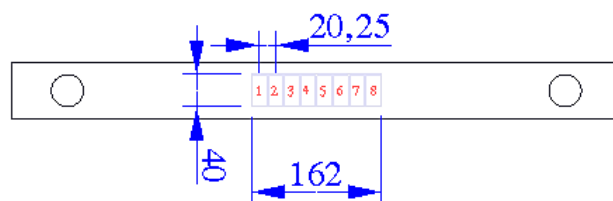


Figura 4.32. Posições de medição com *array* para estudo da influência da tensão nas imagens ultrassônicas. Dimensões em milímetros.

Tabela 4.11. Especificações da aquisição para avaliação da influência da tensão nas imagens ultrassônicas.

Frequência de amostragem (MHz):	50
Voltagem do pulso (V):	70
Largura do pulso (ns):	100
Número de pontos:	400
Resolução (bits):	8
Ganho (dB):	41,9

4.4 Processamento de imagens ultrassônicas

Nessa seção são apresentados os procedimentos utilizados referentes ao processamento de sinais gravados com o *array* ultrassônico para a formação de imagens pelo método de TFM. São definidas também as localizações geométricas das imagens nas amostras estudadas.

Para a obtenção das imagens de TFM neste trabalho, foi considerada a velocidade da onda longitudinal padrão no aço de 5.900 m/s (inserida na Equação 2.22). Antes da formação da imagem de TFM, o sinal é filtrado no domínio da frequência com uma janela gaussiana com banda de passagem de -40 dB, largura de 4 MHz e frequência de centro igual à da sonda de *array* utilizada em cada um dos experimentos. A escolha do filtro baseia-se na utilização de filtros análogos em outros trabalhos que também utilizam o TFM para geração de imagens, com em (BOWLER *et al.*, 2009). Vale destacar também que essa mesma função gaussiana é usada como espectro do sinal transmitido $S(\omega)$ na Equação 3.1, na modelagem dos sinais simulados e está representada na Figura 4.33.

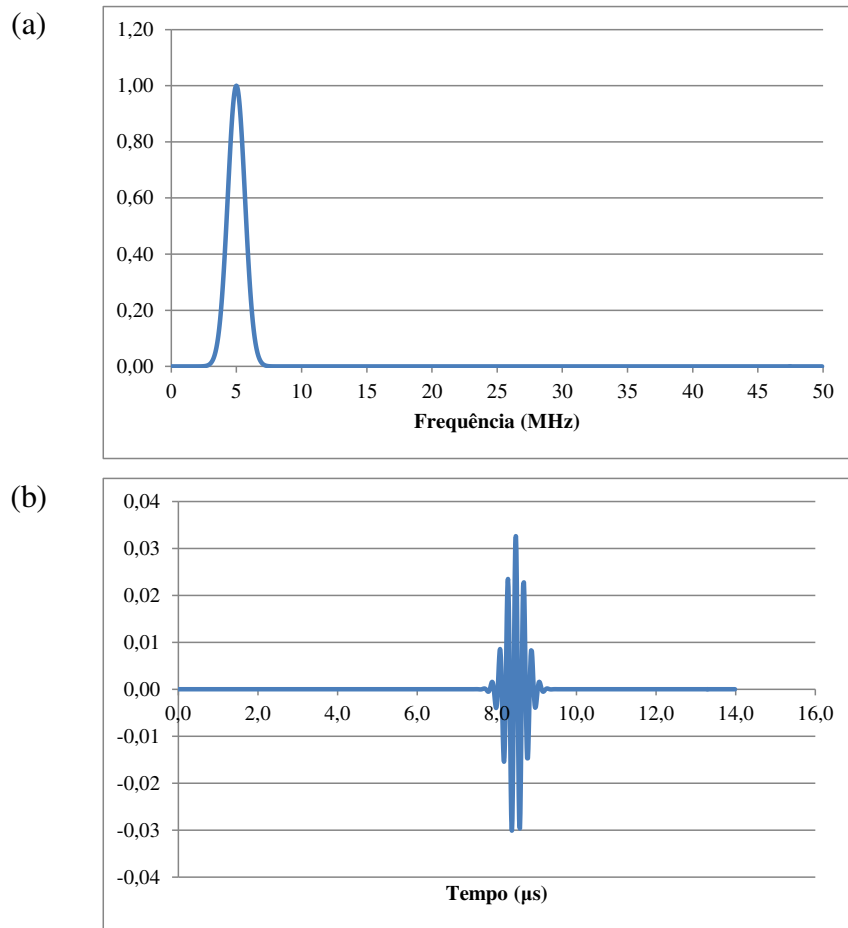


Figura 4.33. (a) Espectro da função gaussiana utilizada como filtro e (b) sinal no domínio do tempo. Frequência de centro de 5 MHz.

Na Figura 4.34, é possível ver três regiões delimitadas em um exemplo de imagem de TFM e no desenho para amostras de aço A36 com espessura de 15,9 mm. A região sobre o “fundo” da peça é usada para obtenção da intensidade máxima do sinal e as regiões na área central da peça são utilizadas para o cálculo do valor RMS da intensidade do ruído. As áreas foram escolhidas de modo que elas não sofressem influência da “zona morta” (*dead zone*) próxima da região de contato entre sonda e peça. Nessa região, os elementos de recepção recebem o sinal de emissão diretamente do elemento emissor e por esse motivo, no início das formas de onda gravadas são vistos componentes de alta amplitude. A influência da profundidade da imagem nos resultados também é observada. As regiões para as amostras cortadas e tratadas termicamente são definidas

na Figura 4.35 e para a amostra de aço API 5L X70 na Figura 4.36. Na Figura 4.35, as áreas das imagens de TFM são as mesmas usadas na simulação (Figura 3.12).

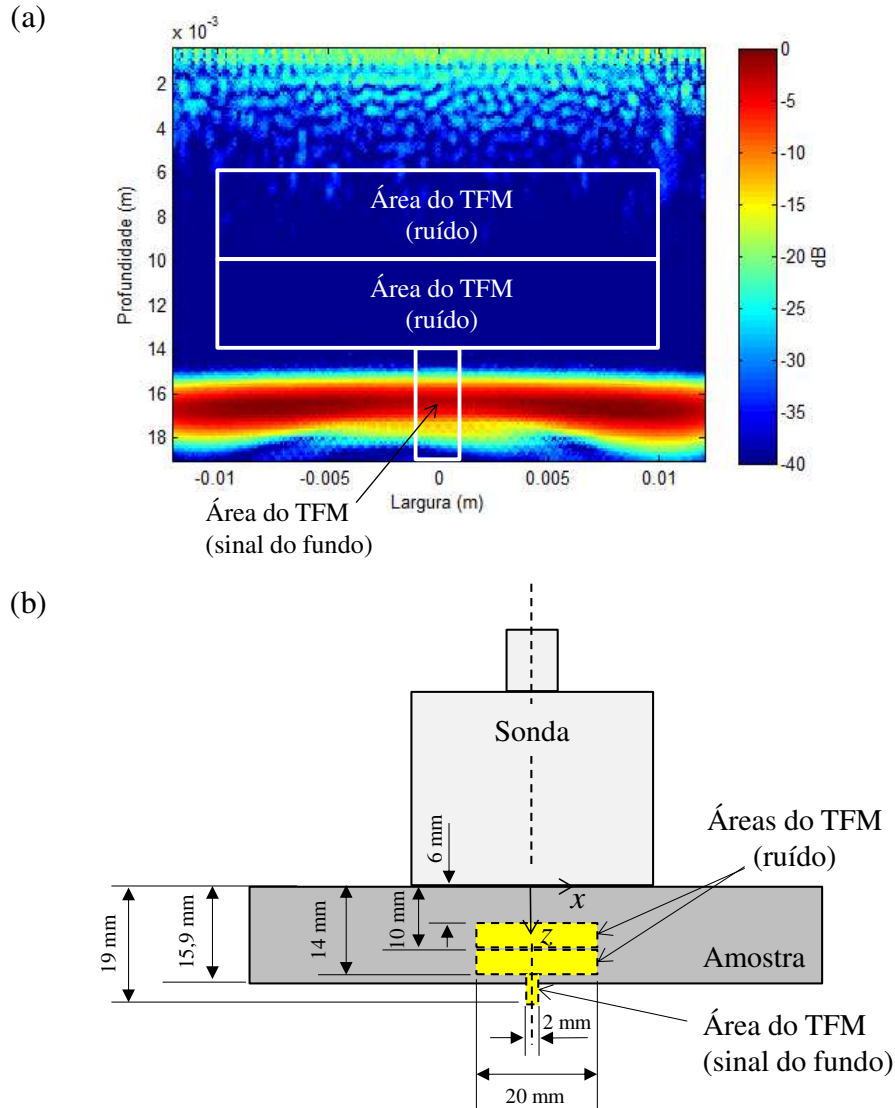


Figura 4.34. (a) Áreas delimitadas para obtenção do valor RMS do ruído de grão e intensidade do sinal de fundo em uma imagem de TFM e (b) na amostra de aço ASTM A36 (espessura de 15,9 mm).

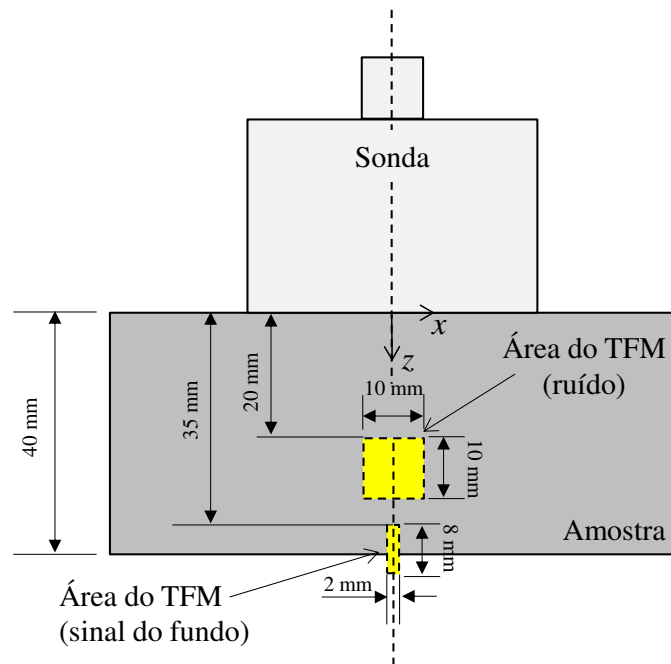


Figura 4.35. Áreas delimitadas na peça para obtenção do valor RMS do ruído de grão e intensidade do sinal de fundo para amostras cortadas e tratadas termicamente.

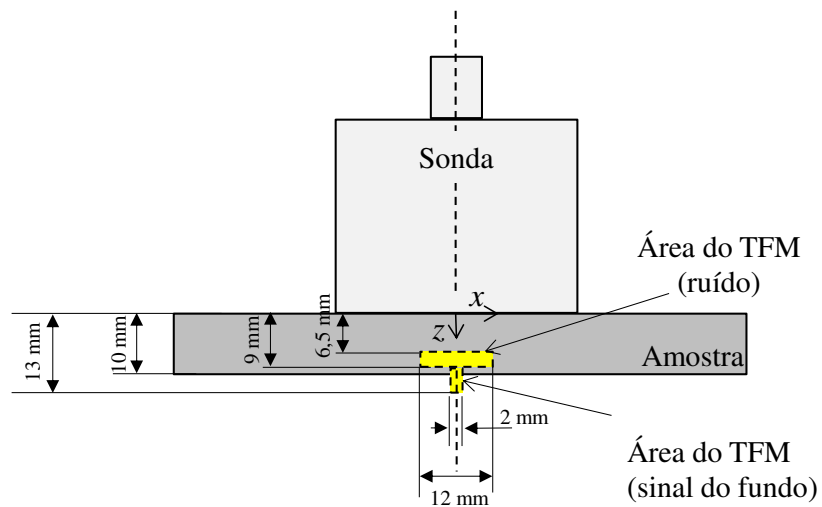


Figura 4.36. Áreas delimitadas na peça para obtenção do valor RMS do ruído de grão e intensidade do sinal de fundo para amostra de aço API 5L X70.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos das simulações e da parte experimental do trabalho são apresentados e discutidos neste capítulo em consonância com os objetivos da pesquisa. A influência da temperatura, tamanho de grão, direção de laminação, posição de medição e tensão no tempo de percurso da onda L_{cr} e na intensidade do ruído nas imagens ultrassônicas é medida e seus resultados são apresentados. Neste capítulo também, os resultados das simulações com a influência da variação do tamanho médio de grão no SNR das imagens de TFM são comparados com as medições reais.

5.1 Influência da temperatura no tempo de percurso da onda L_{cr}

O resultado do ensaio descrito no item 4.3.1 do Capítulo 4 onde é verificada a influência da temperatura no tempo de percurso (TOF) da onda L_{cr} no aço ASTM A36 é apresentado no gráfico da Figura 5.1.

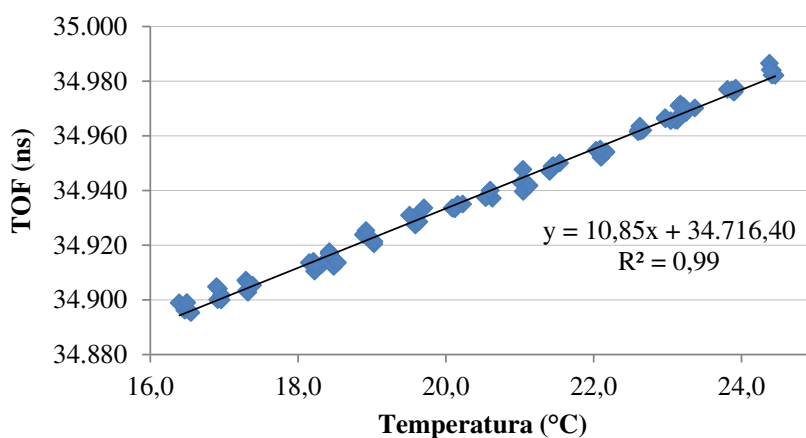


Figura 5.1. Influência da temperatura no TOF da onda L_{cr} na amostra nº 21 de aço ASTM A36.

A variação do TOF da onda L_{cr} em relação à temperatura se mostrou linear, como era esperado, e o coeficiente de variação encontrado foi de 10,85 ns/°C. Esse coeficiente é a inclinação da linha de tendência calculada pelo método dos mínimos quadrados mostrada no gráfico da Figura 5.1. Esse coeficiente é utilizado na Equação 5.1 para a correção dos valores de TOF lidos em função da temperatura medida. A temperatura escolhida para padronizar as medições foi 24 °C, por ser essa a temperatura média mantida no laboratório durante os experimentos. Apesar de a temperatura máxima obtida na avaliação da influência da temperatura estar próxima de 24 °C, trabalhos anteriores mostram que a taxa de variação do TOF em função da temperatura se mantém constante mesmo para temperaturas mais altas (SANTOS, 2007; BUENOS, 2014).

$$TOF_{corr} = TOF_{med} + c_T(24 - T) \quad (5.1)$$

Na Equação 5.1, TOF_{corr} é o TOF corrigido (em nano-segundos), TOF_{med} é o TOF medido (também em nano-segundos), c_T é o coeficiente encontrado de variação do TOF pela temperatura e T é a temperatura medida na amostra durante o experimento.

Na Figura 5.2 é apresentado o resultado obtido do mesmo experimento, mas agora para o aço API 5L X70 onde o coeficiente encontrado foi 9,70 ns/°C.

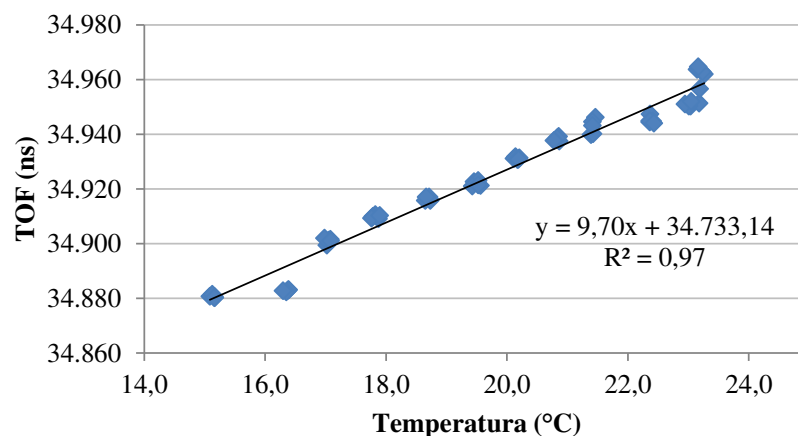


Figura 5.2. Influência da temperatura no TOF da onda L_{cr} na amostra de aço API 5L X70.

5.2 Influência da temperatura na intensidade do ruído nas imagens ultrassônicas

Os resultados apresentados neste item são referentes aos procedimentos experimentais descritos no item 4.3.6. As regiões de análise do ruído de grão e sinal de fundo usadas para o cálculo do SNR foram mostrados na Figura 4.34. A influência da temperatura no SNR na amostra número 25 de aço A36 pode ser visualizada na Figura 5.3, para a profundidade entre 6 e 10 mm e na Figura 5.4 para a profundidade entre 10 e 14 mm.

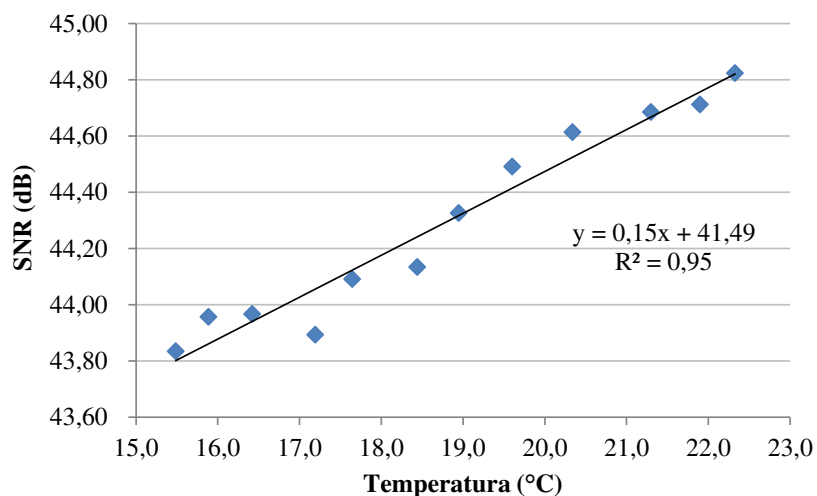


Figura 5.3. Variação do SNR da imagem de TFM em função da temperatura na amostra de aço ASTM A36 para profundidade entre 6 e 10 mm (amostra nº 25).

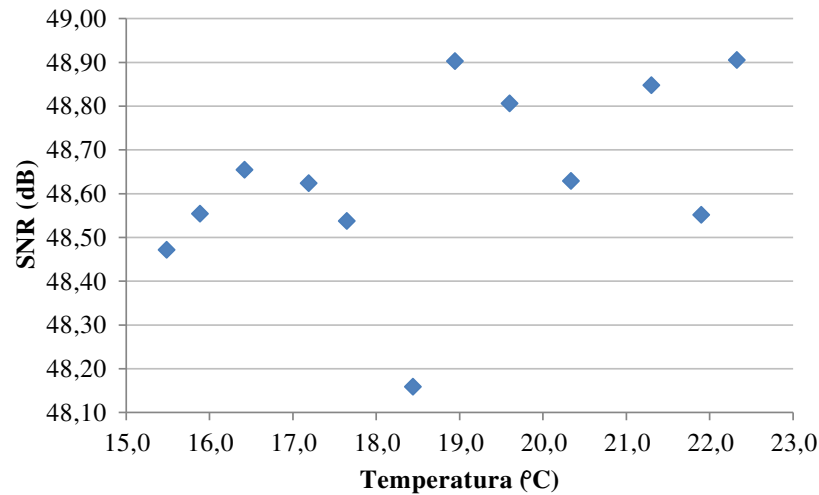


Figura 5.4. Variação do SNR da imagem de TFM em função da temperatura na amostra de aço ASTM A36 para profundidade entre 10 e 14 mm (amostra n° 25).

Ao analisar os gráficos das Figuras 5.3 e 5.4, verifica-se que para a imagem mais próxima da sonda a influência da temperatura no SNR é clara e apresenta uma relação praticamente linear. Esse comportamento pode ser notado pelo coeficiente de determinação da linha de tendência próximo de 1 ($R^2 = 0,95$). Entretanto, para o SNR obtido da imagem com profundidade entre 10 e 14 mm esse comportamento não é claro (Figura 5.4).

Uma das possíveis causas para o efeito da variação da temperatura no SNR seria o próprio efeito da temperatura na velocidade da onda ultrassônica. Para obtenção das imagens de TFM neste trabalho é utilizado o valor padrão da velocidade da onda longitudinal no aço de 5.900 m/s. Usando os próprios dados adquiridos para a formação da imagem, foi possível estimar a velocidade real na amostra em cada nível de temperatura medido e usá-la, ao invés do valor padrão. Para isso, foram utilizadas as formas de onda gravadas de cada um dos 64 elementos com eles atuando tanto como emissores quanto receptores (modo pulso eco). Um exemplo de forma de onda gravada no modo pulso eco pode ser vista na Figura 5.5. Como para essas formas de onda gravadas pode-se verificar o eco de fundo duas vezes, é possível estimar o tempo de percurso da onda no material e consequentemente sua velocidade. Os sinais gravados foram filtrados com a janela gaussiana descrita no item 4.4 e as amplitudes máximas dos dois ecos de fundo foram estabelecidas como pontos de medição na forma de onda para obtenção do tempo de percurso. O

tempo obtido para cada um dos 64 elementos é usado para calcular o tempo médio e a velocidade é calculada considerando a espessura da amostra (15,9 mm). O efeito da dilatação térmica também foi levado em consideração com a correção do valor da distância percorrida pela onda. O coeficiente de dilatação utilizado foi de $1,2 \times 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ (HIBBELER, 2004). As velocidades estimadas em função das temperaturas podem ser vistas na Figura 5.6. Nas Figuras 5.7 e 5.8, são mostrados os novos SNRs calculados com os valores medidos de velocidade.

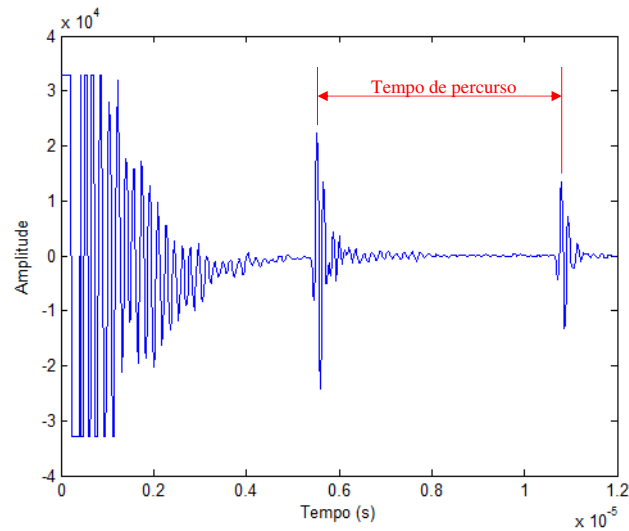


Figura 5.5. Exemplo de forma de onda adquirida no modo pulso eco com dois ecos de fundo da peça para obtenção do tempo de percurso.

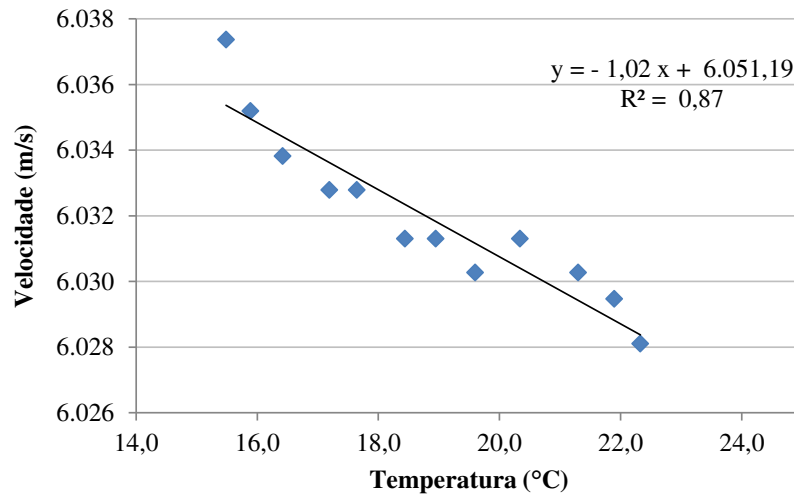


Figura 5.6. Variação da velocidade de onda em função da temperatura para medições com elementos do *array* no modo pulso eco.

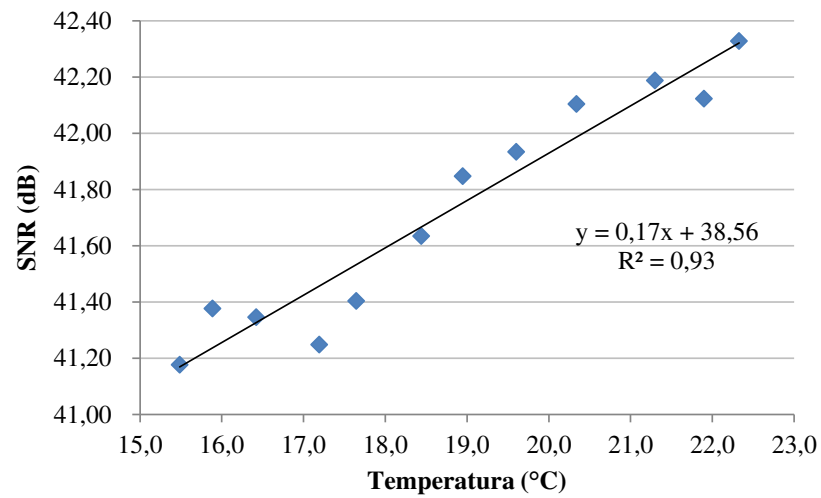


Figura 5.7. Variação do SNR da imagem de TFM calculada com a velocidade corrigida em função da temperatura para a profundidade entre 6 e 10 mm.

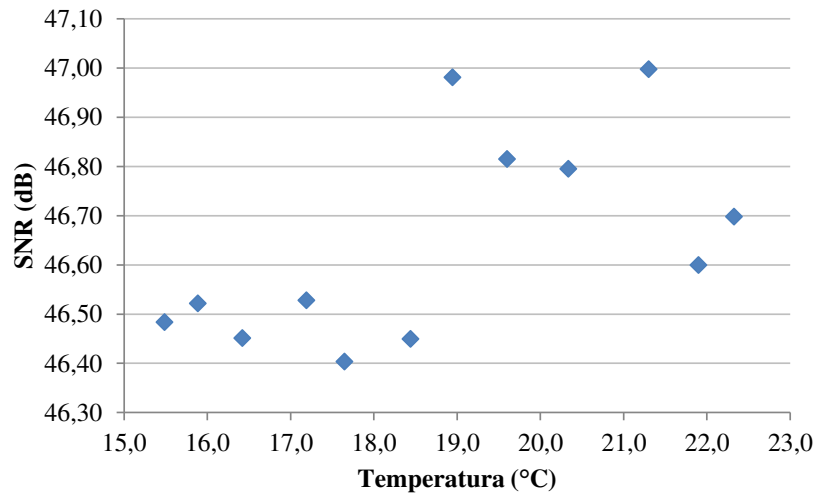


Figura 5.8. Variação do SNR da imagem de TFM calculada com a velocidade corrigida em função da temperatura para a profundidade entre 10 e 14 mm.

Analisando primeiramente o gráfico da Figura 5.6 verifica-se, como esperado, a redução da velocidade de onda em função do aumento de temperatura. Nota-se também uma diferença entre os valores de velocidade estimados, entre 6.038 e 6.028 m/s, e o valor padrão de 5.900 m/s usado previamente para obtenção das imagens de TFM. Essa diferença, de aproximadamente 2% em relação ao valor padrão deve-se provavelmente a diferenças de microestruturas e imprecisões na medição de espessura da amostra e na própria estimativa do tempo de percurso. Entretanto, se usado o valor padrão para obtenção de todas as imagens, a comparação entre os SNRs continua válida.

Utilizando os valores de velocidade obtidos em cada temperatura em que ocorreram as medições, novas imagens de TFM foram geradas e os SNRs calculados (Figuras 5.7 e 5.8). Os resultados mostram que as tendências nos dois gráficos não se alteram significativamente se comparados com os dos SNRs obtidos com a temperatura padrão (Figuras 5.3 e 5.4). Para a profundidade entre 6 e 10 mm o SNR apresenta a mesma tendência de crescimento aproximadamente linear com a temperatura e para a profundidade entre 10 e 14 mm, essa tendência é mais difícil de ser percebida. Na Tabela 5.1, é possível comparar os valores médios e desvios padrão de todos os SNRs, tanto para o uso da velocidade padrão de 5.900 m/s quanto para o uso da velocidade variável com a temperatura. Nota-se que o desvio padrão é menor para o

SNR obtido para a maior profundidade na peça (0,21 dB para os dois casos, para temperatura variando entre 15 e 22 °C, aproximadamente), indicando que quanto maior a profundidade da imagem de TFM usada para o cálculo do SNR, menor é influência da temperatura.

Tabela 5.1. Média e desvios padrão dos SNRs, em dB, para o ensaio de temperatura (amostra n° 25).

Velocidade usada:	5.900 m/s		Variável	
	$z = 6$ a 10 mm	$z = 10$ a 14 mm	$z = 6$ a 10 mm	$z = 10$ a 14 mm
Profundidade:				
Média:	44,29	48,64	41,73	46,64
Desvio padrão:	0,36	0,21	0,41	0,21

Para checar se os resultados se repetiam, o experimento para verificar a influência da temperatura no SNR das imagens de TFM foi repetido, dessa vez na amostra n° 17. Contudo, ao invés de iniciar as medições com a temperatura mais baixa, fez-se ao contrário. A peça foi colocada ao sol por cerca de 30 minutos antes das medições e a partir do início das medições o ar condicionado do laboratório foi ligado. Sucessivas medições foram realizadas à medida que a temperatura da amostra caía. Os resultados para as duas profundidades da imagem, definidas na Figura 4.34, estão nas Figuras 5.9 e 5.10.

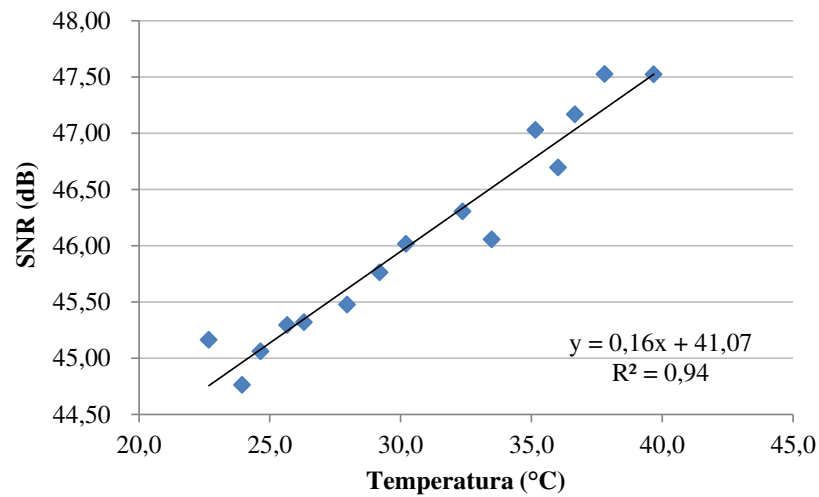


Figura 5.9. Variação do SNR da imagem de TFM em função da temperatura na amostra de aço ASTM A36 para profundidade entre 6 e 10 mm (amostra nº 17).

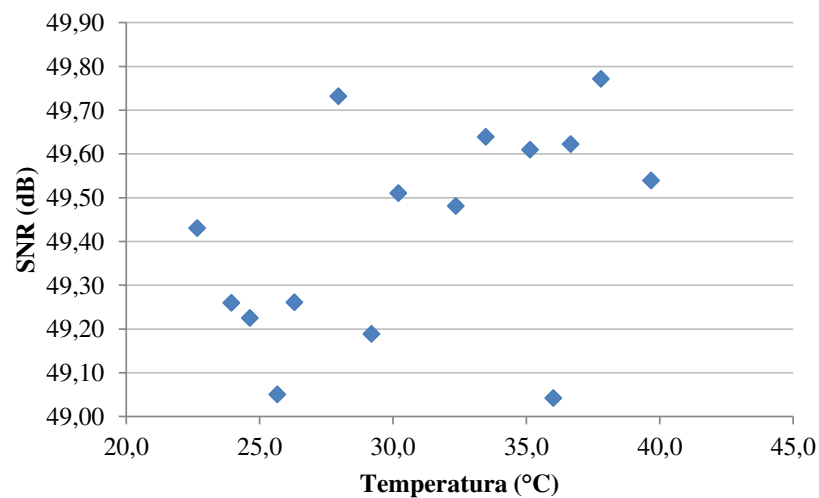


Figura 5.10. Variação do SNR da imagem de TFM em função da temperatura na amostra de aço ASTM A36 para profundidade entre 10 e 14 mm (amostra nº 17).

Pelas Figuras 5.9 e 5.10, nota-se que o comportamento do SNR em função da temperatura é semelhante ao verificado para a amostra 25 (Figuras 5.3 e 5.4). Para a profundidade de imagem entre 6 e 10 mm o SNR cresce 0,16 dB/°C para a amostra 17 contra 0,15 dB/°C para a amostra

25. No caso da profundidade entre 10 e 14 mm, torna-se mais difícil estabelecer essa mesma relação linear, assim como ocorreu no experimento descrito anteriormente.

Para verificar se essas variações em dB do SNR são significativas, foram feitas 7 medições na amostra 25 no mesmo ponto usado para verificar a influência da temperatura, mas nesse caso a temperatura foi mantida constante (23,7 °C, em média, com desvio padrão de 0,1 °C). Os resultados, em dB, de cada medição do SNR são apresentados nas Figuras 5.11 e 5.12.

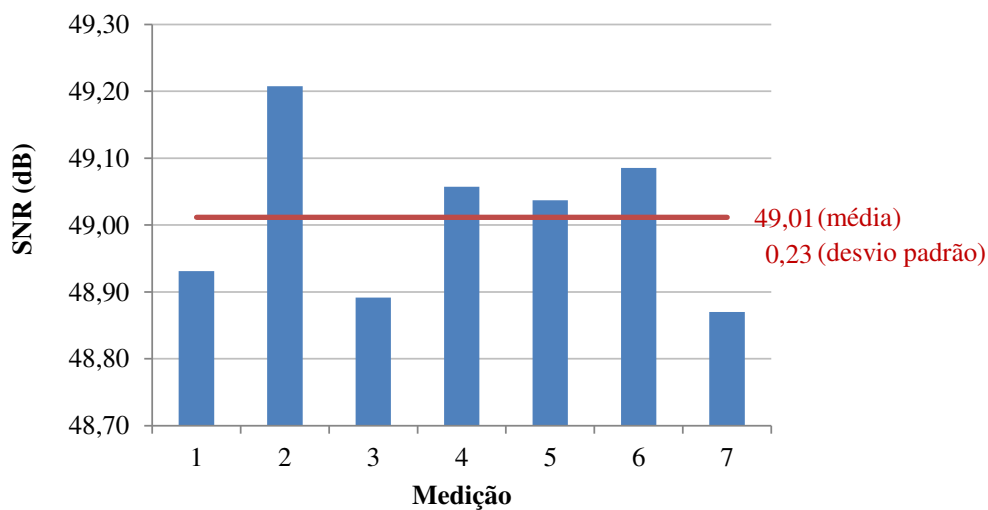


Figura 5.11. Variação do SNR em função da medição para uma mesma posição e temperatura (amostra n° 25 e $z = 6:10$ mm).

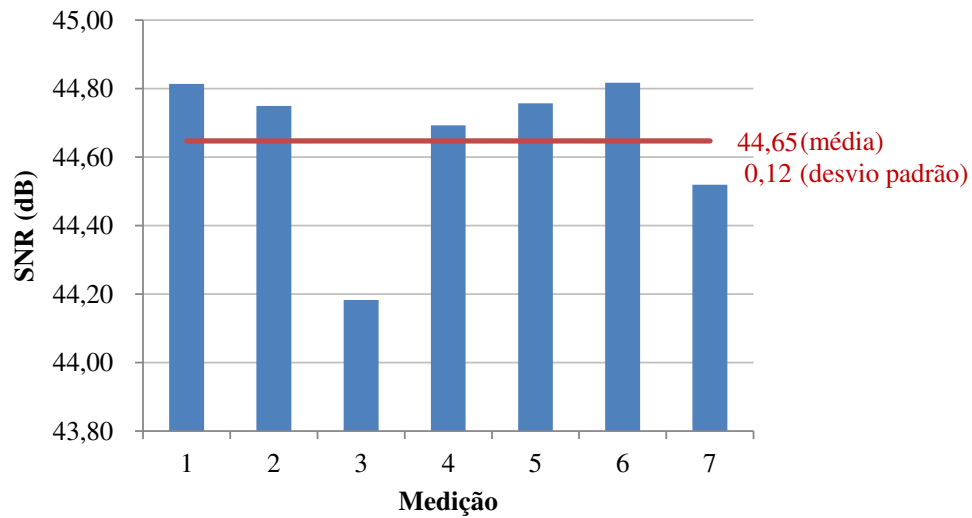


Figura 5.12. Variação do SNR em função da medição para uma mesma posição e temperatura (amostra n° 25 e $z = 10:14$ mm).

Os desvios padrão obtidos e mostrados nos gráficos das Figuras 5.11 e 5.12 correspondem, aproximadamente, a 60% dos valores encontrados quando a temperatura é variada (Tabela 5.1). Esses valores de desvios padrão são significativos levando-se em conta que no primeiro ensaio foram utilizados 15 valores de temperatura diferentes com variação entre 15,5 e 22,3 °C e no segundo não ocorreu variação da temperatura. Pela comparação, é razoável concluir que boa parte variação verificada no SNR das medições se deve à própria incerteza da medição e não apenas à possíveis variações de temperatura.

Nas medições para esse trabalho, tomou-se o cuidado para que a temperatura das amostras não sofresse grandes variações, sendo monitorada para que ficasse em torno de 24 °C. Isso foi possível através do sistema de medição com termopar e o controle de ar condicionado do laboratório onde ocorreram as medições. Portanto, decidiu-se que o SNR só seria corrigido para a profundidade entre 6 e 10 mm com o valor de 0,155 dB/°C obtido pela média da inclinação das linhas de tendência dos gráficos das Figuras 5.3 e 5.9. A temperatura padrão escolhida foi também 24 °C, assim como para a correção do TOF da L_{cr} (Equação 5.1). Para imagens obtidas em maiores profundidades nas amostras de aço A36, optou-se em não corrigir o valor do SNR por não ter sido possível encontrar uma relação linear plausível entre temperatura e SNR e pelo fato da variação ser relativamente pequena.

O resultado para o ensaio para a verificação da influência da temperatura no SNR para a amostra do aço API 5L X70 é mostrado no gráfico da Figura 5.13. Nesse caso, foi considerada a área da imagem de TFM mostrada na Figura 4.36.

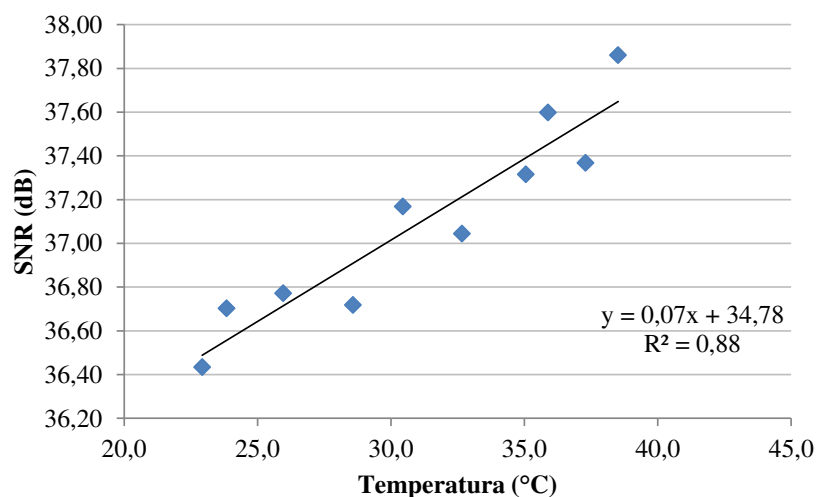


Figura 5.13. Variação do SNR da imagem de TFM em função da temperatura na amostra de aço API 5L X70.

Pela linha de tendência do gráfico da Figura 5.13 é possível ver que o SNR aumenta a uma taxa de 0,07 dB/°C. Esse valor será usado para corrigir os valores de SNR medidos para a temperatura padrão de 24 °C.

5.3 Influência do tamanho de grão no tempo de percurso da onda L_{cr} e na intensidade do ruído nas imagens ultrassônicas

A variação do tempo de percurso da onda L_{cr} em função dos tamanhos médios de grão das cinco amostras de aço A36 é mostrada no gráfico da Figura 5.14.

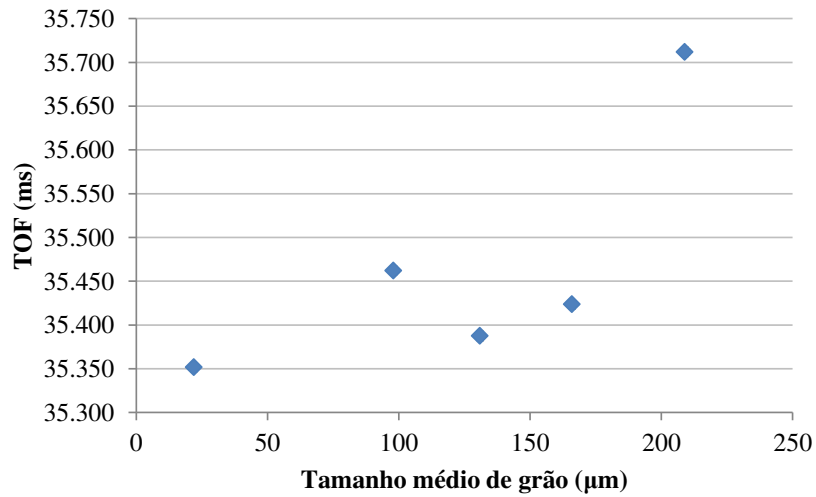


Figura 5.14. Gráfico para a variação do TOF da onda L_{cr} em função do tamanho médio de grão.

O desvio padrão para as medições do TOF em cada amostra variou entre 1 e 3 ns e por isso não é possível visualizar a barra de erro associada a cada valor médio no gráfico da Figura 5.14. Os resultados apresentados na Figura 5.14 mostram que o tempo de percurso da onda L_{cr} tende a ser maior para amostras com tamanhos médios de grão maiores. Contudo, os valores obtidos para a amostra tratada a 1.000 °C e com tamanho médio de grão de 98 μm destoa do restante das amostras. Pode-se especular que não uniformidades no material não relacionadas diretamente ao tamanho de grão possam estar influenciando no resultado de tempo de percurso.

A relação entre o tamanho de grão médio e o SNR médio das oito posições de medição (Figura 4.28) com a sonda de *array* de 5 MHz para o sistema de 64 canais pode ser vista nas Figuras 5.15 e 5.16. No Apêndice B são apresentados os valores de SNR obtidos para cada posição nas amostras. Na Figura 5.15, o SNR é calculado para a imagem de TFM com profundidade entre 6 e 10 mm e na Figura 5.16 para z variando entre 10 e 14 mm.

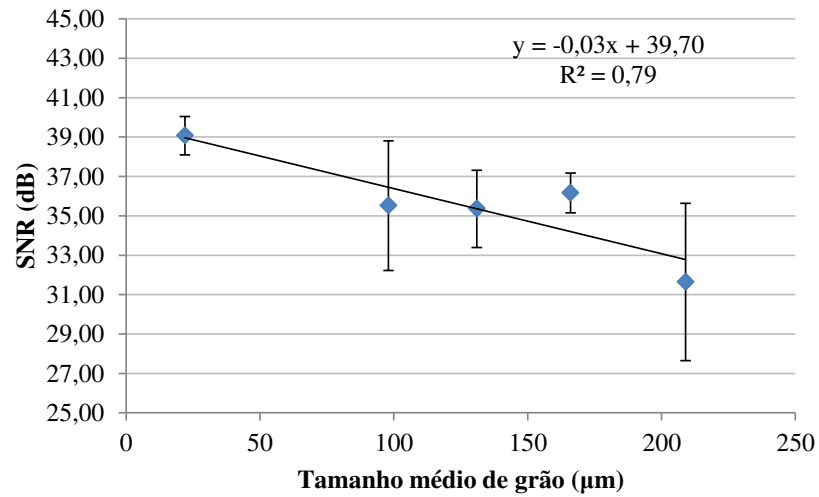


Figura 5.15. Relação entre o SNR médio e o tamanho médio de grão para o sistema de medição de 64 canais e $z = 6:10$ mm.

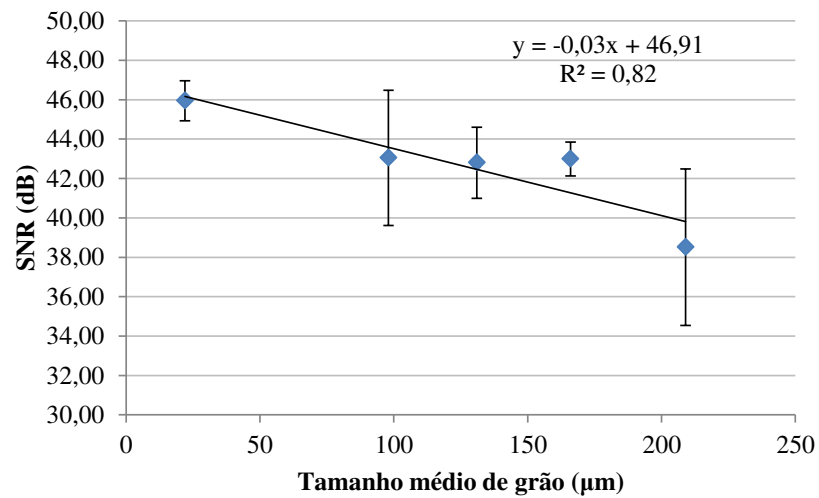


Figura 5.16. Relação entre o SNR médio e o tamanho médio de grão para o sistema de medição de 64 canais e $z = 10:14$ mm.

Nota-se nos gráficos das Figuras 5.15 e 5.16 que o SNR médio tende a cair conforme o tamanho de grão das amostras aumenta. Conforme a Equação 3.4, a amplitude de espalhamento tende a aumentar conforme maior é o espalhador. Consequentemente, a intensidade do ruído de grão aumenta fazendo com que o SNR caia. As inclinações das linhas de tendência obtidas

apresentaram o mesmo coeficiente de inclinação ($-0,03 \text{ dB}/\mu\text{m}$) para as duas profundidades de imagem analisadas. Nota-se também pelas barras de erros, que os resultados apresentam grande dispersão, ou seja, os valores de SNR apresentam grande variação entre as oito posições de medição para uma mesma amostra. Uma das causas para o valor elevado da dispersão reside no fato que as superfícies das peças tratadas termicamente acabam apresentando irregularidades que atrapalham no acoplamento do *array* com a peça, conforme pode ser notado na Figura 4.2(b). É importante salientar também que o valor do SNR médio pouco varia para as amostras com tamanho de grão de 98, 131 e 166 μm .

Se combinados os dados de SNR médio e TOF da onda L_{cr} apresentados nos gráficos das Figuras 5.14 à 5.16, é possível confrontar os dois parâmetros conforme pode ser visto nas Figuras 5.17 e 5.18. Nos gráficos, é possível notar uma relação aproximadamente linear entre o SNR médio e TOF, mas que não é conclusiva, devido ao fato de que o SNR médio pouco varia para as amostras com tamanho de grão intermediário.

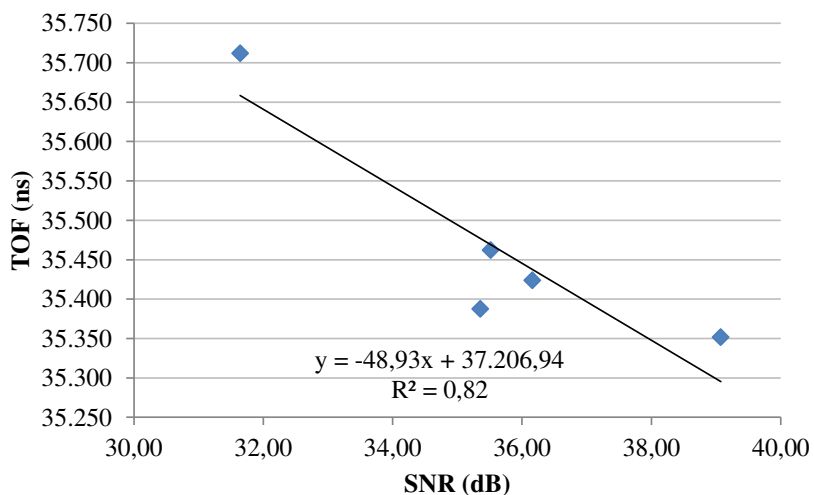


Figura 5.17. Relação do TOF e SNR médio para amostras de aço ASTM A36 tratadas termicamente ($z = 6:10 \text{ mm}$).

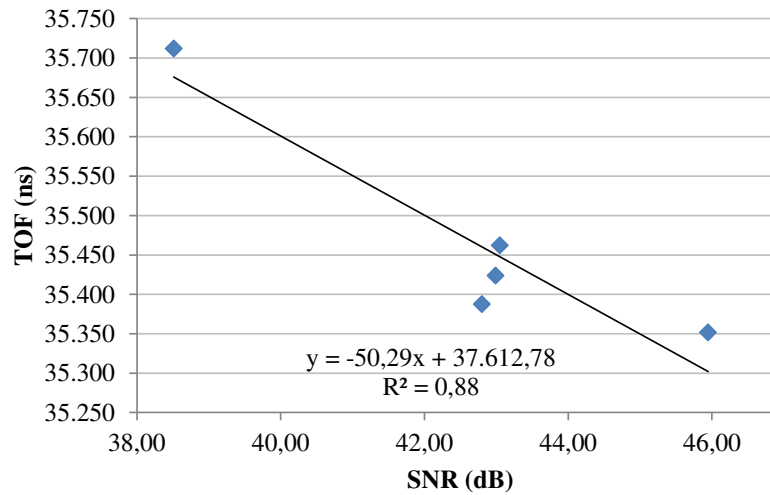


Figura 5.18. Relação do TOF e SNR médio para amostras de aço ASTM A36 tratadas termicamente ($z = 10:14$ mm).

Na Tabela 5.2, são apresentadas as quantidades de grãos usadas para cada distribuição de grão gerada conforme modelo descrito no Capítulo 3 bem como o tempo de simulação aproximado para obtenção de todas as formas de onda necessárias para a aplicação do FMC e TFM. Para cada tamanho médio de grão, três distribuições diferentes de grão foram geradas conforme o procedimento descrito na seção 3.1. A simulação dos sinais para o cálculo do SNR foi feita com base na Equação 3.7 para o ruído de grão e na Equação 3.8 para o sinal de fundo da peça. Os sinais foram gerados com 700 pontos para o ruído de grão e 1.000 pontos para o sinal de fundo da peça. A frequência de amostragem considerada na simulação foi de 50 MHz, a mesma utilizada para a aquisição dos sinais reais para os sistemas de 64 e 128 canais. Não foi realizada a simulação para a amostra de tamanho de 22 μm , pois o tempo de simulação seria bastante elevado, considerado o número de grãos necessários para preencher a região de interesse. Um programa foi desenvolvido em MATLAB[®] para realizar os cálculos e foi rodado em um laptop marca Dell[®], modelo “Latitude” E6530, processador Intel Core[®] i5-3340M CPU 2.70 GHz.

Tabela 5.2. Número de grãos de cada modelo e tempo de simulação.

Tamanho de grão (μm)	Modelo	Número de grãos	Tempo de simulação (min)			
			Frequência (MHz)/n° de elementos			
			2,5/64	5,0/64	5,0/128	10/128
98	1	17.711	59	74	295	398
	2	17.761	59	74	296	400
	3	17.808	59	74	297	401
131	1	10.182	34	42	170	229
	2	10.236	34	43	171	230
	3	10.211	34	43	170	230
166	1	6.493	22	27	108	146
	2	6.442	21	27	107	145
	3	6.515	22	27	109	147
209	1	3.893	13	16	65	88
	2	3.864	13	16	64	87
	3	3.873	13	16	65	87

Na Figura 5.19 é possível ver uma série de imagens de TFM obtidas pela simulação e experimentalmente para a frequência de 2,5 MHz. Os dados experimentais foram obtidos de medições com o sistema de 128 canais da Universidade de Bristol, seguindo o procedimento descrito na seção 4.3.7. Nas imagens, tanto experimentais quanto simuladas, percebe-se pela a intensidade das “manchas”, que o nível do ruído de grão aumenta à medida que o grão aumenta. Na Figura 5.20 é apresentado um comparativo entre os SNRs obtidos experimentalmente e por meio da simulação para as frequências de 2,5, 5 e 10 MHz.

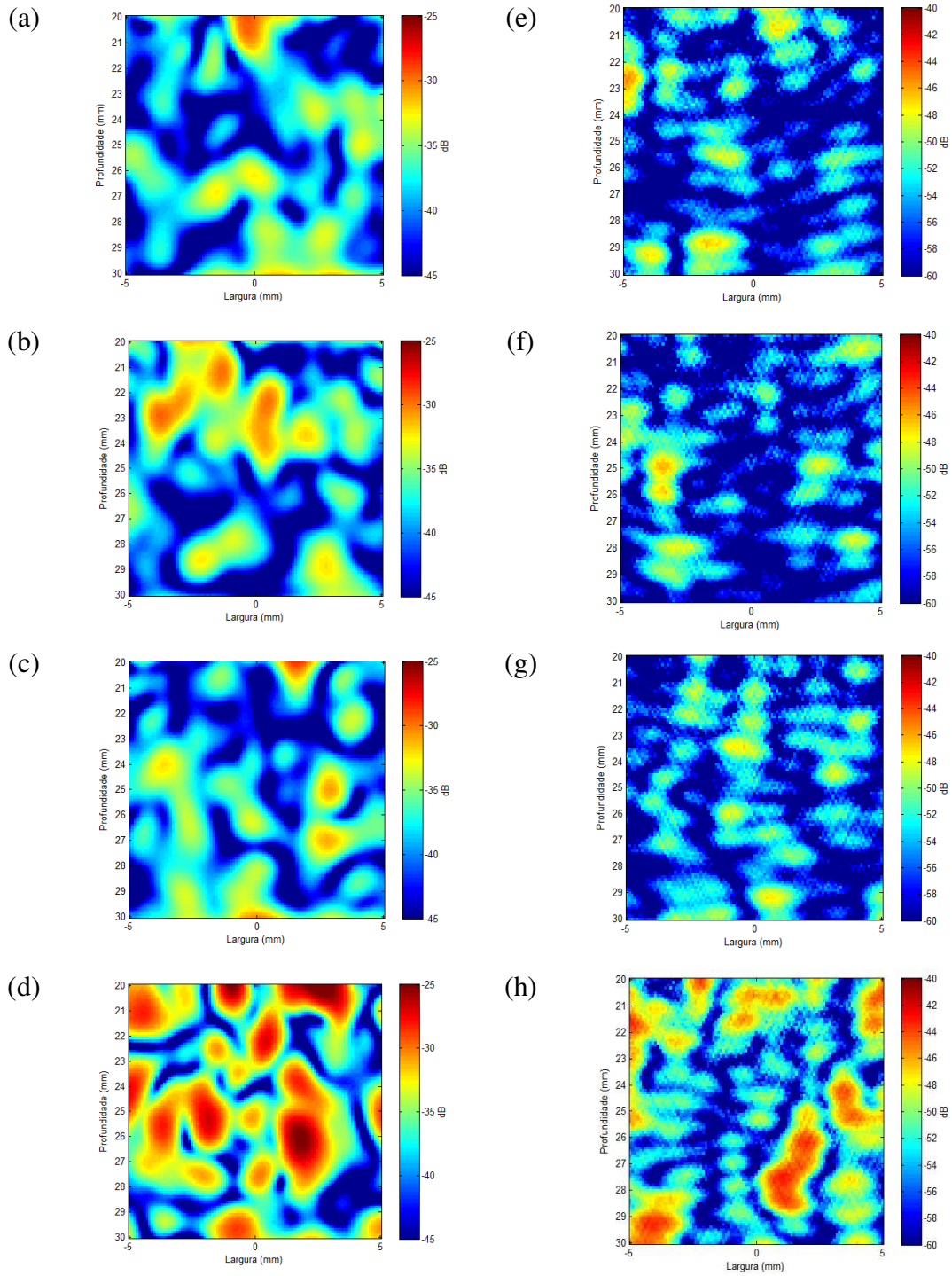
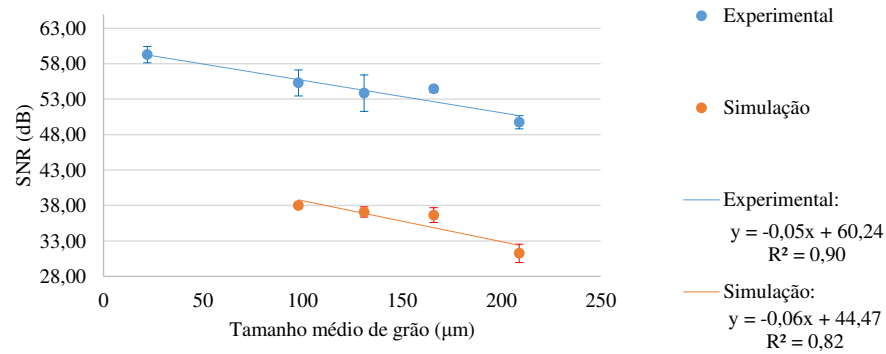
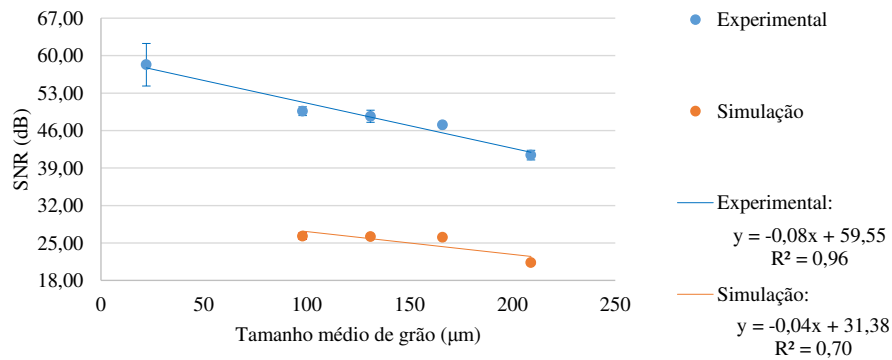


Figura 5.19. Exemplos de imagens de TFM (2,5 MHz). Tamanhos médios de grão de (a) 98 μm , (b) 131 μm , (c) 166 μm , (d) 209 μm , (e) 98 μm , (f) 131 μm , (g) 166 μm , (h) 209 μm . As imagens de (a) até (d) foram obtidas pela simulação e de (e) até (h) foram obtidas experimentalmente.

(a)



(b)



(c)

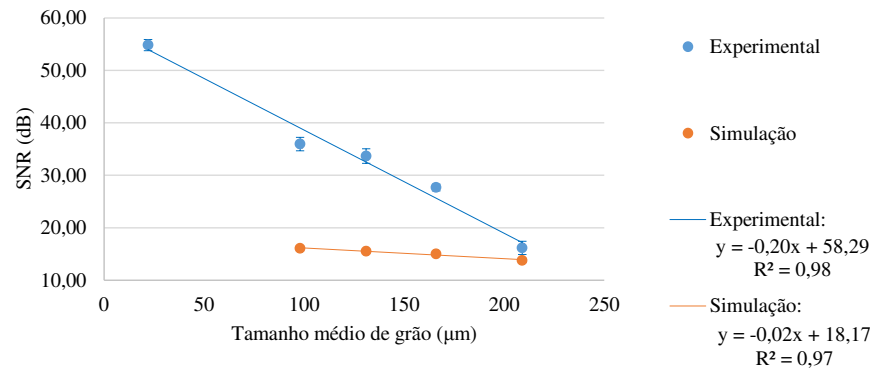


Figura 5.20. Variação do SNR em função do tamanho de grão para dados experimentais (sistema de 128 canais) e simulados para as frequências de (a) 2,5, (b) 5 e (c) 10 MHz.

Nos gráficos da Figura 5.20 é possível notar que para um dado tamanho de grão o SNR tende a cair com a frequência e para uma dada frequência o SNR diminui com o diâmetro médio do grão. Neste experimento com o sistema de 128 canais, as medições foram feitas em amostras

com melhor acabamento superficial (Figura 4.29), e por esse motivo a dispersão dos resultados foi reduzida. Analisando primeiramente o gráfico para a frequência de 2,5 MHz, os coeficientes angulares das linhas de tendência obtidas a partir dos valores de SNR das imagens de TFM simuladas e experimentais ficaram próximos (-0,06 e -0,05 dB/μm, respectivamente). Entretanto, existe uma diferença média de aproximadamente de 17,5 dB entre os valores obtidos experimentalmente e por simulação para os SNRs. Não está clara a razão desta diferença aproximadamente constante encontrada nos valores de SNR entre experimento e simulação. Pode-se especular sobre diferenças nos valores das constantes elásticas usados na simulação (Tabela 3.1) com valores reais das amostras. Variações na composição química das amostras também poderiam ser responsáveis por essa diferença. Para a frequência de 5 MHz essa diferença entre dados experimentais e simulados sobe para 22 dB e a inclinação das linhas de tendência para os dados experimentais passa para -0,08 dB/μm, contra -0,04 dB/μm do SNR das imagens simuladas. Para a sonda de 10 MHz verifica-se grande discrepância entre as inclinações das linhas de tendência, com -0,02 dB/μm para os dados simulados e -0,20 dB/μm para os dados experimentais, um valor dez vezes maior em termos absolutos. Nesse caso, para maiores frequências, o fenômeno de espalhamento múltiplo é provável que seja mais acentuado, significando que o espalhamento deixa de ser considerado fraco e a aproximação de Born usada no desenvolvimento do modelo usado nas simulações não é mais válida.

Ainda nos gráficos da Figura 5.20, considerando uma relação linear entre SNR e tamanho de grão, a taxa de variação do SNR para os dados experimentais é maior no experimento com a sonda de 10 MHz, sendo -0,20 dB/μm contra -0,08 e -0,05 dB/μm para 5 e 2,5 MHz, respectivamente. O R^2 para o experimento com a sonda de 10 MHz também ficou mais próximo de 1, se comparado com os outros dois (0,98 contra 0,96 e 0,90), indicando que a relação entre SNR e tamanho de grão médio pode ser aproximada melhor por uma reta.

No Apêndice C são apresentados resultados complementares onde foi verificado o efeito da utilização de diferentes distribuições de grãos para um mesmo diâmetro médio nas imagens ultrassônicas bem como o efeito da variação da fração de grãos na região de interesse.

As amostras cortadas também foram medidas com o sistema de 64 canais e a comparação da variação do SNR em função do tamanho de grão obtida pelos dois sistemas é apresentada na Figura 5.21 para a frequência de 5 MHz. Para o sistema de 64 canais foi usada a sonda de 64

elementos detalhada na Figura 4.14 e para o sistema de 128 canais foi usada de 5 MHz e 128 elementos descrita na Tabela 4.7. A diferença máxima observada entre os SNRs médios foi de 2,11 dB (22 μm). Já os gráficos relacionando o TOF e SNR médio para as três frequências usadas para o sistema de 128 canais são mostrados na Figura 5.22.

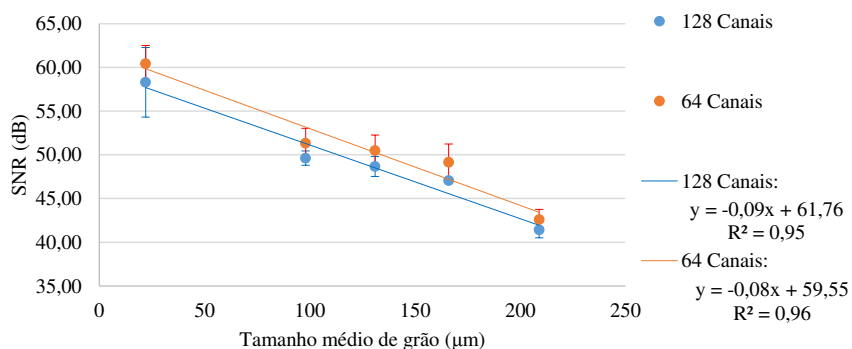
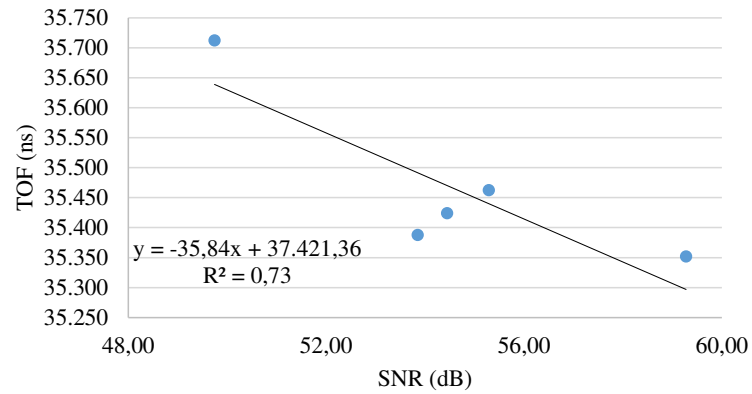
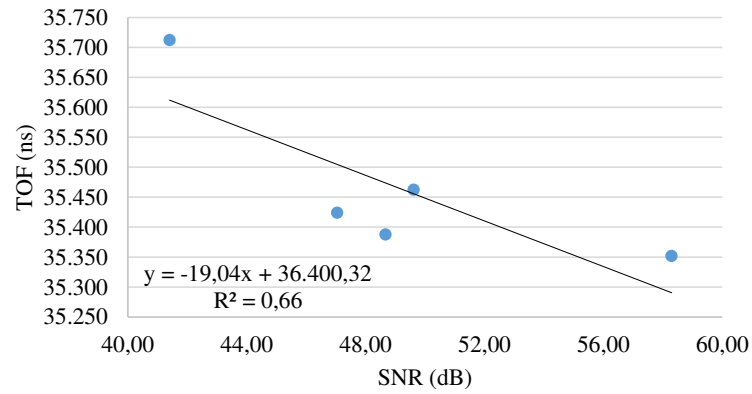


Figura 5.21. Variação do SNR em função do tamanho médio de grão para os sistemas de 64 e 128 canais utilizando sondas com frequência 5 MHz.

(a)



(b)



(c)

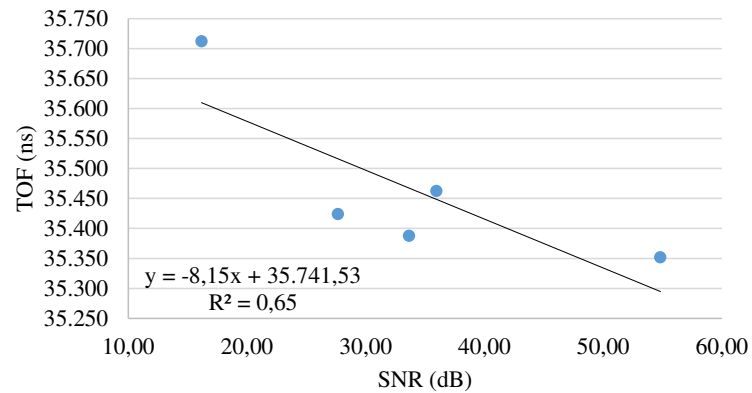


Figura 5.22. Relação do TOF e SNR médio para amostras de aço ASTM A36 tratadas termicamente e medidas com sondas de *array* de (a) 2,5, (b) 5 e (c) 10 MHz.

5.4 Influência da direção de laminação no tempo de percurso da onda L_{cr} e intensidade do ruído nas imagens ultrassônicas

Os experimentos para verificar a relação entre o tempo de percurso da onda L_{cr} , o SNR das imagens de TFM e a direção de laminação nas amostras de aço A36 são descritos nas seções 4.3.3 e 4.3.8. Os resultados para essas medições são apresentados nas Figuras 5.23 e 5.24 para imagens de TFM em regiões das peças definidas na Figura 4.34. A direção de laminação está associada à forma do grão e é verificado o comportamento da onda ultrassônica incidente nas direções “alongadas” e “achatadas” dos grãos da amostra laminada. Nos gráficos são apresentados os SNRs médios calculados a partir dos SNRs obtidos das oito posições definidas para cada posição de medição com a onda L_{cr} (ver Figuras 4.23 e 4.30). Os SNRs obtidos para todas as posições de medição são apresentados no Apêndice D. Portanto, estão representadas nos gráficos 20 medições de TOF e SNR médio na direção de laminação (duas posições de medição para cada uma das 10 peças) e 20 medições na direção transversal.

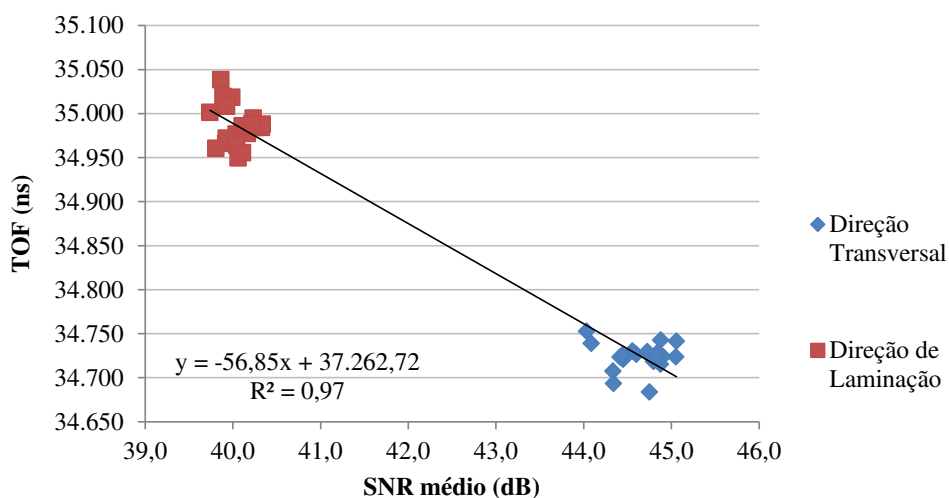


Figura 5.23. Variação do TOF da onda L_{cr} em função do SNR médio para medições na direção paralela e transversal à laminação das amostras ($z = 6:10$ mm).

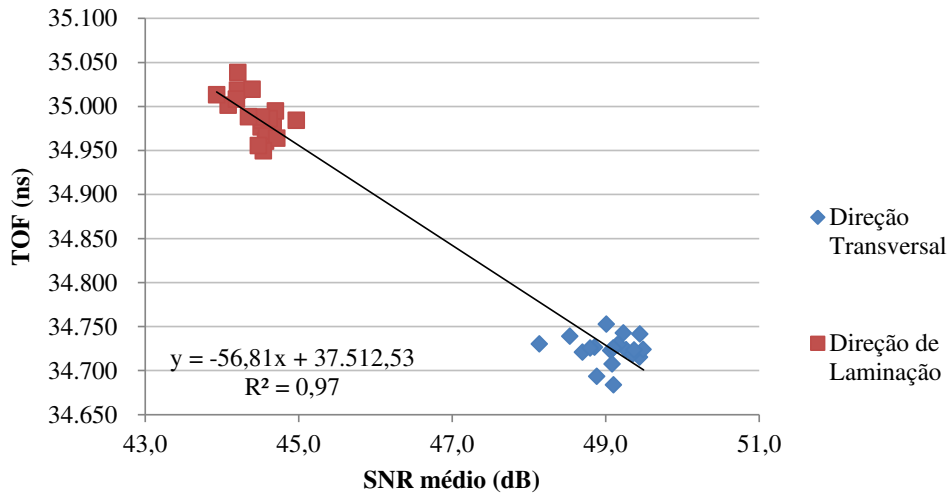


Figura 5.24. Variação do TOF da onda L_{cr} em função do SNR médio para medições na direção paralela e transversal à laminação das amostras ($z = 10;14$ mm).

Percebe-se nos gráficos das Figuras 5.23 e 5.24 que há um aumento do SNR com a queda do TOF da onda L_{cr} . A taxa de variação do TOF em função do SNR ficou em torno de -56,8 ns/dB, se for considerada que a relação entre os dois parâmetros é linear.

5.5 Influência da posição de medição no tempo de percurso da onda L_{cr} e intensidade do ruído nas imagens ultrassônicas

Nesta seção é avaliado se a variação que ocorre no tempo de percurso medido da onda L_{cr} para diferentes posições de medição ocorre também com o SNR obtido de imagens de TFM. Os resultados aqui são referentes aos procedimentos experimentais descritos na seção 4.3.4 para medição do TOF da onda L_{cr} e na seção 4.3.9 para obtenção do SNR médio das imagens de TFM. Como são 10 amostras, e cada uma contém 6 posições de medição com sonda de onda L_{cr} , obtêm-se ao todo 60 resultados de TOF. Assim como ocorreu para a verificação da influência da direção de laminação, o SNR médio é resultado dos SNRs obtidos das 8 posições de medição com a sonda de *array* que compõem a posição de medição com a onda L_{cr} . Os dados obtidos são

apresentados nos gráficos das Figuras 5.25 e 5.26. Os SNRs por posição de medição em cada amostra são mostrados no Apêndice E.

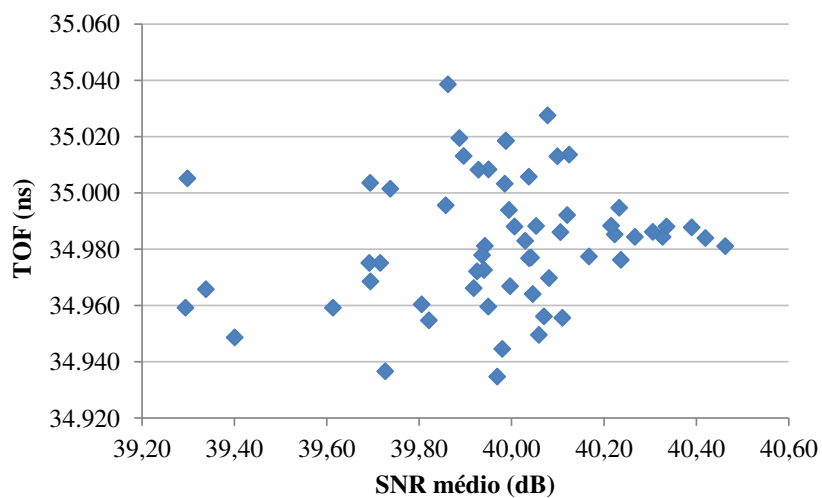


Figura 5.25. Relação entre TOF e SNR médio para diferentes amostras e posições de medição nas amostras de aço A36 ($z = 6:10$ mm).

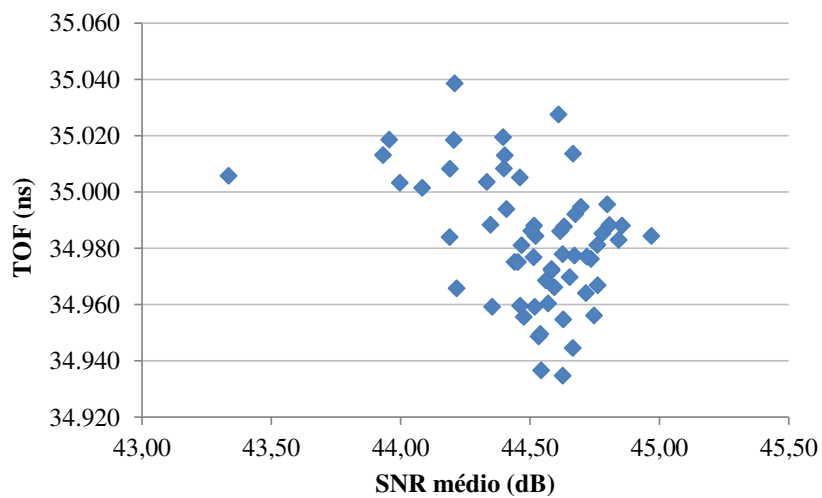


Figura 5.26. Relação entre TOF e SNR médio para diferentes amostras e posições de medição nas amostras de aço A36 ($z = 10:14$ mm).

Para este experimento, as variações encontradas nos tempos de percurso medidos da onda L_{cr} não podem ser diretamente relacionadas com o SNR médio, conforme pode ser visto nos gráficos das Figuras 5.25 e 5.26. Não é possível encontrar relação aparente entre os valores de TOF e SNR. Para o conjunto de dados, enquanto o TOF pode variar até 100 ns entre duas posições de medição diferentes, o SNR pode variar pouco mais de 1 dB, apenas. Neste caso, o fator desconhecido que causa a variação nas leituras de TOF, não afeta o valor medido de SNR nas imagens de TFM.

5.6 Influência da tensão no tempo de percurso da onda L_{cr} e intensidade do ruído nas imagens ultrassônicas

Por fim, são apresentados os resultados da avaliação da influência da tensão mecânica aplicada na amostra de aço API 5L X70 no TOF da onda L_{cr} e no SNR das imagens de TFM, baseando-se nos experimentos detalhados nas seções 4.3.5 e 4.3.10. A área na amostra escolhida para obtenção da imagem de TFM para cálculo do SNR foi apresentada na Figura 4.36. Os resultados para a variação do TOF em função da pressão aplicada pelo cilindro hidráulico na amostra estão na Figura 5.27 enquanto a variação do SNR médio em função da pressão é mostrada na Figura 5.28. Os valores de SNR obtidos por posição de medição são apresentados no Apêndice F. Nos gráficos estão representadas as médias para as três repetições do experimento. O SNR médio é obtido também pela média dos SNRs medidos nas oito posições mostradas na Figura 4.32.

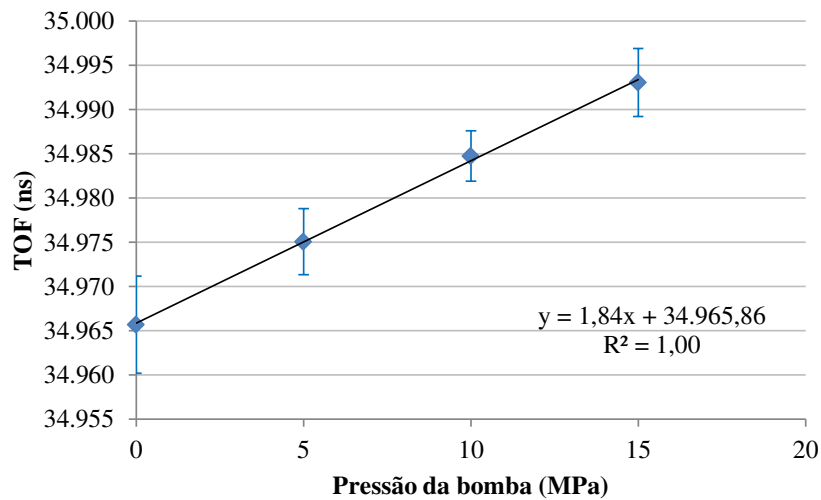


Figura 5.27. Variação do TOF da onda L_{cr} em função da pressão aplicada no dispositivo de tensão no ensaio com a amostra de aço API 5L X70.

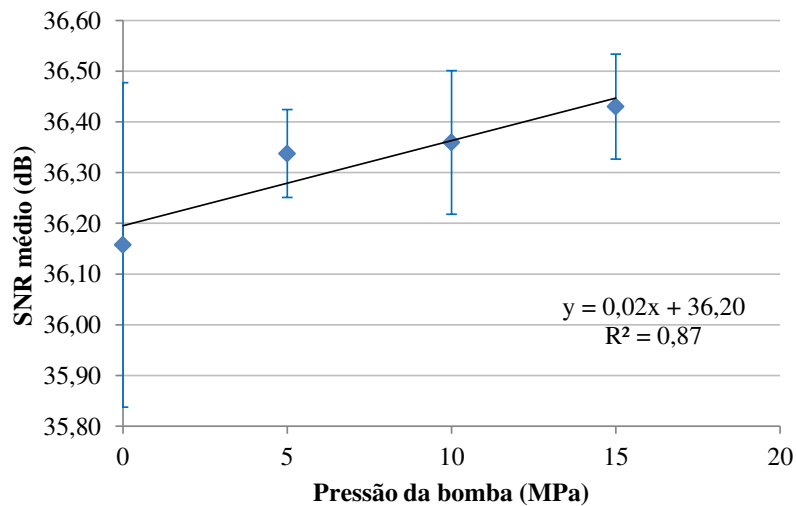


Figura 5.28. Variação do SNR médio das imagens de TFM em função da pressão aplicada no dispositivo de tensão no ensaio com a amostra de aço API 5L X70.

Conforme o esperado, o tempo de percurso da onda L_{cr} varia linearmente com a tensão aplicada (Figura 5.27). Na Figura 5.28, o SNR médio também parece variar com a tensão, mas essa variação é bastante pequena pois de 0 a 15 MPa a média do SNR médio varia apenas 0,27 dB. Além disso, a incerteza é alta como pode ser visto nas barras de erro calculadas com base no

desvio padrão da média das três repetições do experimento. De 0 a 15 MPa aplicados, o TOF variou 27 ns. Para o aço API 5L X70, considerando a constante acustoelástica L_{11} de 2,45 (ANDRINO, 2007), essa variação de tempo de percurso já equivale a uma variação de aproximadamente 87 MPa de tensão no material. Uma análise de variância (ANOVA) foi feita tanto com os dados do TOF quanto do SNR e os resultados são dados nas Tabelas 5.3 e 5.4, respectivamente.

Tabela 5.3. ANOVA para o TOF da onda L_{cr} .

ANOVA: fator único						
<i>Grupo</i>	<i>Número de medições</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>		
0 MPa	3	104.897	34.966	30		
5 MPa	3	104.925	34.975	14		
10 MPa	3	104.954	34.985	8		
15 MPa	3	104.979	34.993	15		
<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	1.266	3	422	25,1750	0,0002	4,0662
Dentro dos grupos	134	8	17			
Total	1.400	11				

Tabela 5.4. ANOVA para o SNR.

ANOVA: fator único						
<i>Grupo</i>	<i>Número de medições</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>		
0 MPa	3	108,47	36,16	0,102		
5 MPa	3	109,01	36,34	0,008		
10 MPa	3	109,08	36,36	0,020		
15 MPa	3	109,29	36,43	0,011		
<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	0,12	3	0,040	1,1495	0,3867	4,0662
Dentro dos grupos	0,28	8	0,035			
Total	0,40	11				

Nas Tabelas 5.3 e 5.4, SQ é soma dos quadrados de todos os desvios em relação à média de todas as observações; gl é o número de graus de liberdade; MQ é a média quadrática; F é a estatística usada para o teste que corresponde à razão entre a variância entre grupos e a variância dentro de cada grupo; o *valor-P* é a probabilidade de a hipótese nula ser verdadeira, ou seja, as médias de todos os grupos são iguais e F crítico é valor de uma distribuição F para 3 e 8 graus de liberdade e nível de significância escolhido de 0,05. O *valor-P* calculado para o SNR de 0,3867 é maior que 0,05, indicando que as médias dos grupos são iguais, ou seja, as médias dos SNRs obtidas para cada nível de tensão podem ser consideradas iguais. Já para o TOF da onda L_{cr} , o *valor-P* calculado é bem menor (0,0002) demonstrando a diferença de valores medidos entre os diferentes níveis de tensão, conforme pôde ser visualizado na tendência linear do gráfico da Figura 5.27. Nesse sentido, é razoável afirmar que a variação no SNR com tensão é pequena o suficiente para não poder ser distinguida da própria variabilidade da medição, ao contrário das variações devido ao tamanho e forma (referente à direção de laminação) de grão. Nos gráficos das Figuras 5.11 e 5.12, por exemplo, o desvio padrão para medições em um mesmo ponto e em mesmas condições ficaram entre 0,12 e 0,23 dB. Esse resultado levanta a hipótese para a baixa variabilidade encontrada nos SNRs medidos no experimento para verificação da influência das diferentes posições de medição nas amostras de aço A36 (Figuras 5.25 e 5.26). Uma hipótese para a causa da variação do TOF aliada à baixa variação no SNR verificada para aquele experimento pode ser a presença de tensão residual em diferentes níveis em algumas amostras medidas. Se for assumido que o SNR é sensível apenas à microestrutura e não à tensão, então as variações de microestrutura dentro das amostras não são relevantes. Entretanto, se nas mesmas amostras é verificada uma variação no TOF da L_{cr} , uma provável causa pode ser a presença de tensão residual em algumas amostras. Esse fato explicaria a variação do TOF enquanto o SNR, em média não sofre alteração.

Na Figura 5.29, os dados dos gráficos das Figuras 5.17 e 5.23 são agrupados em um mesmo gráfico para profundidade de imagem de TFM entre 6 e 10 mm enquanto na Figura 5.30 são utilizados os gráficos das Figuras 5.18 e 5.24 para a profundidade de imagem entre 10 e 14 mm. O objetivo é mostrar ao mesmo tempo as variações do tempo de percurso da onda L_{cr} e do SNR devido às variações relativas à microestrutura do material, especificamente o tamanho médio de grão e direção de laminação. Nos gráficos, além dos dados, estão representadas também as linhas

de tendências e suas respectivas equações de reta e linhas que mostram o intervalo de confiança calculado de acordo com uma distribuição normal e nível de significância de 5%.

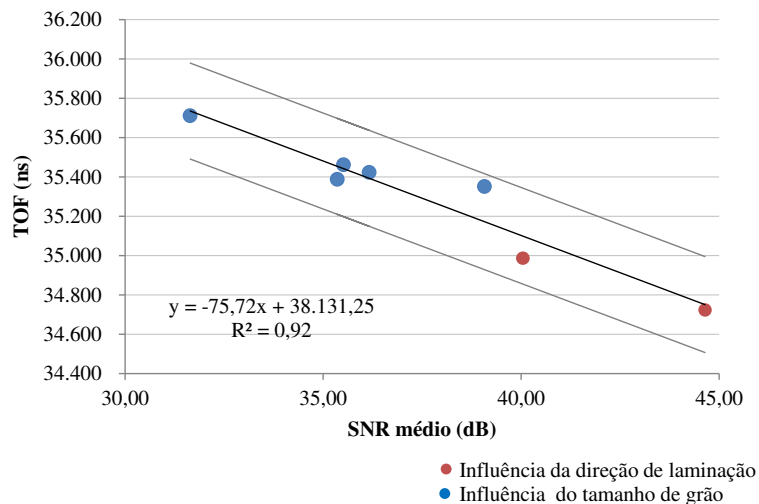


Figura 5.29. Relação entre TOF e SNR médio para as amostras de aço A36 (z = 6:10 mm).

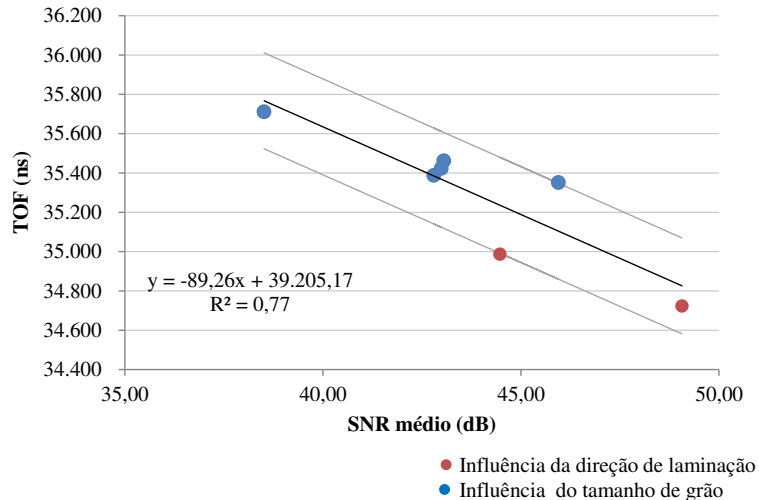


Figura 5.30. Relação entre TOF e SNR médio para as amostras de aço A36 (z = 10:14 mm).

Os gráficos das Figuras 5.29 e 5.30 acumulam as tendências de queda do TOF em função do aumento do SNR verificadas nos ensaios para tamanho de grão e direção de laminação. Em outras palavras, mostra que a velocidade da onda ultrassônica é menor quando a intensidade do

ruído é maior. Uma relação precisa entre o TOF e SNR seria extremamente útil, pois medindo o SNR de uma amostra, seria possível conhecer o TOF do material indiretamente e havendo diferença entre o TOF estimado e o TOF medido, essa diferença seria causada apenas pela tensão no material. Apesar de existir uma tendência linear na relação encontrada entre TOF e SNR, os “R²” das linhas de tendência para os dados dos gráficos não são altos o suficiente para utilizar as equações de reta com segurança para estimar o TOF. Como exemplo, a maior diferença entre o TOF medido representado em um ponto nos gráficos das Figuras 5.29 e 5.30 e o TOF calculado pela equação de reta encontrada para um mesmo SNR médio foi de 179 ns para a imagem entre 6 e 10 mm e 249 ns para 10 e 14 mm. Essas diferenças equivalem em tensão a 575 e 800 MPa, respectivamente.

5.7 Resumo dos resultados obtidos

Como conclusão do capítulo, são apresentados a seguir os principais resultados obtidos com este trabalho de pesquisa:

- Na avaliação da influência da temperatura no TOF da onda L_{cr} , verificou-se a relação linear já previamente descrita em trabalhos anteriores. A taxa de variação encontrada foi utilizada nas medições posteriores do trabalho como fator de correção das medidas de TOF em diferentes temperaturas.
- Quanto à relação entre o SNR de imagens de TFM e a temperatura, foi possível extrair uma relação apenas para imagens relacionadas à região mais próxima da superfície, entre 6 e 10 mm de profundidade da peça. Neste caso a relação encontrada foi também linear, com o SNR aumentando em função da temperatura. Entretanto, a variação do SNR Para imagens mais próximas do fundo da peça, entre 10 e 14 mm, não foi encontrada relação entre temperatura e SNR, mesmo descontando o efeito de variação da velocidade da onda ultrassônica em função da temperatura usada para o cálculo do TFM e a dilatação térmica das amostras.

- Tanto o TOF da onda L_{cr} quanto o SNR das imagens ultrassônicas se mostraram sensíveis ao tamanho médio do grão austenítico. O SNR se mostrou mais sensível à variação do tamanho de grão para frequências mais altas com relação praticamente linear para a frequência de 10 MHz. Um modelo matemático foi proposto para a obtenção do SNR em imagens de TFM a partir de uma distribuição de diâmetros de grãos conhecida. O modelo mostrou boa concordância para a frequência mais baixa de *array* utilizada (2,5 MHz) em relação à taxa de variação do SNR em função do diâmetro médio do grão. Para frequências mais altas, a divergência entre o resultado do modelo e o experimental foi alta, provavelmente devido ao efeito do espalhamento múltiplo ser preponderante em relação ao espalhamento simples considerado no modelo.
- A variação no SNR e no TOF da onda L_{cr} em função da direção de laminação nas amostras também foi verificado. Os resultados mostraram que enquanto o TOF é maior para a onda L_{cr} se propagando paralela à direção de laminação se comparada à direção transversal, o SNR apresenta comportamento oposto.
- A variação do SNR em função da tensão aplicada foi estudada para verificar a viabilidade da utilização das imagens de TFM para avaliar a microestrutura do material e propiciar possíveis correções na medição de tensão com ondas L_{cr} . Ao contrário do TOF da onda L_{cr} , não foi verificada influência significativa da tensão no do SNR obtido de imagens de TFM.
- Por fim, foram apresentados em um mesmo gráfico os resultados dos experimentos para avaliar a influência do tamanho de grão e direção de laminação no TOF e SNR com o intuito de se obter uma relação considerando variações da microestrutura relacionadas ao tamanho e forma de grão.

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PRÓXIMOS TRABALHOS

No trabalho apresentado, foi avaliada a influência do tamanho de grão médio, direção de laminação, tensão e temperatura na intensidade do ruído de grão em imagens geradas por *array* ultrassônico. O intuito da avaliação foi verificar a viabilidade de utilizar *arrays* para determinar características da microestrutura do material que influenciam de forma significativa a velocidade da onda longitudinal criticamente refratada (L_{cr}) usada para medição de tensão. Conforme já demonstrado na literatura, os fatores de influência estudados neste trabalho para as imagens ultrassônicas apresentam grande influência na velocidade onda L_{cr} . Foram feitas medições com a onda L_{cr} e *array* em amostras com diferentes tamanhos de grão, em amostras com direção de laminação conhecida e em amostras em diferentes temperaturas e sob diferentes níveis de tensão. O nível de ruído de grão foi avaliado através da relação sinal-ruído (SNR) utilizando a amplitude do eco de fundo da peça como “sinal” na relação. O método de geração de imagens foi o *Total Focusing Method* (TFM). A velocidade da onda L_{cr} foi representada pelo tempo de percurso (TOF), já que distância percorrida pela onda durante os diferentes experimentos foi mantida a mesma. Os materiais utilizados no trabalho foram o aço ASTM A36 e o aço API 5L X70. A seguir são apresentadas as principais conclusões sobre os tópicos abordados no trabalho:

a) Influência da temperatura no TOF da onda L_{cr} e no SNR das imagens de TFM

A influência da temperatura na velocidade da onda L_{cr} apesar de já ser conhecida, precisou ser avaliada nos dois materiais. Como se sabe que a relação entre temperatura e velocidade de onda é linear para a faixa de temperatura e tipo de material usado nos experimentos, a taxa de variação do TOF com a temperatura obtida no experimento foi utilizada para corrigir os valores medidos nos outros experimentos com onda L_{cr} . Para o aço ASTM A36 foi encontrado o valor de 10,85 ns/°C e para o API 5L X70 o valor foi 9,70 ns/°C. Para as imagens ultrassônicas, percebeu-se que o SNR aumenta linearmente com a temperatura considerando imagens da amostra de aço A36 para a profundidade entre 6 e 10 mm. A taxa média de aumento verificada foi de 0,155 dB/°C. Entretanto, para imagens obtidas entre 10 e 14 mm da amostra não foi verificada influência da temperatura no SNR. O desvio padrão

das medidas de SNR obtidas das imagens nas duas profundidades, entre 10 e 14 mm o valor foi de 0,21 dB contra 0,41 dB entre 6 e 10 mm, variando a temperatura entre 15 e 22 °C. Comparando esses valores com os desvios obtidos à temperatura constante, 0,23 e 0,12 dB para 6 a 10 e 10 a 14 mm, respectivamente, nota-se que a variação no SNR em função apenas da temperatura corresponde à aproximadamente à 50% da variação total. Com base nos resultados, pode-se concluir que a influência da temperatura no SNR é menos perceptível para imagens obtidas mais distantes da sonda de *array*. Portanto, optou-se por corrigir o valor de SNR das medições em função da temperatura apenas das imagens obtidas entre 6 e 10 mm. Para o aço API 5L X70, verificou-se também uma variação linear pequena com taxa de 0,07 dB/°C.

b) Influência do tamanho de grão no TOF da onda L_{CR} e no SNR das imagens de TFM

A influência do tamanho de grão médio no TOF da onda L_{cr} e no SNR das imagens ultrassônicas em amostras foi verificado em medições em amostras tratadas termicamente para crescimento do grão austenítico. Nesse caso, verificou-se que o TOF em geral aumenta com o tamanho médio de grão ao passo que o SNR cai. Agrupando os dados dos dois experimentos, foram traçados gráficos de variação do TOF em função do SNR de imagens geradas por sondas de *array* nas faixas de profundidade de 6 a 10 e de 10 a 14 mm. Traçando uma linha de tendência linear obtida pelo método dos mínimos quadrados, a taxa de variação do TOF em função do SNR médio foi -48,93 ns/dB para a imagem de 6:10 mm e -50,29 ns/dB para 10:14 mm. O coeficiente de determinação (R^2) encontrado para as linhas de tendência variou entre 0,82 e 0,88.

c) Desenvolvimento de um modelo matemático para cálculo do SNR das imagens de TFM a partir de uma distribuição de grãos

Um modelo matemático foi proposto para relacionar tamanho de grão e SNR em imagens de TFM. O modelo parte do princípio de espalhamento simples da onda refletida pelos grãos e recebe como entrada uma distribuição de tamanhos de grãos em uma determinada área, propriedades do material e especificações da sonda de *array*. Comparando os resultados simulados do modelo e experimentais para três frequências de *array* (2,5, 5 e 10

MHz), foi verificada boa concordância para 2,5 MHz no que se refere a taxa de variação do SNR em função do tamanho de grão. Entretanto, verificou-se uma diferença em média de aproximadamente 17,5 dB entre valores simulados e obtidos experimentalmente. Diferenças entre propriedades do material utilizadas para a simulação com valores reais das amostras podem ter causado esse “*offset*” entre dados simulados e experimentais. Para as frequências de 5 e 10 MHz não foi verificada boa concordância, possivelmente pelo fato de que a hipótese de espalhamento simples usada no modelo não seja mais válida.

d) Influência da direção de laminação no TOF da onda L_{CR} e no SNR das imagens de TFM

Em dez amostras de aço A36 com direção de laminação conhecida, tanto o TOF quanto o SNR foram medidos na direção da laminação e na direção transversal. Os resultados das duas medições foram apresentados em um gráfico TOF versus SNR médio e novamente verificou-se uma queda do TOF em função do SNR. Considerando uma linha de tendência reta, a taxa de variação encontrada foi de aproximadamente -56,8 ns/dB. Entre as medições feitas nas amostras seguindo uma mesma direção de propagação da onda L_{cr} foram encontradas diferenças em TOF de até 100 ns, mas não foi possível estabelecer uma relação com SNR medido das imagens.

e) Obtenção da relação entre o TOF da onda L_{CR} e o SNR das imagens de TFM

Combinando os resultados dos ensaios de tamanho de grão e direção de laminação, a relação entre TOF e SNR pode ser estendida para uma faixa maior de valores. A reta obtida nesse caso para a profundidade de imagem entre 6 e 10 mm apresentou inclinação de -75,72 ns/dB e R^2 de 0,92 e para a imagem entre 10 e 14 mm -89,26 ns/dB e R^2 igual a 0,77. Apesar da reta obtida não se ajustar adequadamente aos dados experimentais com coeficiente de determinação mais próximo de 1, os resultados são promissores para a obtenção de uma relação entre SNR e TOF da onda L_{cr} . A verificação da viabilidade da utilização das imagens de TFM para identificar variações microestruturais que influenciam a velocidade da onda L_{cr} constitui o objetivo principal do trabalho. Tal verificação está

condicionada a obtenção dessa relação entre o TOF da onda L_{cr} e o SNR das imagens de TFM.

f) Influência da tensão no TOF da onda L_{cr} e no SNR das imagens de TFM

Por fim, foi verificado se o SNR nas imagens de TFM é sensível à variação da tensão aplicada ao material, utilizando a amostra de aço API 5L X70. Confirmou-se primeiramente a variação praticamente linear do TOF da onda L_{cr} em função da variação de tensão prevista pela teoria acustoelástica. Em seguida foram medidos os SNR para diferentes níveis de tensão aplicados à amostra e através de uma análise de variância (ANOVA) não foi notada variação significativa do SNR em função dos níveis de tensão aplicados. Esse fato oferece uma boa perspectiva de utilização do SNR para estimar o TOF da onda L_{cr} influenciado somente por variações de microestrutura como tamanho e direção preferencial de alinhamento do grão, desde que previamente conhecida a relação entre TOF e SNR para o material. Neste caso, uma diferença entre o TOF estimado e o TOF propriamente medido seria resultado somente do estado de tensão do material.

Como sugestão de trabalho futuro com o intuito de aprimorar a técnica apresentada sugere-se tentar medir o SNR de uma imagem mais próxima da superfície onde a onda L_{cr} viaja. Para isso, é possível utilizar sondas de *array* com frequências mais altas que permitem a redução da profundidade da zona morta ou até mesmo utilizar sapatas montadas na sonda para a geração das ondas para formação da imagem também no primeiro ângulo crítico formando assim uma imagem de TFM também com ondas L_{cr} . Para reduzir a dispersão das medições de SNR, as amostras podem ser usinadas antes das medições para permitir melhor acoplamento entre sonda e peça, já que principalmente as amostras tratadas termicamente que podem apresentar superfície bastante irregular. Contudo, deve-se tomar cuidado para que não sejam criadas tensões residuais durante o processo de usinagem das peças.

Outra linha de estudo que pode ser abordada refere-se a desenvolver dispositivos de medição tensão com uma sonda que comporte tanto os transdutores e sapatas para a geração da onda L_{cr} quanto a sonda de *array*. Outra alternativa que pode ser estudada é a geração de imagens de TFM a partir de ondas de cisalhamento geradas por um *array* próprio para este tipo de onda ou

por um *array* de ondas longitudinais acoplado a uma sapata para criar ondas de cisalhamento refratadas. O uso de sondas de *array* matriciais ao invés dos *arrays* lineares usados neste trabalho também pode ser uma alternativa para obter imagens com maior sensibilidade à microestrutura do material inspecionado.

Concluindo, este trabalho atendeu aos objetivos propostos, aplicando duas técnicas diferentes em uma abordagem inovadora para a identificação dos efeitos da microestrutura sobre a medição de tensões por ondas ultrassônicas. Os resultados obtidos, embora ainda preliminares, mostram que a técnica conjunta pode ser usada para a identificação das tensões, desde que sejam controlados os fatores de influência e o procedimento de determinação seja criterioso. Novos estudos permitirão o aprofundamento dessas descobertas.

REFERÊNCIAS

ANDRINO, M. H. **Avaliação de tensões residuais em soldas de dutos utilizando o efeito acustoelástico**. 2003. 186p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

ANDRINO, M. H. **Aplicação de ondas longitudinais criticamente refratadas para a medição de tensões em dutos**. 2007. 203p. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E2491 – 08**: Standard guide for evaluating performance characteristics of phased-array ultrasonic testing instruments and systems. West Conshohocken, PA, 2008.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E2700 – 09**: Standard practice for contact ultrasonic testing of welds using phased arrays. West Conshohocken, PA, 2009.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E112-10**: Standard Test Methods for Determining Average Grain Size. United States, 2010.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **A36/A36M – 14**: Standard Specification for Carbon Structural Steel. West Conshohocken, PA, 2014.

BOWER, A. F. **Applied Mechanics of Solids**. Boca Raton: CRC Press, 2009. 820p.

BOWLER, A. I.; DRINKWATER, B. W.; WILCOX, P. D. Ultrasonic array speckle image correlation for internal strain and displacement measurement in metals. In: Proceedings of SPIE Volume 7294 - Nondestructive Characterization for Composite Materials, Aerospace Engineering, Civil Infrastructure, and Homeland Security, 2009. **Anais...**, 2009. p. 1-9.

BOWLER, A. I.; DRINKWATER, B. W.; WILCOX, P. D. An investigation into the feasibility of internal strain measurement in solids by correlation of ultrasonic images. **Proceedings of the Royal Society A**, v. 467, n. 2132, p. 1-24, 2011.

BRAY, D. E.; STANLEY, R. K. **Nondestructive evaluation. A tool in design, manufacturing and service**. Boca Raton: CRC Press, 1997. 586p.

BRAY, D. E. **Acoustoelastic constants (L_{ij}) for longitudinal and shear waves in engineering materials**. Disponível em: <<http://brayengr.com/AECTable122612.pdf>>. Acesso em 04 de Agosto de 2015.

BUENOS, A. A. **Influência do tamanho de grão austenítico e textura do aço ASTM A36 na velocidade de propagação de ondas longitudinais criticamente refratadas**. 2014. 247p. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

BUENOS, A. A.; PEREIRA JR, P.; MEI, P. R., SANTOS, A. A. Influence of Grain Size on the Propagation of L_{CR} Waves in Low Carbon Steel. **Journal of Nondestructive Evaluation**, v. 33, pp.562–570, 2014.

CAETANO, S. F. **Determinação das constantes acustoelásticas para aço API 5L X70 para gasodutos**. 2003. 167p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

DRINKWATER, B.; WILCOX, P. Ultrasonic arrays for non-destructive evaluation: A review. **NDT & E International**, v. 39, n. 7, p. 525–541, 2006.

DUBOIS, M.; MOREAU, A.; DAWSON, A.; MILITZER, M.; BUSSIÈRE, J. F. Laser ultrasonic measurement of microstructure evolution during metals processing. In: RTO AVT Workshop on Intelligent Processing of High Performance Materials, 1998, Bruxelas, **Anais...**, 1998. p. 1-9

DUPOND, O.; FEUILLY, N.; CHASSIGNOLE, B.; FOUQUET, T.; MOYSAN, J.; CORNELOUP, G. Relation between ultrasonic scattering and microstructure of polycrystalline materials. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 269, p. 1-8, 2011.

DUXBURY, D.; RUSSEL, J.; LOWE, M. The effect of variation in phased array element performance for Non-Destructive Evaluation (NDE). **Ultrasonics**. v. 53, n. 6, p. 1065-1078, 2012.

EGLE, D. M.; BRAY, D. E. Measurement of acoustoelastic and third order elastic constants for rail steel. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 60, n. 3, p. 741-744, 1976.

ENSINGER. **Material Data Sheet Rexolite ® 1422**. Disponível em: <<http://www.ensinger.co.uk/1809.file.dld>>. Acesso em 29 de abril de 2015.

ERHARD, A.; WUSTENBERG, H.; SCHENK, G.; MOHRLE, W. Calculation and construction of phased array-UT probes. **Nuclear Engineering and Design**, v. 94, n. 3, p. 375-385, 1986.

FRAGA, R. S. **Avaliação da profundidade de penetração de ondas longitudinais criticamente refratadas**. 2007. 167p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

GINZEL, E.; EKHLAS, A. G.; MATHESON, M.; CYR, P.; BROWN, B. Near field length compensation options. **The e-Journal of Nondestructive Testing**, v. 19, n. 6, p. 1 – 18, 2014.

GUBERNATIS, J.E.; DOMANY, E.; KRUMHANS�, J.A. Formal aspects of the theory of the scattering of ultrasound by flaws in elastic materials. **Journal of Applied Physics**, v. 48, n. 7, p. 2804 – 2811, 1977.

HASEGAWA, M.; YANO, Y.; MATSUMURA, J.; ODA, K. Prospects for within-tree variation of the acoustoelastic behaviors in Japanese cedar, **NDT & E International**, v. 49, n. 7, p. 57-63. 2012.

HIBBELER, R. C. **Resistência dos materiais**. São Paulo: Pearson Education, 2004. 670p.

HOLMES, C.; DRINKWATER, B. W.; WILCOX, P. D. Post processing of the full matrix of ultrasonic transmit-receive array data for non-destructive evaluation. **NDT & E International**, v. 38, n. 8, p. 701-711, 2005.

HUGHES, D. S.; KELLY, J. L. Second - order elastic deformation of solids. **Physical Review**, v. 92, n. 4, p. 1145-1149, 1953.

JAVADI, Y.; AKHLAGHI, M.; NAJAFABADI, M. A. Using finite element and ultrasonic method to evaluate welding longitudinal residual stress through the thickness in austenitic stainless steel plates. **Materials & Design**, v. 45, p. 628-642, 2013.

JAVADI, Y.; NAJAFABADI, M. A. Comparison between contact and immersion ultrasonic method to evaluate welding residual stresses of dissimilar joints. **Materials & Design**, v. 47, p. 473-482, 2013.

JAVADI, Y.; PIRZAMAN, H. S.; RAEISI, M. H.; NAJAFABADI, M. A. Ultrasonic stress evaluation through thickness of a stainless steel pressure vessel. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, v. 123-124, p. 111-120, 2014.

JAVADI, Y.; HASANI, M.; SADEGHI, S. Investigation of clamping effect on the welding sub-surface residual stress and deformation by using the ultrasonic stress measurement and finite element method. **Journal of Nondestructive Evaluation**. v. 34, n. 1, p. 1-11, 2015.

JOSEPH, A.; PALANICHAMY, P.; JAYAKUMAR, T. Evaluation of residual stresses in carbon steel weld joints by ultrasonic Lcr wave technique. **Journal of Nondestructive Evaluation**. v. 34, n. 1, p. 1-7, 2014.

KRAUSE, M.; MIELENTZ, F.; MILMAN, B.; MULLER, W.; SCHIMTZ, V.; WIGGENHAUSER, H. Ultrasonic imaging of concrete members using an array system. **NDT & E International**, v. 34, n. 6, p. 403-408, 2001.

KRUGER, S. E.; REBELLO, J. M. A.; CHARLIER, J. Broadband ultrasonic backscattering applied to nondestructive characterization of materials. **IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control**, v. 51, n. 7, p.832-838, 2004.

KUBE, C. M.; DU, H.; GHOSHAL, G.; TURNER, J. A. Stress-dependent changes in the diffuse ultrasonic backscatter coefficient in steel: Experimental results. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 132, n. 1, p. 43-48, 2012.

KUNDU, T. **Advanced ultrasonic methods for material and structure inspection**. London: ISTE, 2007. 393p.

LAI, W. M.; RUBIN, D.; KREMPL, E. **Introduction to continuum mechanics**. Woburn: Butterworth-Heinemann, 1999. 556p.

LI, C.; PAIN, D.; WILCOX, P. D.; DRINKWATER, B. W. Imaging composite material using ultrasonic arrays. **NDT & E International**, v. 53, n. 1, p. 8-17, 2013.

LI, J.; YANG, L.; ROKHLIN, S.I. Effect of texture and grain shape on ultrasonic backscattering in polycrystals. **Ultrasonics**, v. 54, n. 7, p.1789–1803, 2014.

LILLAMAND, I., CHAIX, J. F.; PLOIX, M. A.; GARNIER, V. Acoustoelastic effect in concrete material under uni-axial compressive loading. **NDT & E International**, v. 43, n. 8, p. 655–660. 2010.

M2M. **Gekko**. Disponível em: <<http://m2m-ndt.com/products/Gekko.htm>>. Acesso em 13 de maio de 2015.

MARGETAN, F.J.; THOMPSON, R.B.; YALDA-MOOSHABAD, I. Backscattered microstructural noise in ultrasonic toneburst inspections. **Journal of Nondestructive Evaluation**, v. 13, n. 3, p.111–136, 1994.

MATWEB. **ASTM A36 Steel, bar**. Disponível em: <<http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=d1844977c5c8440cb9a3a967f8909c3a>>. Acesso em 10 de março de 2015.

MCNAB, A.; CAMPBELL, M. J. Ultrasonic phased array for nondestructive testing. **NDT International**, v. 6, n. 12, p. 333-337, 1987.

MINICUCCI, D. J. **Avaliação de tensões por ultra-som no aro de rodas ferroviárias forjadas novas – classe C**. 2003. 119p. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

MUIR, D. D. **One-sided ultrasonic determination of third order elastic constants using angle-beam acoustoelasticity measurements**. 2009. 165p. Tese (Doutorado) - School of Electrical and Computer Engineering, Georgia Institute of Technology.

MURNAGHAN, T. D. **Finite deformation of an elastic solid**. New York: John Wiley and Sons, 1951. 140p.

NAKAHATA, K.; KONO, N. 3-D modelings of ultrasonic phased array transducer and its radiation properties in solid. In: SANTOS, A. A. **Ultrasonic waves**. Rijeka: InTech. 2012. Cap. 3, p. 59-80.

OLYMPUS. **Advances in phased array ultrasonic technology applications**. Waltham: Olympus NDT, 2007a. 512p.

OLYMPUS. **Introduction to phased array ultrasonic technology applications**. Waltham: Olympus NDT, 2007b. 376p.

OLYMPUS. **Phased Array Testing - Basic Theory for Industrial Applications**. Waltham: Olympus NDT, 2010. 113p.

OLYMPUS. **Ultrasonic transducers technical notes**. Disponível em: <http://www.olympus-ims.com/pt/downloads/download/?file=285213010&fl=en_US>. Acesso em 29 de abril de 2015.

PANETTA, P. D.; BLAND, L. G.; TRACY, M.; HASSAN, W. Ultrasonic backscattering measurements of grain size in metal alloys. In: TMS2014 Annual Meeting Supplemental Proceedings - Integration of Materials Science and Nondestructive Evaluation for Materials Characterization, **Anais...** San Diego: San Diego Convention Center, 2014. p.721–730.

PAO, Y.H.; SACHSE, W.; FUKUOKA, H. Acoustoelasticity residual stress measurements. In MASON, W. P. (Ed.); THURSTON, R. N. **Physical Acoustics**, New York: Academic Press., 1984. v. 17, c. 2, p.61–143.

PAO, Y.H.; GAMER, U. Acoustoelastics waves in orthotropic media. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 77, n. 3, p.806-812, 1985.

PEREIRA JUNIOR, P. **Influência da Anisotropia gerada por laminação sobre a medição de tensões por ultrassom em ligas de alumínio 7050**. 2011. 137p. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

PEREIRA JR., P.; BUENOS, A. A.; SANTOS, C. S.; SANTOS JR. A. A. Influência do tamanho médio de grão na birrefringência acústica. In: CONFERÊNCIA SOBRE TECNOLOGIA DE EQUIPAMENTOS (COTEQ), 2013, Porto de Galinhas. **Anais...**, Porto de Galinhas, 2013. p. 1-10.

POGUET, J.; GARCIA, A.; VAZQUEZ, J.; MARGUET, J.; PICHONNAT, F. Phased array technology, concepts, and applications. In: 8th European Congress on Non Destructive testing, 2002, Barcelona, Espanha. **Anais...**, Barcelona, 2002. p. 1-7.

POWELL, D. J.; HAYWARD, G. Flexible ultrasonic transducer arrays for non-destructive evaluation applications — part 1: the theoretical modelling approach. **IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control**, v. 43, n. 3, p. 385-392, 1996.

SADD, M. H. **Elasticity. Theory, applications and numerics**. Burlington: Elsevier Inc., 2005. 461p.

SANTOS, C. S. **Proposta de sistema automatizado para medição de tensão utilizando o efeito acustoelástico**. 2013. 220p. Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

SANTOS, A. A.; AMBIEL, L. B.; GARCIA, R. H.; RODOVALHO, T. G. Stress analysis in carbon/epoxy composites using Lcr waves. **Journal of Composite Materials**, v. 48, n. 27, p. 3425-3434, 2014.

SANTOS, C. S.; PEREIRA JR., P.; BUENOS, A. A.; SANTOS JR. A. A.; SANTOS, A. H. C. Estudo da influência do acrílico e rexolite na medição de tensão usando ondas longitudinais criticamente refratadas (Lcr). In: CONFERÊNCIA SOBRE TECNOLOGIA DE EQUIPAMENTOS (COTEQ), 2013, Porto de Galinhas. **Anais...**, Porto de Galinhas, 2013. p. 1-9.

SANTOS, R. A. **Efeito da temperatura sobre a medição de tensão por ondas LCR em aços API 5L X70**. 2007. 127p. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

SCHMERR, L. W. **Fundamentals of Ultrasonic Nondestructive Evaluation: A Modeling Approach**. New York: Plenum Publishing Co., 1998. 559p.

SCHMERR, L. W. **Fundamentals of Ultrasonic Phased Arrays**. Springer International Publishing Switzerland, 2015. 377p.

SHAHJAHAN, S.; RUPIN, F.; AUBRY, A.; CHASSIGNOLE, B.; FOUQUET, T.; DERODE, A. Comparison between experimental and 2-D numerical studies of multiple scattering in Inconel600 by means of array probes. **Ultrasonics**, v. 54, n. 1, p.358–67, 2014.

SIMONETTI, F. Multiple scattering: The key to unravel the subwavelength world from the far-field pattern of a scattered wave. **Physical Review E**, v. 73, n. 3, p. 1-13, 2006.

SMITH, W. A. The role of piezocomposites in ultrasonic transducers. **Proceedings of Ultrasonics Symposium IEEE**, v. 2, n. 3-6, p. 755–766, 1989.

SOMER, J. C. Electronic sector scanning for ultrasonic diagnosis. **Ultrasonics**, v. 6, n. 3, p. 153-159, 1968.

SZELAZEK, J. Ultrasonic evaluation of residual hoop stress in forged and cast railroads wheels—differences. **Journal of Nondestructive Evaluation**. v. 34, n. 1, p. 1-13, 2015.

THOMPSON, R.B.; GRAY, T.A. A model relating ultrasonic scattering measurements through liquid–solid interfaces to unbounded medium scattering amplitudes. **The Journal of the Acoustical Society of America**, vol. 74, n. 4, 1983.

UCHIDA, K.; NAGAI, S.; KASHIWAYA, H.; ARII, M. Availability study of a phased array ultrasonic technique. **Nuclear Engineering and Design**, v. 81, n. 2, p. 309-314, 1984.

UZUN, F.; BILGE, A. N. Ultrasonic investigation of the effect of carbon content in carbon steels on bulk residual stress. **Journal of Nondestructive Evaluation**. v. 34, n. 2, p. 1-10, 2015.

VON RAMM, O. T.; THURSTONE, F. L. Cardiac imaging using a phased array ultrasound system. I. System design. **Circulation**, v. 53, n. 2, p. 258-262, 1976.

VON RAMM, O. T.; SMITH, S. W. Beam steering with linear arrays. **Transactions on Biomedical Engineering**, v. 30, n. 8, p. 438-452. 1983.

WILCOX, P. Guided wave beam steering from omni directional transducer arrays. **Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation**, v. 22, p.761-768, 2003.

WILCOX, P.; HOLMES, C.; DRINKWATER, B. Advanced reflector characterization with ultrasonic phased arrays in NDE applications. **IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control**, v. 54, n. 8, p. 1541–1550, 2007.

WILCOX, P. D. Array imaging of noisy materials. **Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation**, v. 30, p.890-897, 2011.

WILLEMS, H.; GOEBBELS, K. Characterization of microstructure by backscattered ultrasonic waves. **Metal Science**, v. 15, n. 11-12, p. 549–553, 1981.

YALDA, I.; THOMPSON, R.B.; MARGETAN, F.J. Predicting ultrasonic grain noise in polycrystals: A Monte Carlo model. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 99, n. 6, 1996.

YANEZ, Y.; GARCIA-RODRIGUEZ, M.; GARCIA-HERNANDEZ, M. J.; SALAZAR, J.; TURO, A.; CHAVEZ, J. A. Lamb wave generation with an air-coupled piezoelectric concave array using square-wave burst excitation. **NDT & E International**, v. 41, n. 4, p. 292-299, 2008.

ZHANG, J.; DRINKWATER, B. W.; WILCOX, P. D.; HUNTER, A. J. Defect detection using ultrasonic arrays: The multi-mode total focusing method. **NDT & E International**, v. 43, n. 2, p.123–133, 2010.

ZHANG, J.; DRINKWATER, B. W.; WILCOX. Comparison of Ultrasonic Array Imaging Algorithms for Nondestructive Evaluation. **IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control**, v. 60, n. 8, p.1732–1745, 2013.

APÊNDICE A– Código para geração de coordenadas e tamanhos de grão

Neste apêndice é apresentado o programa criado em MATLAB para a geração das coordenadas e tamanhos de grão para o modelo descrito no Capítulo 3.

```
clc
clear all
close all

% Dimensões do grão: -----
me_dia = 98e-6;      % Diâmetro médio do grão
sd_dia = 26e-6;      % Desvio padrão na distribuição de grãos
%-----

% Definição do tamanho da região de interesse (RDI): -----
img.zrange = [19, 31] * 1e-3;      % Limites da RDI na direção z
img.xrange = [-6, 6] * 1e-3;      % Limites da RDI na direção x
%-----

% Cálculo do número de grãos: -----
no_grain_x = ceil((img.xrange(2) - img.xrange(1)) / me_dia);
    % Número de grãos na direção x
no_grain_z = ceil((img.zrange(2) - img.zrange(1)) / me_dia);
    % Número de grãos na direção z
%-----

% Distribuição de tamanhos de grãos: -----
dia = normrnd(me_dia, sd_dia, [no_grain_z, no_grain_x]);
    % 'dia' é a matriz de diâmetro de grãos com 'no_grain_z' linhas e
    % 'no_grain_x' colunas formadas de diâmetros de grãos obtidos a
    % partir de uma distribuição normal aleatorizada com base na média
    % ('me_dia') e desvio padrão ('sd_dia')

a = dia/2;    % matriz de raios dos grãos
%-----

% Inicialização das matrizes de coordenadas dos grãos: -----
z = zeros(no_grain_z, no_grain_x); % Matrizes 'z' e 'x' recebem 0's
x = z;
%-----

% Posição de referencial inicial nas matrizes de coordenadas 'x' e 'z':
```



```

z0 = img.zrange(1) * ones(1,no_grain_x);
x0 = img.xrange(1);
%-----

% Constantes e variáveis auxiliares: -----
cof = 0.75;      % constante de sobreposição de grãos
flag = 1;       % constante para alocação de grãos
aux = 1;        % variável auxiliar
%-----

% Laço para definição das coordenadas dos grãos: -----
for i = 1:no_grain_z
    for k = 1:no_grain_x
        x(i,k) = x0 + flag * a(i,k);
        x0 = x(i,k) + flag * a(i,k);
    end
    flag = -flag;
    if flag < 0
        aux = 2;
    else
        aux = 1;
    end
    x0 = img.xrange(aux);
    z(i,:) = z0 + cof * max(max(a(i,:)));
    z0 = z(i,:) + cof * max(max(a(i,:)));
end
% -----

% Ajuste de coordenadas para aleatorização de posições: -----
desv = normrnd(0, 0.2*me_dia, [no_grain_z, no_grain_x]);
x = x + desv;
z = z + desv;
%-----

% Verificação se as coordenadas dos grãos criadas continuam na RDI após
% aleatorização das posições. Se não, elas são realocadas novamente na
% RDI.
for i=1:no_grain_z
    for k=1:no_grain_x
        if (x(i,k) < img.xrange(1)) | (x(i,k) > img.xrange(2))
            x(i,k) = (img.xrange(2)-img.xrange(1)).*rand +...
                img.xrange(1);
        end
        if (z(i,k) < img.zrange(1)) | (z(i,k) > img.zrange(2))
            z(i,k) = (img.zrange(2)-img.zrange(1)).*rand +...
                img.zrange(1);
        end
    end
end
end

```

```

%-----

% Inicialização dos vetores de posição e raio dos grãos: -----
pos = zeros(no_grain_x * no_grain_z , 3); % vetor de posição, onde
% cada linha corresponde às coordenadas de um grão, sendo a primeira
% coluna para 'x', a segunda para 'y' e a terceira para 'z'

ag = zeros(no_grain_x * no_grain_z , 1); % vetor de raios de grãos
%-----

% Laço para vetores de posição e grãos receberem os dados das matrizes
% 'x','z' e 'a': -----
l = 1;
for i = 1:no_grain_z
    for k = 1:no_grain_x
        pos(l,1) = x(i,k);
        pos(l,2) = 0;
        pos(l,3) = z(i,k);
        ag(l) = a(i,k);
        l = l + 1;
    end
end
%-----

% Verificação da ocupação da RDI: -----
area_g = sum(pi * ag.^2); % área da soma total de grãos
area_i = (img.zrange(2) - img.zrange(1)) * ...
        (img.xrange(2) - img.xrange(1)); % área da RDI
occup1 = 100 * area_g/ area_i % taxa de ocupação dos grãos
%-----

% Laço para inserção de novos grãos na RDI até a área total de grãos
seja igual à área da RDI: -----
while area_g < area_i
    pos(l,1) = (img.xrange(2)-img.xrange(1)).*rand + img.xrange(1);
    pos(l,2) = 0;
    pos(l,3) = (img.zrange(2)-img.zrange(1)).*rand + img.zrange(1);
    ag(l) = 0.5*normrnd(me_dia, sd_dia);
    area_g = sum(pi * ag.^2);
    l = l + 1;
end
occup2 = 100 * area_g/ area_i % novo cálculo de ocupação
%-----

% Grava os vetores de posição e raio dos grãos: -----
csvwrite('vetor_de_posição.txt',pos);
csvwrite('vetor_de_raios.txt',ag);
%-----

```

```

% Geração de figuras de representação dos grãos na RDI: -----
ang=0:0.1:2*pi;
hold on
for i = 1:size(pos,1)
    xpos = ag(i) * cos(ang);
    zpos = ag(i) * sin(ang);
    plot((pos(i,1) + xpos), (pos(i,3) + zpos), 'k');
end
line([img.xrange(1) img.xrange(1)], [img.zrange(1) img.zrange(2)])
line([img.xrange(2) img.xrange(2)], [img.zrange(1) img.zrange(2)])
line([img.xrange(1) img.xrange(2)], [img.zrange(1) img.zrange(1)])
line([img.xrange(1) img.xrange(2)], [img.zrange(2) img.zrange(2)])
set(gcf, 'color', 'white')
axis equal
xlabel 'x (mm) '
ylabel 'z (mm) '
hold off
%-----

```

APÊNDICE B – Relações sinal-ruído obtidas nas peças tratadas termicamente

Na Tabela B.1 são apresentadas as relações sinal-ruído (SNR) obtidas em cada posição de medição usando o sistema de 64 canais nas amostras tratadas termicamente para crescimento de grão na profundidade entre 6 e 10 mm e na Tabela B.2 são apresentadas para a profundidade entre 10 e 14 mm. As posições nas amostras estão representadas na Figura 4.28. O TOF da onda L_{cr} medido na posição correspondente às oito posições de medição de SNR também é apresentado nas Tabelas B.1 e B.2.

Tabela B.1. SNR por posição nas amostras tratadas termicamente para crescimento de grão (profundidade entre 6 e 10 mm).

SNR (dB)	Tamanho de grão (μm)				
Posição	22	98	131	166	209
Posição 1	40,40	37,10	32,28	37,06	30,05
Posição 2	39,28	38,10	32,93	37,75	25,59
Posição 3	37,91	36,79	35,58	35,50	34,30
Posição 4	40,61	37,96	36,80	37,01	30,63
Posição 5	38,46	36,89	34,41	36,04	27,06
Posição 6	38,63	36,77	36,09	34,78	36,51
Posição 7	38,29	30,08	37,55	35,77	35,87
Posição 8	39,00	30,44	37,19	35,38	33,11
Média	39,07	35,52	35,35	36,16	31,64
Desvio padrão	0,92	3,07	1,84	0,95	3,74
TOF (ns)	35.352	35.462	35.387	35.424	35.712

Tabela B.2. SNR por posição nas amostras tratadas termicamente para crescimento de grão (profundidade entre 10 e 14 mm).

SNR (dB)	Tamanho de grão (μm)				
Posição	22	98	131	166	209
Posição 1	46,60	44,43	40,55	44,00	36,02
Posição 2	45,79	45,87	40,18	43,63	32,44
Posição 3	46,75	44,97	42,96	43,04	40,86
Posição 4	47,44	44,79	45,01	44,15	38,51
Posição 5	46,07	44,47	42,06	42,56	34,17
Posição 6	45,73	44,73	43,87	42,29	43,62
Posição 7	44,92	36,90	44,85	42,46	42,31
Posição 8	44,28	38,24	42,92	41,79	40,18
Média	45,95	43,05	42,80	42,99	38,51
Desvio padrão	1,02	3,43	1,80	0,86	3,98
TOF (ns)	35.352	35.462	35.387	35.424	35.712

APÊNDICE C – Avaliação da variação da relação sinal-ruído em função de diferentes distribuições de grãos

Com intuito de investigar o efeito de variações entre diferentes distribuições de grãos, dez diferentes distribuições de grãos para um particular diâmetro (209 μm) foram geradas e o modelo proposto no Capítulo 3 foi usado para extrair a relação sinal-ruído (SNR) das imagens de TFM. Na Tabela C.1 são mostradas as diferenças entre o SNR de cada modelo e a média obtida das dez distribuições, em dB e a porcentagem relativa à média. Uma região de interesse (RDI) menor se comparada à apresentada no Capítulo 3 de 6x6 mm e área de imagem de TFM de 5x5 mm foram utilizadas, o que aumenta a sensibilidade para uma distribuição específica, à medida que menos grãos são utilizados. O centro da RDI e da imagem de TFM foi o mesmo considerado na Figura 3.12. Com exceção à RDI e área da imagem de TFM, os outros parâmetros de entrada da simulação utilizados na comparação com os dados experimentais foram mantidos. A frequência da sonda de *array* escolhida foi de 5 MHz e número de elementos igual a 128.

Tabela C.1. SNRs obtido da simulação para diferentes distribuições de grãos. Tamanho de grão médio igual a 209 μm .

Distribuição:	Número de grãos	SNR (dB)	Diferença com a média (absoluta):	Diferença com a média (em %, relativa à média):
1	999	22,152	0,655	3,04%
2	946	20,892	0,606	2,82%
3	972	21,018	0,480	2,23%
4	967	20,927	0,571	2,66%
5	976	22,492	0,995	4,63%
6	973	22,015	0,517	2,41%
7	953	21,064	0,434	2,02%
8	959	21,036	0,462	2,15%
9	971	22,084	0,586	2,73%
10	963	21,298	0,200	0,93%
Média:		21,498	Média:	2,56%
Varância:		0,377	Variância:	0,01%

A pequena diferença relativa em SNR (2,56%, em média, relativa ao SNR médio) para diferentes distribuições mostra que é razoável considerar a aproximação adotada no trabalho onde apenas uma realização para o modelo é usada para cada tamanho de grão.

A influência da variação da fração de área no SNR também foi testada. O procedimento descrito na seção 3.1 para distribuir os grãos na RDI pode gerar a sobreposição de grãos conforme pode ser visto na Figura 3.3b. Na Figura C.1 é apresentado um gráfico mostrando como o SNR varia em função da fração de área. Dois tamanhos de grão foram escolhidos para a simulação, 166 e 209 μm , e a sonda com 128 elementos e 5 MHz de frequência foi utilizada. Analisando o gráfico, verifica-se que um aumento de 90 a 105 % na fração de área leva a uma redução do SNR de 3,01 dB para o tamanho de grão médio de 166 μm e 1,11 dB para 209 μm . Apesar destes efeitos poderem ser considerados pequenos, eles são significantes, sugerindo que a correta seleção do número de grãos modelado é importante para a obtenção de boa concordância entre simulação e experimentos.

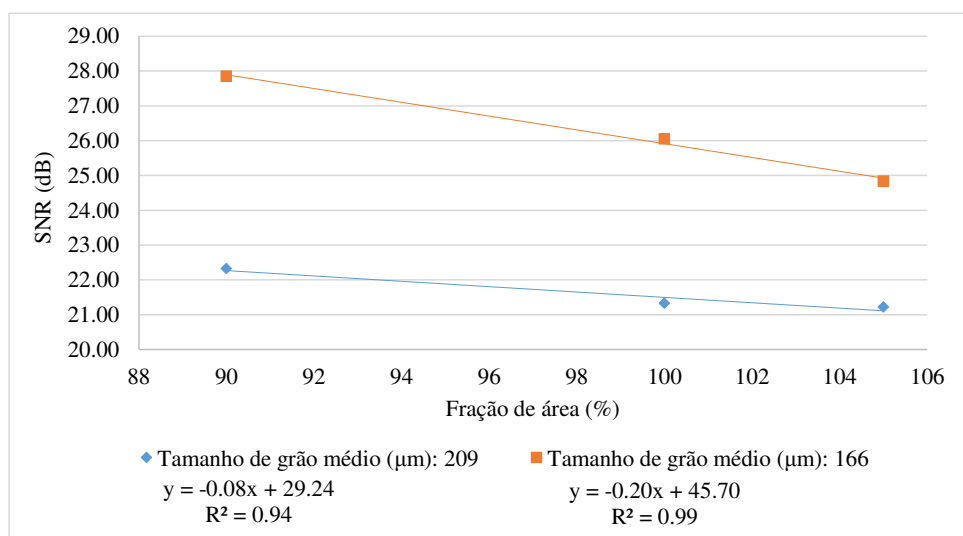


Figura C.1. SNR em função da fração de área para distribuições de grãos de tamanho médio de 209 e 166 μm .

APÊNDICE D– Relações sinal-ruído obtidas para ensaio de verificação da influência da direção de laminação no ruído de imagens ultrassônicas

Neste apêndice são apresentadas as relações sinal-ruído (SNR) medidas em imagens de TFM para diferentes pontos em amostras com direção de laminação conhecida. Os pontos de medição foram mostrados na Figura 4.30. Na Tabela D.1 são apresentados os SNRs para a profundidade de imagem entre 6 e 10 mm e direção de propagação da onda L_{cr} transversal à direção de laminação (posições “1.x” e “2.x” na Figura 4.30) ao passo que na Tabela D.2 estão os valores obtidos para posições “3.x” e “4.x”, paralelas à direção de laminação. Nas Tabelas D.3 e D.4 são mostrados os mesmos resultados, mas para a profundidade de imagem de TFM entre 10 e 14 mm. Os tempos de percurso (TOF) da onda L_{cr} medidos nas posições correspondentes às posições de medição da SNR estão representados também nas Tabelas citadas.

Tabela D.1. SNRs medidos, em dB, para a onda L_{cr} se propagando na direção transversal à direção de laminação. Profundidade da imagem definida entre 6 e 10 mm.

Amostra	Posição L_{cr}	Posição <i>array</i>								Média	Desvio padrão	TOF L_{cr} (ns)
		1	2	3	4	5	6	7	8			
25	1	44,9	45,0	45,1	45,2	45,2	45,1	45,1	44,9	45,1	0,1	34.724
25	2	45,0	45,1	44,8	44,9	44,9	44,8	44,8	44,8	44,9	0,1	34.715
21	1	45,1	45,0	44,8	44,9	44,8	44,9	44,5	44,3	44,8	0,3	34.718
21	2	45,0	45,0	45,0	44,9	44,8	44,9	44,7	45,0	44,9	0,1	34.724
24	1	44,7	44,9	45,0	44,9	44,8	44,8	44,4	44,7	44,8	0,2	34.723
24	2	45,0	45,1	45,0	44,7	44,9	44,7	44,7	44,7	44,8	0,2	34.729
17	1	44,9	44,4	44,7	44,3	44,7	44,7	44,5	44,6	44,6	0,2	34.727
17	2	44,8	44,6	44,2	44,5	44,4	44,6	44,2	44,4	44,5	0,2	34.721
9	1	44,5	44,5	44,7	44,9	44,6	44,6	44,3	44,4	44,6	0,2	34.730
9	2	44,2	44,2	44,3	43,9	43,9	43,9	44,0	44,2	44,1	0,2	34.739
15	1	43,7	44,0	44,6	44,7	44,4	44,6	44,1	44,7	44,3	0,4	34.707
15	2	44,8	44,6	44,4	44,3	43,9	44,5	44,3	44,6	44,4	0,3	34.723
16	1	44,8	44,8	44,9	44,9	44,9	44,9	44,9	43,7	44,7	0,4	34.730
16	2	44,2	44,4	44,0	43,9	43,7	43,9	44,0	44,2	44,0	0,2	34.753
19	1	44,9	45,0	44,9	44,7	44,9	44,8	44,9	44,9	44,9	0,1	34.743
19	2	45,1	45,0	45,1	45,1	45,0	45,2	45,1	45,1	45,1	0,0	34.741
10	1	44,9	44,7	44,9	44,8	44,9	44,7	45,0	44,8	44,8	0,1	34.725
10	2	44,8	44,6	44,5	44,6	44,5	43,9	44,4	44,2	44,4	0,3	34.726
8	1	44,8	44,9	44,9	44,7	44,7	44,7	44,7	44,7	44,8	0,1	34.684
8	2	44,6	44,4	44,3	44,2	44,2	44,2	44,5	44,3	44,3	0,1	34.693

Tabela D.2. SNRs medidos, em dB, para a onda Lcr se propagando na direção paralela à direção de laminação. Profundidade da imagem definida entre 6 e 10 mm.

Posição		Posição <i>array</i>										Desvio padrão	TOF L _{cr} (ns)
Amostra	L _{cr}	1	2	3	4	5	6	7	8	Média			
25	3	40,2	39,9	40,2	40,0	40,5	40,0	39,8	39,8	40,0	0,3	34.977	
25	4	40,2	40,0	40,3	40,2	40,2	40,2	40,1	40,1	40,2	0,1	34.977	
21	3	39,4	39,7	40,1	40,1	40,2	40,0	39,4	40,4	39,9	0,4	34.966	
21	4	40,0	39,6	39,9	39,9	40,1	40,0	39,4	39,5	39,8	0,3	34.960	
24	3	40,0	40,1	40,0	39,8	39,7	39,8	39,9	40,0	39,9	0,1	34.972	
24	4	40,1	40,2	39,9	39,9	40,0	40,1	40,0	40,1	40,0	0,1	34.964	
17	3	40,0	40,0	40,2	40,0	39,9	39,8	40,0	39,9	40,0	0,1	35.019	
17	4	39,9	40,3	39,5	40,0	40,0	39,9	39,5	39,9	39,9	0,2	35.039	
9	3	39,7	39,2	40,0	40,0	39,7	39,9	39,3	40,1	39,7	0,3	35.001	
9	4	40,0	39,7	40,1	39,8	39,4	39,9	39,9	40,2	39,9	0,2	35.013	
15	3	40,3	40,2	40,2	40,4	40,5	40,1	40,4	40,4	40,3	0,1	34.984	
15	4	40,1	40,2	40,2	40,3	40,3	40,3	40,5	40,2	40,3	0,1	34.984	
16	3	40,0	39,5	39,8	39,9	39,5	40,0	40,1	40,2	39,9	0,3	35.019	
16	4	40,3	39,7	39,6	39,9	39,8	39,9	40,2	40,1	39,9	0,2	35.008	
19	3	40,5	40,0	40,1	40,4	40,0	40,3	40,5	40,2	40,2	0,2	34.995	
19	4	40,2	40,1	40,0	40,3	39,7	40,0	40,4	40,2	40,1	0,2	34.986	
10	3	40,2	40,6	40,2	40,3	40,3	40,3	40,5	40,4	40,3	0,1	34.988	
10	4	40,5	40,2	40,0	40,1	40,3	40,2	40,3	40,3	40,2	0,2	34.988	
8	3	40,2	39,7	40,1	40,3	40,6	40,1	39,8	39,7	40,1	0,3	34.950	
8	4	40,3	40,1	40,5	40,2	40,0	40,3	39,5	40,0	40,1	0,3	34.956	

Tabela D.3. SNRs medidos, em dB, para a onda Lcr se propagando na direção transversal à direção de laminação. Profundidade da imagem definida entre 10 e 14 mm.

Posição		Posição <i>array</i>									Desvio	TOF
Amostra	L _{cr}	1	2	3	4	5	6	7	8	Média	padrão	L _{cr} (ns)
25	1	48,6	49,8	49,2	49,6	49,1	49,1	49,3	49,6	49,3	0,4	34.724
25	2	49,3	49,7	49,6	49,6	49,1	49,7	49,0	49,5	49,4	0,3	34.715
21	1	49,7	49,3	49,2	49,4	49,3	49,3	49,2	49,5	49,4	0,2	34.718
21	2	49,7	49,6	49,4	49,5	49,2	49,4	49,5	49,6	49,5	0,2	34.724
24	1	48,5	49,1	49,3	49,2	49,1	49,0	49,1	49,3	49,1	0,2	34.723
24	2	49,1	49,2	49,2	49,0	49,0	49,2	49,4	49,1	49,2	0,1	34.729
17	1	49,3	48,9	49,0	49,0	48,5	48,4	48,3	49,3	48,9	0,4	34.727
17	2	49,2	48,9	47,3	49,0	48,9	49,1	48,7	48,5	48,7	0,6	34.721
9	1	48,6	47,8	48,4	49,0	47,3	48,6	46,5	48,9	48,1	0,9	34.730
9	2	48,8	48,0	49,0	48,4	48,6	48,1	48,5	48,9	48,5	0,4	34.739
15	1	49,1	49,2	49,2	49,3	49,1	48,7	48,7	49,3	49,1	0,2	34.707
15	2	49,4	49,4	49,2	49,3	49,4	49,3	49,6	49,3	49,4	0,1	34.723
16	1	49,2	49,2	49,3	48,9	49,3	49,3	49,3	48,8	49,2	0,2	34.730
16	2	49,2	49,2	48,7	48,8	48,8	49,1	49,1	49,3	49,0	0,2	34.753
19	1	49,5	49,3	49,3	49,0	49,1	49,2	49,0	49,3	49,2	0,2	34.743
19	2	49,6	49,5	49,4	49,4	49,5	49,6	49,4	49,2	49,5	0,1	34.741
10	1	46,7	49,3	48,8	48,7	49,3	49,2	49,5	49,0	48,8	0,9	34.725
10	2	49,1	49,2	49,3	49,2	49,4	48,8	48,7	49,0	49,1	0,2	34.726
8	1	49,0	48,9	49,4	49,1	49,1	49,1	49,1	49,2	49,1	0,1	34.684
8	2	49,1	48,5	48,8	48,8	49,0	49,0	48,8	49,1	48,9	0,2	34.693

Tabela D.4. SNRs medidos, em dB, para a onda Lcr se propagando na direção paralela à direção de laminação. Profundidade da imagem definida entre 10 e 14 mm.

Posição		Posição <i>array</i>										Desvio padrão	TOF L _{cr} (ns)
Amostra	L _{cr}	1	2	3	4	5	6	7	8	Média			
25	3	45,1	45,1	44,0	44,7	44,3	44,8	44,0	44,2	44,5	0,5	34.977	
25	4	44,6	45,0	44,6	44,8	45,0	44,8	44,3	44,3	44,7	0,3	34.977	
21	3	44,4	44,3	44,6	44,4	44,9	44,8	44,4	44,9	44,6	0,2	34.966	
21	4	44,4	44,4	44,6	44,5	44,7	44,8	44,5	44,6	44,6	0,1	34.960	
24	3	44,7	44,7	44,6	44,6	44,3	44,6	44,5	44,6	44,6	0,1	34.972	
24	4	44,7	44,8	44,4	44,6	44,7	44,8	44,8	45,0	44,7	0,2	34.964	
17	3	43,7	44,6	44,8	44,4	44,3	44,2	43,6	44,0	44,2	0,4	35.019	
17	4	44,1	44,8	44,3	44,4	44,5	42,7	44,4	44,6	44,2	0,7	35.039	
9	3	44,3	43,4	44,1	44,5	44,1	43,6	44,2	44,4	44,1	0,4	35.001	
9	4	44,4	43,6	44,1	44,1	43,8	43,6	43,2	44,7	43,9	0,5	35.013	
15	3	44,4	44,8	44,7	44,9	45,0	45,0	44,9	42,5	44,5	0,8	34.984	
15	4	44,7	44,9	44,9	45,2	45,1	45,0	44,9	45,1	45,0	0,2	34.984	
16	3	44,5	44,5	44,4	44,4	44,1	44,2	44,3	44,7	44,4	0,2	35.019	
16	4	44,4	44,4	43,0	44,3	43,8	44,4	44,7	44,5	44,2	0,5	35.008	
19	3	45,1	44,6	44,6	44,6	44,4	44,6	44,8	44,8	44,7	0,2	34.995	
19	4	44,8	44,7	44,6	44,6	44,2	44,4	44,8	44,8	44,6	0,2	34.986	
10	3	44,8	44,6	44,3	44,3	44,5	44,5	44,5	44,7	44,5	0,2	34.988	
10	4	44,4	44,6	43,9	44,3	44,6	44,1	44,6	44,4	44,3	0,3	34.988	
8	3	45,0	44,1	44,8	45,0	44,6	44,6	44,1	44,1	44,5	0,4	34.950	
8	4	44,8	44,8	45,0	44,6	43,6	44,8	43,8	44,4	44,5	0,5	34.956	

APÊNDICE E – Relações sinal-ruído obtidas para ensaio de verificação da influência da posição de medição no ruído de imagens ultrassônicas

As relações sinal-ruído (SNR) medidas em imagens de TFM para diferentes pontos nas amostras de aço ASTM A36 são apresentadas neste Apêndice. Os pontos de medição foram mostrados na Figura 4.31. Nas Tabelas de E.1 a E.10, são apresentados os SNRs para a profundidade de imagem entre 6 e 10 mm, por amostra. Nas Tabelas de E.11 a E.20 são mostrados os mesmos resultados, mas para a profundidade de imagem de TFM entre 10 e 14 mm. Os tempos de percurso (TOF) da onda L_{cr} medidos nas posições correspondentes às posições de medição da SNR também estão presentes nas Tabelas citadas.

Tabela E.1. SNR em dB obtido de cada posição de medição da imagem de TFM na profundidade entre 6 e 10 mm (amostra n° 25).

Amostra 25	Posição <i>array</i>									TOF
Posição L_{cr}	1	2	3	4	5	6	7	8	Média	L_{cr} (ns)
1	39,6	38,2	40,4	40,2	39,2	39,8	38,1	39,3	39,34	34.966
2	40,2	39,3	40,3	40,1	39,4	40,2	40,4	39,7	39,94	34.973
3	40,2	39,9	40,2	40,0	40,5	40,0	39,8	39,8	40,04	34.977
4	40,2	40,0	40,3	40,2	40,2	40,2	40,1	40,1	40,17	34.977
5	39,5	40,4	40,2	40,3	39,9	40,1	40,1	39,5	40,00	34.967
6	39,8	39,5	40,0	40,2	40,3	40,3	40,2	40,3	40,08	34.970

Tabela E.2. SNR em dB obtido de cada posição de medição da imagem de TFM na profundidade entre 6 e 10 mm (amostra n° 21).

Amostra 21	Posição array									TOF
Posição L _{cr}	1	2	3	4	5	6	7	8	Média	L _{cr}
1	40,2	39,2	39,6	39,2	39,5	40,0	39,4	38,0	39,40	34.949
2	40,1	39,4	39,5	39,7	40,2	39,9	40,1	39,6	39,82	34.955
3	39,4	39,7	40,1	40,1	40,2	40,0	39,4	40,4	39,92	34.966
4	40,0	39,6	39,9	39,9	40,1	40,0	39,4	39,5	39,81	34.960
5	39,8	40,1	39,7	39,5	39,4	39,6	39,9	38,9	39,61	34.959
6	39,5	40,0	40,0	39,6	38,8	39,4	39,5	37,5	39,29	34.959

Tabela E.3. SNR em dB obtido de cada posição de medição da imagem de TFM na profundidade entre 6 e 10 mm (amostra n° 24).

Amostra 24	Posição array									TOF
Posição L _{cr}	1	2	3	4	5	6	7	8	Média	L _{cr}
1	39,4	39,8	39,3	39,7	39,8	40,0	39,8	39,8	39,69	34.975
2	39,9	39,6	39,9	39,8	39,7	39,8	39,9	39,0	39,72	34.975
3	40,0	40,1	40,0	39,8	39,7	39,8	39,9	40,0	39,93	34.972
4	40,1	40,2	39,9	39,9	40,0	40,1	40,0	40,1	40,05	34.964
5	40,1	40,3	40,1	40,2	39,8	39,8	40,2	40,1	40,07	34.956
6	39,3	40,2	39,5	39,5	39,7	39,7	39,6	40,0	39,69	34.969

Tabela E.4. SNR em dB obtido de cada posição de medição da imagem de TFM na profundidade entre 6 e 10 mm (amostra n° 17).

Amostra 17	Posição array									TOF
Posição L _{cr}	1	2	3	4	5	6	7	8	Média	L _{cr}
1	40,6	40,1	40,3	40,1	40,2	39,8	39,6	39,9	40,08	35.028
2	40,3	40,2	40,0	39,9	40,3	39,9	39,8	39,3	39,99	35.019
3	40,0	40,0	40,2	40,0	39,9	39,8	40,0	39,9	39,99	35.019
4	39,9	40,3	39,5	40,0	40,0	39,9	39,5	39,9	39,86	35.039
5	40,2	40,3	39,9	40,2	40,3	39,9	40,1	40,1	40,12	35.014
6	38,2	39,8	39,6	39,5	40,3	38,2	38,9	39,8	39,30	35.005

Tabela E.5. SNR em dB obtido de cada posição de medição da imagem de TFM na profundidade entre 6 e 10 mm (amostra n° 9).

Amostra 9	Posição <i>array</i>									TOF
Posição L_{cr}	1	2	3	4	5	6	7	8	Média	L_{cr}
1	40,2	39,2	40,3	39,8	39,4	40,0	40,2	40,4	39,95	35.008
2	40,0	39,3	39,8	40,2	39,9	40,1	40,1	40,3	39,99	35.003
3	39,7	39,2	40,0	40,0	39,7	39,9	39,3	40,1	39,74	35.001
4	40,0	39,7	40,1	39,8	39,4	39,9	39,9	40,2	39,90	35.013
5	40,4	39,8	40,0	40,0	39,9	39,9	40,0	40,3	40,04	35.006
6	40,1	39,8	40,2	40,0	40,2	39,7	40,4	40,3	40,10	35.013

Tabela E.6. SNR em dB obtido de cada posição de medição da imagem de TFM na profundidade entre 6 e 10 mm (amostra n° 15).

Amostra 15	Posição <i>array</i>									TOF
Posição L_{cr}	1	2	3	4	5	6	7	8	Média	L_{cr}
1	40,7	40,0	39,3	40,2	40,0	39,7	40,5	39,6	40,01	34.988
2	40,2	40,3	40,1	40,2	39,9	40,4	40,4	40,3	40,24	34.976
3	40,3	40,2	40,2	40,4	40,5	40,1	40,4	40,4	40,33	34.984
4	40,1	40,2	40,2	40,3	40,3	40,3	40,5	40,2	40,27	34.984
5	40,5	40,3	40,2	40,1	40,0	39,5	39,9	39,8	40,03	34.983
6	40,4	39,9	39,4	40,4	40,2	39,0	40,0	40,3	39,94	34.981

Tabela E.7. SNR em dB obtido de cada posição de medição da imagem de TFM na profundidade entre 6 e 10 mm (amostra n° 16).

Amostra 16	Posição <i>array</i>									TOF
Posição L_{cr}	1	2	3	4	5	6	7	8	Média	L_{cr}
1	40,3	38,9	40,1	40,0	39,0	40,3	40,3	39,9	39,86	34.996
2	39,9	39,1	39,4	39,8	39,1	39,9	40,2	40,1	39,69	35.004
3	40,0	39,5	39,8	39,9	39,5	40,0	40,1	40,2	39,89	35.019
4	40,3	39,7	39,6	39,9	39,8	39,9	40,2	40,1	39,93	35.008
5	40,1	40,0	39,9	40,2	39,7	39,5	40,0	40,4	39,99	34.994
6	40,5	40,0	40,5	39,9	40,0	40,2	39,6	40,4	40,12	34.992

Tabela E.8. SNR em dB obtido de cada posição de medição da imagem de TFM na profundidade entre 6 e 10 mm (amostra n° 19).

Amostra 19	Posição array									TOF
Posição L _{cr}	1	2	3	4	5	6	7	8	Média	L _{cr}
1	40,1	39,6	40,6	39,9	40,0	40,3	39,8	40,1	40,04	34.977
2	40,4	40,1	40,3	40,3	40,3	39,9	40,2	40,3	40,22	34.985
3	40,5	40,0	40,1	40,4	40,0	40,3	40,5	40,2	40,23	34.995
4	40,2	40,1	40,0	40,3	39,7	40,0	40,4	40,2	40,11	34.986
5	40,5	38,4	40,1	39,5	40,2	39,9	40,4	40,6	39,94	34.978
6	40,2	39,1	40,4	40,6	40,6	39,6	39,9	40,0	40,05	34.988

Tabela E.9. SNR em dB obtido de cada posição de medição da imagem de TFM na profundidade entre 6 e 10 mm (amostra n° 10).

Amostra 10	Posição array									TOF
Posição L _{cr}	1	2	3	4	5	6	7	8	Média	L _{cr}
1	40,3	40,4	40,4	40,4	40,0	40,7	40,4	40,4	40,39	34.988
2	40,5	40,5	40,2	40,2	40,5	40,4	40,5	40,5	40,42	34.984
3	40,2	40,6	40,2	40,3	40,3	40,3	40,5	40,4	40,34	34.988
4	40,5	40,2	40,0	40,1	40,3	40,2	40,3	40,3	40,22	34.988
5	40,3	40,6	39,6	40,3	40,2	40,3	40,6	40,5	40,31	34.986
6	40,4	40,5	40,6	40,5	40,4	40,5	40,5	40,3	40,46	34.981

Tabela E.10. SNR em dB obtido de cada posição de medição da imagem de TFM na profundidade entre 6 e 10 mm (amostra n° 8).

Amostra 8	Posição array									TOF
Posição L _{cr}	1	2	3	4	5	6	7	8	Média	L _{cr}
1	40,1	39,1	40,0	40,0	39,4	39,9	39,8	39,7	39,73	34.937
2	40,1	38,9	40,5	40,4	40,3	40,0	39,9	39,5	39,97	34.935
3	40,2	39,7	40,1	40,3	40,6	40,1	39,8	39,7	40,06	34.950
4	40,3	40,1	40,5	40,2	40,0	40,3	39,5	40,0	40,11	34.956
5	40,2	40,7	40,1	40,2	39,9	39,6	39,3	39,8	39,98	34.945
6	39,9	39,7	39,8	40,1	39,9	40,1	40,1	39,9	39,95	34.960

Tabela E.11. SNR em dB obtido de cada posição de medição da imagem de TFM na profundidade entre 10 e 14 mm (amostra n° 25).

Amostra 25	Posição array									TOF
Posição L _{cr}	1	2	3	4	5	6	7	8	Média	L _{cr}
1	44,7	43,1	44,8	43,3	44,8	44,9	43,9	44,2	44,22	34.966
2	44,8	44,6	45,0	44,7	43,7	44,5	44,7	44,6	44,58	34.973
3	45,1	45,1	44,0	44,7	44,3	44,8	44,0	44,2	44,51	34.977
4	44,6	45,0	44,6	44,8	45,0	44,8	44,3	44,3	44,67	34.977
5	45,2	45,2	45,0	44,6	44,5	44,6	44,7	44,4	44,76	34.967
6	44,7	44,3	44,8	44,8	45,5	45,1	43,2	44,7	44,65	34.970

Tabela E.12. SNR em dB obtido de cada posição de medição da imagem de TFM na profundidade entre 10 e 14 mm (amostra n° 21).

Amostra 21	Posição array									TOF
Posição L _{cr}	1	2	3	4	5	6	7	8	Média	L _{cr}
1	44,7	44,6	44,5	44,5	44,5	45,0	44,4	44,0	44,53	34.949
2	44,7	44,5	44,3	44,7	44,9	44,7	44,9	44,4	44,63	34.955
3	44,4	44,3	44,6	44,4	44,9	44,8	44,4	44,9	44,59	34.966
4	44,4	44,4	44,6	44,5	44,7	44,8	44,5	44,6	44,57	34.960
5	44,6	44,4	44,4	44,5	44,4	44,5	44,8	44,5	44,52	34.959
6	44,5	44,8	44,8	44,6	44,8	44,3	44,7	42,5	44,35	34.959

Tabela E.13. SNR em dB obtido de cada posição de medição da imagem de TFM na profundidade entre 10 e 14 mm (amostra n° 24).

Amostra 24	Posição array									TOF
Posição L _{cr}	1	2	3	4	5	6	7	8	Média	L _{cr}
1	44,4	44,5	44,0	44,6	44,4	44,7	44,5	44,5	44,44	34.975
2	44,7	44,1	44,6	44,4	44,5	44,2	44,5	44,6	44,45	34.975
3	44,7	44,7	44,6	44,6	44,3	44,6	44,5	44,6	44,58	34.972
4	44,7	44,8	44,4	44,6	44,7	44,8	44,8	45,0	44,72	34.964
5	44,8	44,9	44,9	44,9	44,4	44,6	44,8	44,8	44,75	34.956
6	44,3	44,8	44,4	44,7	44,4	44,3	44,6	44,9	44,56	34.969

Tabela E.14. SNR em dB obtido de cada posição de medição da imagem de TFM na profundidade entre 10 e 14 mm (amostra n° 17).

Amostra 17	Posição <i>array</i>									TOF
Posição L_{cr}	1	2	3	4	5	6	7	8	Média	L_{cr}
1	45,8	44,0	45,2	44,6	44,8	44,5	44,4	43,5	44,61	35.028
2	44,9	44,3	44,1	43,0	43,4	43,4	44,3	44,3	43,96	35.019
3	43,7	44,6	44,8	44,4	44,3	44,2	43,6	44,0	44,21	35.019
4	44,1	44,8	44,3	44,4	44,5	42,7	44,4	44,6	44,21	35.039
5	44,5	44,9	44,4	44,9	44,8	44,6	44,5	44,8	44,67	35.014
6	43,7	44,7	45,0	44,6	44,9	43,9	44,1	44,7	44,46	35.005

Tabela E.15. SNR em dB obtido de cada posição de medição da imagem de TFM na profundidade entre 10 e 14 mm (amostra n° 9).

Amostra 9	Posição <i>array</i>									TOF
Posição L_{cr}	1	2	3	4	5	6	7	8	Média	L_{cr}
1	44,7	44,0	44,5	44,3	44,3	44,5	44,4	44,4	44,40	35.008
2	44,6	43,1	42,2	44,6	44,2	44,1	44,5	44,6	44,00	35.003
3	44,3	43,4	44,1	44,5	44,1	43,6	44,2	44,4	44,08	35.001
4	44,4	43,6	44,1	44,1	43,8	43,6	43,2	44,7	43,93	35.013
5	43,5	42,4	43,3	43,6	42,0	44,1	43,1	44,6	43,34	35.006
6	44,3	44,0	44,4	44,2	44,7	44,4	44,7	44,6	44,40	35.013

Tabela E.16. SNR em dB obtido de cada posição de medição da imagem de TFM na profundidade entre 10 e 14 mm (amostra n° 15).

Amostra 15	Posição <i>array</i>									TOF
Posição L_{cr}	1	2	3	4	5	6	7	8	Média	L_{cr}
1	45,1	44,9	44,6	44,7	44,8	44,8	45,2	44,6	44,86	34.988
2	44,7	44,9	43,6	44,9	44,8	44,9	45,1	45,0	44,74	34.976
3	44,4	44,8	44,7	44,9	45,0	45,0	44,9	42,5	44,52	34.984
4	44,7	44,9	44,9	45,2	45,1	45,0	44,9	45,1	44,97	34.984
5	44,9	44,9	44,9	44,9	44,7	44,8	44,9	44,8	44,84	34.983
6	44,9	44,7	44,1	44,9	45,0	44,6	44,6	45,2	44,76	34.981

Tabela E.17. SNR em dB obtido de cada posição de medição da imagem de TFM na profundidade entre 10 e 14 mm (amostra n° 16).

Amostra 16	Posição <i>array</i>									TOF
Posição L_{cr}	1	2	3	4	5	6	7	8	Média	L_{cr}
1	45,0	44,6	44,9	44,7	44,5	45,1	44,9	44,8	44,80	34.996
2	44,4	44,2	44,2	44,3	44,1	44,3	44,7	44,7	44,33	35.004
3	44,5	44,5	44,4	44,4	44,1	44,2	44,3	44,7	44,40	35.019
4	44,4	44,4	43,0	44,3	43,8	44,4	44,7	44,5	44,19	35.008
5	44,6	44,8	44,4	44,5	44,3	43,7	44,4	44,7	44,41	34.994
6	45,0	44,6	44,8	44,6	44,6	44,5	44,4	44,9	44,68	34.992

Tabela E.18. SNR em dB obtido de cada posição de medição da imagem de TFM na profundidade entre 10 e 14 mm (amostra n° 19).

Amostra 19	Posição <i>array</i>									TOF
Posição L_{cr}	1	2	3	4	5	6	7	8	Média	L_{cr}
1	44,8	44,6	45,1	44,5	44,7	44,8	44,6	44,7	44,72	34.977
2	45,0	44,5	44,8	44,9	44,7	44,7	44,9	44,6	44,78	34.985
3	45,1	44,6	44,6	44,6	44,4	44,6	44,8	44,8	44,70	34.995
4	44,8	44,7	44,6	44,6	44,2	44,4	44,8	44,8	44,62	34.986
5	44,9	44,0	44,8	44,3	44,7	44,5	45,0	45,0	44,63	34.978
6	45,0	44,4	44,9	44,9	45,0	44,6	44,7	45,0	44,81	34.988

Tabela E.19. SNR em dB obtido de cada posição de medição da imagem de TFM na profundidade entre 10 e 14 mm (amostra n° 10).

Amostra 10	Posição <i>array</i>									TOF
Posição L_{cr}	1	2	3	4	5	6	7	8	Média	L_{cr}
1	44,9	45,0	44,1	44,8	44,3	44,6	44,5	44,7	44,63	34.988
2	44,7	44,7	44,3	44,9	42,9	44,5	43,0	44,6	44,19	34.984
3	44,8	44,6	44,3	44,3	44,5	44,5	44,5	44,7	44,52	34.988
4	44,4	44,6	43,9	44,3	44,6	44,1	44,6	44,4	44,35	34.988
5	44,7	44,8	44,1	44,6	43,6	44,3	45,0	44,9	44,51	34.986
6	42,9	44,1	45,0	44,6	44,9	44,8	44,7	44,8	44,47	34.981

Tabela E.20. SNR em dB obtido de cada posição de medição da imagem de TFM na profundidade entre 10 e 14 mm (amostra n° 8).

Amostra 8	Posição <i>array</i>									TOF
Posição L_{cr}	1	2	3	4	5	6	7	8	Média	L_{cr}
1	44,9	44,0	44,8	44,8	44,4	44,8	44,5	44,3	44,54	34.937
2	45,0	44,0	45,2	45,2	44,9	44,5	44,2	44,0	44,63	34.935
3	45,0	44,1	44,8	45,0	44,6	44,6	44,1	44,1	44,54	34.950
4	44,8	44,8	45,0	44,6	43,6	44,8	43,8	44,4	44,48	34.956
5	44,9	45,3	45,0	44,9	44,6	44,4	44,1	44,0	44,67	34.945
6	42,7	44,8	44,6	45,1	44,8	44,6	44,6	44,4	44,46	34.960

APÊNDICE F – Relações sinal-ruído obtidas para ensaio de verificação da influência da tensão no ruído de imagens ultrassônicas

Neste apêndice são apresentadas as relações sinal ruído obtidas nas oito posições de medição do *array* conforme Figura 4.32 para cada nível de pressão aplicado na bomba hidráulica do dispositivo tracionador e para cada uma das três repetições do ensaio realizadas. Na Tabela F.1 são mostrados os resultados de SNR e também o TOF da onda L_{cr} para cada medição correspondente.

Tabela F.1. SNR em dB por posição de medição do *array* nos ensaios para verificação da influência da tensão na intensidade do ruído nas imagens de TFM.

Ensaio	Pressão (MPa)	Posições de medição do <i>array</i>								Média	TOF L_{cr} (ns)
		1	2	3	4	5	6	7	8		
1	0	36,2	36,4	32,6	36,0	36,3	36,3	36,3	36,3	35,8	34.968
	5	36,4	36,4	36,3	36,2	36,5	36,5	36,3	36,4	36,4	34.978
	10	36,6	36,6	36,3	35,1	36,6	36,3	36,5	36,1	36,3	34.988
	15	36,1	36,6	36,3	36,3	36,2	36,4	36,3	36,3	36,3	34.997
2	0	36,3	36,5	36,4	36,3	36,5	36,5	36,1	36,3	36,4	34.969
	5	35,9	36,5	36,4	36,3	36,4	36,0	36,3	36,0	36,2	34.977
	10	36,0	36,2	36,5	36,5	36,5	36,4	36,4	35,9	36,3	34.984
	15	36,3	36,7	36,5	36,4	36,5	36,8	36,5	36,1	36,5	34.992
3	0	35,7	36,5	36,6	36,3	36,5	36,4	36,4	36,2	36,3	34.959
	5	36,3	36,2	36,5	36,4	36,3	36,4	36,5	36,4	36,4	34.971
	10	36,5	36,5	36,5	36,5	36,6	36,5	36,6	36,4	36,5	34.982
	15	36,6	36,5	36,5	36,4	36,7	36,5	36,3	36,5	36,5	34.990