MARCELO YASSUNORI MATUDA

**Formação de imagens de peças com superfícies curvas utilizando *arrays*
ultrassônicos**

São Paulo

2014

MARCELO YASSUNORI MATUDA

**Formação de imagens de peças com superfícies curvas utilizando *arrays*
ultrassônicos**

Tese apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção do
título de Doutor em Engenharia

São Paulo

2014

MARCELO YASSUNORI MATUDA

**Formação de imagens de peças com superfícies curvas utilizando *arrays*
ultrassônicos**

Tese apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção do
título de Doutor em Engenharia

Área de Concentração:
Engenharia de Controle e
Automação Mecânica

Orientador:
Prof. Dr. Julio Cezar Adamowski

Coorientador:
Prof. Dr. Flávio Buiochi

São Paulo

2014

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 1 de dezembro de 2014.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

Catálogo-na-publicação

Matuda, Marcelo Yassunori

**Formação de imagens de peças com superfícies curvas
utilizando arrays ultrassônicos / M.Y. Matuda. -- versão corr. --
São Paulo, 2014.**

117 p.

**Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de
São Paulo. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de
Sistemas Mecânicos.**

**1.Ensaio não destrutivo 2.Ultrassom 3.Processamento de
imagens I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Depar-
tamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos
II.t.**

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Julio C. Adamowski pela paciência, encorajamento e por compartilhar sua experiência.

Ao Prof. Dr. Flávio Buiochi pelo importante auxílio na parte teórica e nos experimentos.

Ao Agesinaldo pelo corpo de prova utilizado nos experimentos iniciais.

Aos demais colegas e técnicos do Laboratório de Ultrassom pela troca de idéias e auxílio nos experimentos.

À CAPES pela bolsa de Doutorado recebida durante o curso.

À FAPESP e à Petrobras/ANP pelos equipamentos utilizados neste trabalho.

A todos os desenvolvedores de *software* livre/aberto.

RESUMO

Em formação de imagens por ultrassom de objetos com superfícies curvas, em imersão, se as velocidades de propagação no fluido e no objeto forem muito diferentes os efeitos de refração precisam ser compensados. Nesse caso a posição e a forma da superfície precisam ser conhecidas. Neste trabalho a superfície é detectada pelo mesmo *array* linear que captura os sinais para a formação de imagem. Dois métodos rápidos de detecção de superfície foram propostos, um baseado em técnicas de formação de imagem e outro que utiliza informações de tempo de percurso de ecos extraídas diretamente dos sinais de ultrassom. Os dois métodos foram comparados, e o método baseado em imagem apresentou uma maior tolerância a erros nos sinais, enquanto o método baseado em tempo de percurso mostrou-se mais rápido. Com a superfície detectada, a imagem foi formada por combinação de imagens por abertura sintética, que apresentou uma boa resolução. O uso conjunto dos métodos de detecção de superfície propostos e da formação de imagem resultou em uma taxa de imagens que permite ensaios interativos, com processamento em uma CPU de uso geral.

Palavras-chave: Formação de imagens por ultrassom. Detecção de superfície. Ensaios não destrutivos.

ABSTRACT

In ultrasound imaging of objects with curved surface, in immersion, the refraction effects must be compensated for if the propagation speed in the fluid is very different from the speed in the object. In this case the surface position and shape must be known. In this work the surface is detected by the same linear array that captures the signals for the image formation. Two fast methods for surface detection were proposed, one is based on image formation techniques and another utilizes the echo time-of-flight information directly from the ultrasound signals. The two methods were compared, and the image-based method was more tolerant of signal errors, while the time-of-flight-based method was faster. After the surface detection, the image was formed by combination of synthetic aperture images, with a good resulting resolution. The utilization of the proposed surface detection methods together with the image formation resulted in an image rate that allows interactive testing, with processing on a general-purpose CPU.

Keywords: Ultrasound imaging. Surface detection. Nondestructive testing.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – <i>Array</i> curvo.	16
Figura 2 – Acoplamento com adaptador.	16
Figura 3 – <i>Array</i> flexível.	17
Figura 4 – Câmara formada por membranas flexíveis.	17
Figura 5 – Ensaio em imersão.	18
Figura 6 – Exemplo de refração em uma interface curva.	18
Figura 7 – Incidência (a) divergente, (b) paralela e (c) convergente.	19
Figura 8 – Modelo de <i>array</i> de linhas infinitas.	26
Figura 9 – Diagrama do cálculo do campo distante para o modelo de linhas infinitas.	27
Figura 10 – Padrão de feixe para $d_p = \lambda/2$, sem apodização, para 32 elementos.	28
Figura 11 – Padrão de feixe para $d_p = 2\lambda$, sem apodização, para 32 elementos.	28
Figura 12 – Exemplo de elementos com proporções idênticas às de um transdutor <i>array</i> comercial.	30
Figura 13 – Um <i>array</i> linear e o sistema de coordenadas global utilizado.	31
Figura 14 – (a) Exemplo de <i>A-scan</i> para um refletor pontual e (b) ampliação do primeiro eco.	31
Figura 15 – Mapeamento e interpolação.	32
Figura 16 – Mapeamento. As posições do elemento transmissor e do receptor são dadas por x_E e x_R , respectivamente.	32
Figura 17 – Imagem com um elemento transmitindo (elem. 15) e um recebendo (elem. 31) em um <i>array</i> simulado de 32 elementos.	33
Figura 18 – Imagem com dois elementos transmitindo (elem. 15 e 24) e dois recebendo (elem. 10 e 31) em um <i>array</i> simulado de 32 elementos.	33
Figura 19 – Imagem com 32 elementos transmitindo e 32 recebendo em um <i>array</i> simulado de 32 elementos.	33
Figura 20 – Focalização em emissão para o ponto focal F , com (a) as frentes de onda a meio caminho e (b) as ondas sobre o ponto focal.	34
Figura 21 – Diagrama dos índices dos elementos do <i>array</i> para a formação de imagens, em transmissão.	35
Figura 22 – Diagrama dos índices dos elementos do <i>array</i> para a formação de imagens, em recepção.	35
Figura 23 – Diagrama para o cálculo dos atrasos pelo princípio de Fermat.	37
Figura 24 – Varredura (a) linear e (b) setorial. Os pontos indicam as posições dos focos.	37
Figura 25 – Cálculo dos atrasos para focalização na transmissão.	38
Figura 26 – Tempos dos sinais para imagem por varredura.	39
Figura 27 – Abertura efetiva para imagem por varredura.	39

Figura 28 – Abertura efetiva para imagem por SAFT.	40
Figura 29 – Abertura efetiva para imagem por STA.	41
Figura 30 – Ecos em sinais para (a) lóbulo central e (b) lóbulo de espaçamento.	42
Figura 31 – Exemplo de uma imagem por STA para detecção de superfície.	44
Figura 32 – O método de arcos.	45
Figura 33 – Erro devido à discretização do arco.	46
Figura 34 – Erro devido a um desvio no arco relativo ao ponto de tangência.	46
Figura 35 – O método de curva tangente.	47
Figura 36 – Diferença entre a curva tangente e a curva detectada pelo método de curva tangente.	48
Figura 37 – Formação de imagem por <i>array</i> virtual.	50
Figura 38 – <i>Array</i> Imasonic 7279.	51
Figura 39 – Sitau MX 32:128.	51
Figura 40 – Corpos de prova: (a) bloco 1 e (b) bloco 2.	52
Figura 41 – A interface gráfica do programa de processamento escrito em C++.	53
Figura 42 – Posicionamento do bloco em relação ao <i>array</i>	54
Figura 43 – Vista lateral do posicionamento do bloco em relação ao <i>array</i>	54
Figura 44 – O pulso de referência (s_{ref}).	56
Figura 45 – Comparação entre o sinal capturado e a correlação cruzada entre esse sinal e o sinal de referência s_{ref} . O início do sinal s_{ref} está posicionado no instante de valor máximo da correlação cruzada.	56
Figura 46 – Abertura efetiva para a imagem combinada, com o elemento 15 transmissor de cada grupo, sem apodização, para (a) 5 grupos, (b) 7 grupos e (c) 9 grupos.	57
Figura 47 – (a) Abertura efetiva para a imagem combinada, com o elemento 15 transmissor de cada grupo, com apodização para 9 grupos, e (b) a respectiva função de apodização na recepção.	58
Figura 48 – Padrão de feixe no campo distante para a abertura efetiva da imagem combinada, para 7 grupos e frequência de 5 MHz em água.	58
Figura 49 – Padrão de feixe no campo distante para a abertura efetiva da imagem combinada, para 9 grupos com apodização e frequência de 5 MHz em água.	59
Figura 50 – Padrão de feixe no campo distante para a abertura efetiva da imagem combinada, para 9 grupos sem apodização e frequência de 5 MHz em água.	59
Figura 51 – Abertura efetiva para a imagem por STA combinada, sem apodização para (a) 5 grupos, (b) 7 grupos, (c) 9 grupos, e (d) abertura efetiva com apodização para 9 grupos.	60
Figura 52 – Padrão de feixe no campo distante para a abertura efetiva da imagem STA combinada, para 9 grupos com apodização e frequência de 5 MHz em água.	60
Figura 53 – Padrão de feixe no campo distante para a abertura efetiva da imagem STA combinada, para 9 grupos sem apodização e frequência de 5 MHz em água.	61

Figura 54 – Detecção de superfície pelo método STA por pico de envelope: Erros entre as posições dos pontos detectados e o círculo de referência, para diferentes valores da distância d	64
Figura 55 – Detecção de superfície pelo método STA por correlação cruzada: Erros entre as posições dos pontos detectados e o círculo de referência, para diferentes valores da distância d	65
Figura 56 – Detecção de superfície pelo método STA por pico de envelope: Erros entre as posições dos pontos detectados e o círculo de referência, utilizando $\bar{x}_c$ do círculo ajustado, para diferentes valores da distância d	65
Figura 57 – Detecção de superfície pelo método STA por correlação cruzada: Erros entre as posições dos pontos detectados e o círculo de referência, utilizando $\bar{x}_c$ do círculo ajustado, para diferentes valores da distância d	66
Figura 58 – Detecção de superfície pelo método STA por pico de envelope: Erros entre as posições dos pontos detectados e o círculo de referência calibrado, para diferentes valores da distância d	67
Figura 59 – Detecção de superfície pelo método STA por pico de envelope: Erros entre as posições dos pontos detectados e o círculo ajustado, para diferentes valores da distância d	67
Figura 60 – Detecção de superfície pelo método STA por correlação cruzada: Erros entre as posições dos pontos detectados e o círculo de referência calibrado, para diferentes valores da distância d	68
Figura 61 – Detecção de superfície pelo método STA por correlação cruzada: Erros entre as posições dos pontos detectados e o círculo ajustado, para diferentes valores da distância d	68
Figura 62 – Valores normalizados da imagem ao longo do arco tangente à superfície, no método de arcos, para o grupo central de elementos, $d = 20$ mm e 17 elementos receptores ativos. Os lóbulos laterais indicados são lóbulos de espaçamento.	69
Figura 63 – Valores normalizados da imagem ao longo do arco tangente à superfície, no método de arcos, para o grupo central de elementos, $d = 20$ mm e 9 elementos receptores ativos. Os lóbulos laterais indicados são lóbulos de espaçamento.	70
Figura 64 – Valores normalizados da imagem ao longo do arco tangente à superfície, no método de arcos, para o grupo com o elemento-base 84, $d = 20$ mm e 17 elementos receptores ativos.	71
Figura 65 – Valores normalizados da imagem ao longo do arco tangente à superfície, no método de arcos, para o grupo com o elemento-base 84, $d = 20$ mm e 9 elementos receptores ativos.	71

Figura 66 – Máxima largura do lóbulo principal a -6 dB, para o método de arcos, considerando todos os grupos de elementos e todos os valores da distância d utilizados, para cada número de elementos receptores ativos.	72
Figura 67 – Máximo valor de lóbulo lateral, para o método de arcos, considerando todos os grupos de elementos e todos os valores da distância d utilizados, para cada número de elementos receptores ativos.	72
Figura 68 – Método de arcos: Erros entre as posições dos pontos detectados e o círculo de referência calibrado, para diferentes valores da distância d	73
Figura 69 – Método de arcos: Erros entre as posições dos pontos detectados e o círculo ajustado, para diferentes valores da distância d	73
Figura 70 – Método de curva tangente: Erros entre as posições dos pontos detectados e o círculo de referência calibrado, para diferentes valores da distância d	74
Figura 71 – Método de curva tangente: Erros entre as posições dos pontos detectados e o círculo ajustado, para diferentes valores da distância d	75
Figura 72 – Máximo erro absoluto entre as posições dos pontos detectados e o círculo de referência calibrado, considerando todos os valores da distância d utilizados, em função do número de elementos receptores ativos. Os resultados para os métodos de arcos e de curva tangente são mostrados.	75
Figura 73 – Sinal normal após correlação com o sinal de referência.	76
Figura 74 – Sinal após correlação com o sinal de referência, distorcido.	76
Figura 75 – Máximo valor RMS do erro entre as posições dos pontos detectados e o círculo de referência calibrado, considerando todos os valores da distância d utilizados, em função do número de elementos receptores ativos. Os resultados para os métodos de arcos e de curva tangente são mostrados.	77
Figura 76 – Imagem do bloco 1 pelo método STA para o elemento-base 48.	77
Figura 77 – Imagem do bloco 1 pelo método STA para o elemento-base 84.	78
Figura 78 – Imagem do bloco 2 pelo método STA para o elemento-base 48.	78
Figura 79 – Imagem do bloco 2 pelo método STA para o elemento-base 84.	79
Figura 80 – Imagem do bloco 1 pelo método STA, utilizando a velocidade de propagação de ondas de cisalhamento no bloco, para o elemento-base 48.	80
Figura 81 – Imagem do bloco 1 pelo método STA, utilizando a velocidade de propagação de ondas de cisalhamento no bloco, para o elemento-base 84.	80
Figura 82 – Imagem do bloco 1 por abertura sintética combinada, com espaçamento de grade $\lambda_2/4$	81
Figura 83 – Imagem do bloco 2 por abertura sintética combinada, com espaçamento de grade $\lambda_2/4$	82
Figura 84 – Imagem do bloco 1 por abertura sintética combinada, com apodização.	83
Figura 85 – Imagem do bloco 1 por abertura sintética combinada, sem apodização.	84
Figura 86 – Imagem do bloco 1 por abertura sintética combinada, com aplicação do PCF.	84

Figura 87 – Imagem do bloco 1 por abertura sintética combinada, utilizando a velocidade de propagação de ondas de cisalhamento no bloco.	85
Figura 88 – Imagem do bloco 1 por abertura sintética combinada, utilizando a velocidade de propagação de ondas de cisalhamento no bloco e o método PCF.	86
Figura 89 – Imagem do bloco 1 pelo método STA, combinada.	87
Figura 90 – Imagem do bloco 2 pelo método STA, combinada.	87
Figura 91 – Imagem do bloco 1 pelo método STA, combinada, com faixa dinâmica de 50 dB.	88
Figura 92 – Imagem do bloco 1 pelo método STA, combinada, sem apodização, com faixa dinâmica de 50 dB.	89
Figura 93 – Imagem do bloco 1 pelo método STA, combinada, com aplicação do PCF.	89
Figura 94 – Imagem do bloco 1 pelo método STA, combinada, utilizando a velocidade de propagação de ondas de cisalhamento no bloco.	90
Figura 95 – Imagem do bloco 1 pelo método STA, combinada, utilizando a velocidade de propagação de ondas de cisalhamento no bloco e o método PCF.	91
Figura 96 – Imagem do bloco 1 pelo método de <i>array</i> virtual com o princípio de Fermat, para um espaçamento de (a) λ_2 e (b) $\lambda_2/2$ entre elementos do <i>array</i> virtual.	93
Figura 97 – Imagem do bloco 1 pelo método de <i>array</i> virtual, sem o princípio de Fermat, para um espaçamento de (a) $\lambda_2/4$ e (b) $\lambda_2/8$ entre elementos do <i>array</i> virtual.	94
Figura 98 – Imagem do bloco 2 pelo método de <i>array</i> virtual com o princípio de Fermat, para um espaçamento de $\lambda_2/2$ entre elementos do <i>array</i> virtual.	95
Figura 99 – Imagem do bloco 2 pelo método de <i>array</i> virtual, sem o princípio de Fermat, para um espaçamento de $\lambda_2/8$ entre elementos do <i>array</i> virtual.	95
Figura 100 – Imagem do bloco 1 pelo método de <i>array</i> virtual com o princípio de Fermat, simulando um erro no posicionamento da interface, para um espaçamento de $\lambda_2/2$ entre elementos do <i>array</i> virtual.	97
Figura 101 – Imagem final do bloco 1 pelo método de <i>array</i> virtual com o princípio de Fermat e aplicação do PCF, para um espaçamento de $\lambda_2/2$ entre elementos do <i>array</i> virtual.	97
Figura 102 – Imagem do bloco 1 pelo método de <i>array</i> virtual com o princípio de Fermat, utilizando a velocidade de propagação de ondas de cisalhamento no bloco, para um espaçamento de $\lambda_2/4$ entre elementos do <i>array</i> virtual.	98
Figura 103 – Efeitos de erros na detecção da interface: (a) sem erros adicionados, (b) caso 1 e (c) caso 2. Os furos no bloco são indicados pelas linhas pontilhadas. A faixa dinâmica é de 40 dB.	99
Figura 104 – Fluxograma da formação de imagem para a implementação padrão.	103
Figura 105 – Fluxograma da formação de imagem para a implementação com OpenCL.	104
Figura 106 – Paralelismo de operações para (a) <i>buffer</i> simples e execução síncrona, (b) <i>buffer</i> simples e execução assíncrona e (c) <i>buffer</i> duplo e execução assíncrona.	107
Figura 107 – Dimensões do bloco 1.	114

Figura 108 – Dimensões do bloco 2.	114
Figura 109 – Detecção de envelope para um sinal normal.	117
Figura 110 – Detecção de envelope para um sinal com nível DC não nulo.	117
Figura 111 – Detecção de envelope para um sinal truncado.	117

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	–	Número de elementos utilizados no <i>array</i> virtual, para ondas longitudinais.	91
Tabela 2	–	Tempos de execução para o método de <i>array</i> virtual.	96
Tabela 3	–	Tempos de execução em CPU.	101
Tabela 4	–	Tempos de execução em milisegundos da formação de imagem com OpenCL para vários modos de organização dos dados em memória.	106
Tabela 5	–	Tempos de execução da formação de imagem com OpenCL em GPU.	106

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CPU	<i>Central processing unit</i>
END	Ensaio não destrutivo
FLOPS	<i>Floating-point operations per second</i>
FPGA	<i>Field-programmable gate array</i>
GPU	<i>Graphics processing unit</i>
PC	<i>Personal computer</i>
PCF	<i>Phase coherence factor</i>
PRF	<i>Pulse repetition frequency</i>
RAM	<i>Random-access memory</i>
RMS	<i>Root mean square</i>
SAFT	<i>Synthetic aperture focusing technique</i>
SIMD	<i>Single instruction, multiple data</i>
STA	<i>Synthetic transmit aperture</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Apresentação do problema	16
1.1.1	Classificação da detecção de superfície por origem dos dados	19
1.1.2	Classificação por incidência da onda	19
1.2	Revisão bibliográfica	20
1.2.1	Detecção de superfície	20
1.2.2	Formação de imagens através de superfícies curvas	21
1.3	Objetivos	23
1.4	Motivação	24
1.5	Organização do trabalho	24
2	FORMAÇÃO DE IMAGENS COM ARRAYS ULTRASSÔNICOS	25
2.1	Introdução	25
2.2	Princípios básicos	25
2.3	Padrão de feixe para campo distante	26
2.4	Abertura efetiva	28
2.5	Transdutores reais	29
2.6	Formação de imagem	30
2.6.1	Princípio de Fermat	36
2.6.2	Métodos	36
2.6.2.1	<i>Varredura</i>	37
2.6.2.2	<i>SAFT</i>	39
2.6.2.3	<i>STA</i>	40
2.7	Método <i>Phase Coherence Factor</i> (PCF)	41
3	TÉCNICAS PARA FORMAÇÃO DE IMAGENS DE OBJETOS COM SUPERFÍCIES CURVAS	43
3.1	Detecção de superfície	43
3.1.1	Método por STA	43
3.1.2	Método de arcos	44
3.1.3	Método de curva tangente	46
3.2	Formação de imagem com compensação da refração	48
3.2.1	Formação de imagem por STA	49
3.2.2	Formação de imagem por abertura sintética combinada	49
3.2.3	Formação de imagem por STA combinada	49
3.2.4	Formação de imagem por <i>array</i> virtual	49

4	MATERIAIS E MÉTODOS	51
4.1	Local e equipamentos	51
4.2	Corpos de prova	52
4.3	Processamento	52
4.4	Convenções	54
4.5	Montagem do experimento	54
4.6	Cálculo da velocidade de propagação na água	55
4.7	Calibração do sistema de aquisição	55
4.8	Seleção dos grupos de elementos	56
4.9	Preparação dos sinais	59
4.10	Deteção de superfície	61
4.11	Ajuste de curva	62
4.12	Formação de imagem	62
5	RESULTADOS EXPERIMENTAIS	64
5.1	Deteção de superfície por STA	64
5.2	Deteção de superfície pelo método de arcos	69
5.3	Deteção de superfície pelo método de curva tangente	72
5.4	Comparação dos resultados pelos métodos de arcos e de curva tangente	74
5.5	Formação de imagem por STA	76
5.5.1	Ondas de cisalhamento	79
5.6	Formação de imagem por abertura sintética combinada	81
5.6.1	Imagem sem apodização	83
5.6.2	Aplicação do método PCF	83
5.6.3	Ondas de cisalhamento	85
5.6.4	Ondas de cisalhamento com o método PCF	85
5.7	Formação de imagem por STA combinada	86
5.7.1	Imagem sem apodização	88
5.7.2	Aplicação do método PCF	88
5.7.3	Ondas de cisalhamento	88
5.7.4	Ondas de cisalhamento com o método PCF	90
5.8	Formação de imagem por <i>array</i> virtual	90
5.8.1	Simulação de erro de posicionamento da interface	96
5.8.2	Aplicação do método PCF	96
5.8.3	Ondas de cisalhamento	98
5.9	Efeitos de erros na deteção de superfície	99
5.10	Desempenho em uma CPU de uso genérico	99
5.11	Desempenho com OpenCL	101
6	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	108

6.1	Conclusões	108
6.2	Trabalhos futuros	109
	REFERÊNCIAS	110
	APÊNDICE A – DIMENSÕES DOS CORPOS DE PROVA	114
	APÊNDICE B – <i>KERNELS</i> OPENCL	115
B.1	<i>Kernel</i> para imagem sem PCF	115
B.2	<i>Kernel</i> para imagem com PCF	116
	APÊNDICE C – EXEMPLOS DE DETECÇÃO DE ENVELOPE	117

1 INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação do problema

Em formação de imagens com *array* de ultrassom para ensaios não destrutivos (END), quando a superfície do objeto sob teste é plana o *array* é colocado em contato direto com o objeto, ou utiliza-se uma cunha como adaptador se o objetivo é utilizar ondas de cisalhamento no interior do objeto. Quando a superfície é curva mas a geometria do ensaio é constante, são utilizados *arrays* curvos (fig. 1) ou adaptadores sólidos (fig. 2). Porém quando o formato do objeto ou a sua posição em relação ao *array* são variáveis, *arrays* curvos ou adaptadores sólidos não são adequados, pois eles precisariam ser trocados frequentemente. Uma boa solução é a utilização de *arrays* flexíveis (fig. 3), cujos elementos adaptam-se à superfície do objeto. Como os elementos estão em contato direto com o objeto, somente um meio de propagação precisa ser considerado. Os *arrays* flexíveis são capazes de formar imagens em tempo real (CASULA et al., 2006) quando combinados a sensores de posição dos elementos do *array*, para que a geometria da superfície seja levada em conta nos cálculos para a formação da imagem. O problema dos *arrays* flexíveis é a maior complexidade mecânica e eletrônica em relação a *arrays* convencionais. Consequentemente, com a tecnologia atual, o custo é uma desvantagem dos *arrays* flexíveis.

Figura 1 – Array curvo.

Figura 2 – Acoplamento com adaptador.

Outra opção é o uso de materiais flexíveis ou fluidos como acoplamento. Quando o acoplamento é fluido, pode-se utilizar uma câmara formada por membranas flexíveis (fig. 4) (LONG; CAWLEY, 2007), ou imersão (fig. 5) (MATUDA; BUIOCHI; ADAMOWSKI, 2012). O uso de água como material de acoplamento tem como vantagens baixas perdas, baixo custo e pequeno comprimento de onda. Além disso, a água se ajusta perfeitamente ao objeto, e a ausência de

Figura 3 – Array flexível.

contato do transdutor com o objeto evita o desgaste do transdutor. Porém as ondas precisam passar duas vezes por uma interface água-metal, no caso de um objeto metálico, causando perdas adicionais em relação a uma medição com contato direto. Por exemplo, para interface plana entre água e alumínio, e ondas planas com incidência normal, o coeficiente de transmissão de pressão (ida e volta) vale $4Z_1Z_2/(Z_1 + Z_2)^2 = 0,3$, onde $Z = \rho c$. Quando o transdutor não está em contato com o objeto, se a velocidade de propagação no material de acoplamento for muito diferente da velocidade no objeto, a refração na interface precisa ser levada em conta. A compensação da refração requer o conhecimento do formato e da posição da interface. Se a interface for detectada com o próprio array, o custo da parte mecânica poderá ser menor, pois sensores de posição adicionais não serão necessários. Por outro lado, a complexidade do processamento será maior, devido à compensação da refração, e um sensor de temperatura pode ser necessário se a velocidade de propagação no meio de acoplamento variar muito com a temperatura.

Figura 4 – Câmara formada por membranas flexíveis.

No processo de formação de imagens, os ecos nos sinais ultrassônicos, capturados pelo equipamento de aquisição, precisam ser mapeados para os pontos correspondentes na imagem. Isto é, as distâncias na imagem precisam ser convertidas em informação de tempo nos sinais. Se as velocidades de propagação nos meios forem conhecidas, basta determinar as trajetórias das ondas. De acordo com o princípio de Fermat, considera-se a trajetória com tempo de percurso mínimo (SCHUSTER, 1909). Quando há somente um meio de propagação, a trajetória mais rápida de um ponto a outro é um segmento de reta. Quando há dois ou mais meios, a busca pela trajetória mais rápida pode ter um custo alto em termos de processamento. Para ondas planas e

Figura 5 – Ensaio em imersão.

interface plana, o princípio de Fermat é equivalente à lei de Snell (SCHMERR JR., 1998, p. 115). Para ondas e interfaces genéricas o problema é mais complexo, mas efeitos semelhantes aos da lei de Snell podem ser esperados, ou seja, grandes desvios de trajetória quando há diferenças significativas entre as velocidades de propagação nos meios. Esses efeitos de refração devem ser levados em consideração, caso contrário a imagem não terá qualidade suficiente. Na fig. 6 pode ser visto um exemplo dos efeitos de refração.

Figura 6 – Exemplo de refração em uma interface curva.

A inspeção de objetos com superfícies desconhecidas, utilizando compensação automática de refração, pode ser dividida em três passos:

1. Detecção da superfície do objeto.
2. Ajuste de curva.
3. Formação de imagem.

No primeiro passo a superfície do objeto é detectada. Nesse passo, a superfície pode ser obtida diretamente, como nos métodos de segmentação (KEITMANN-CURDES et al., 2006), ou são obtidos pontos que representam a superfície. Nesse caso, uma curva é ajustada a esses pontos no segundo passo. No terceiro passo, a superfície é tratada como interface entre dois meios de

propagação, que são o material de acoplamento e o material do objeto. Para cada combinação de elemento transmissor, elemento receptor e ponto na grade da imagem, é determinado o caminho mais rápido de acordo com o princípio de Fermat. O tempo de percurso do caminho mais rápido é então utilizado para selecionar a amostra correta no sinal de ultrassom respectivo, amostra cujo valor é utilizado em um ponto da imagem.

1.1.1 Classificação da detecção de superfície por origem dos dados

Há métodos de detecção de superfície que extraem os dados de imagens formadas, ou utilizam técnicas de formação de imagem. Outros utilizam o tempo de percurso dos ecos contidos nos sinais de ultrassom capturados. Neste trabalho, os primeiros são chamados de “baseados em imagem”, e os últimos de “baseados em tempo de percurso”. Essa classificação não é vista na literatura, mas é útil para agrupar os diferentes métodos.

1.1.2 Classificação por incidência da onda

Os métodos de detecção de superfície podem também ser classificados pela forma como as ondas incidem na superfície do objeto (fig. 7):

1. Frente de onda divergente na incidência.
2. Frente de onda paralela na incidência.
3. Onda convergente, focalizada na superfície.

No primeiro caso, não é necessário saber previamente a posição ou o formato da superfície. Ondas divergentes podem ser produzidas com um único elemento, ou com múltiplos elementos quando os elementos centrais disparam antes dos elementos laterais. Ondas produzidas por um único elemento têm menos energia, o que prejudica a relação sinal-ruído. Com ondas divergentes um ponto da frente de onda atinge o objeto primeiro, e essa informação é utilizada na detecção de superfície. Para ondas divergentes podem ser utilizados equipamentos com poucos canais, multiplexados ou não.

No segundo caso, se a superfície não é conhecida inicialmente de modo aproximado, os atrasos na emissão aplicados a cada elemento do transdutor precisam ser ajustados até que a frente de onda fique paralela à superfície na incidência. Os atrasos finais são fonte de informação para a determinação da geometria da superfície. Com incidência paralela, as ondas não são desviadas por reflexão especular, mas é necessário um equipamento de aquisição com muitos canais.

No terceiro caso, para que as ondas possam ser focalizadas, a posição aproximada da superfície precisa ser conhecida previamente. Os outros dois tipos de ondas podem ser utilizados para determinar a posição e o formato inicial da superfície. Como a superfície deve ser conhecida anteriormente de modo aproximado, esse tipo de onda serve apenas para melhorar a qualidade da detecção. Ondas focalizadas possuem energia concentrada na região focal e são adequadas a superfícies côncavas com raio de curvatura pequeno. Podem ser utilizados equipamentos com poucos canais, multiplexados ou não.

Os métodos de formação de imagem com dois meios de propagação também podem ser classificados em incidência divergente, paralela ou convergente. No primeiro caso, a superfície do objeto é tangente à frente de onda na incidência, e os efeitos de reflexão especular e refração são complexos, com conversão de modo. No segundo caso, não ocorre desvio da onda por refração, nem conversão de modo, pois a incidência é normal. No terceiro caso, reflexão especular e refração podem desviar as ondas, e o ponto focal funciona como uma fonte virtual. A focalização na superfície do objeto pode ser realizada pois a interface já é conhecida antes da formação da imagem.

Essa classificação por formato da frente de onda na incidência também não é vista na literatura.

1.2 Revisão bibliográfica

1.2.1 Detecção de superfície

No trabalho de Barshan (1999) o objetivo final é a detecção de superfície. O método exige pós-processamento da imagem, e mesmo assim o texto indicou um tempo de processamento de 0,25 s com um programa em linguagem C. Como a CPU utilizada no trabalho é muito antiga, é difícil fazer uma comparação justa com CPUs atuais. O método usa arcos circulares e elipses, o primeiro quando o transmissor atua com receptor e o segundo quando o transmissor e o receptor estão em posições diferentes. O arco circular é o espaço das possíveis posições do refletor para um determinado tempo de percurso. O mesmo acontece com a elipse, mas nela um foco está no transmissor e o outro no receptor. O método é baseado em tempo de percurso, para superfícies genéricas.

No trabalho de Aubry et al. (2002), foi apresentada uma outra aplicação, a detecção de superfície de um crânio em banho de água. A superfície do crânio foi obtida pela curva tangente a

várias elipses, onde cada elipse é formada como no trabalho de Barshan (1999). Não ficou claro como foi feito o processamento. Esse é um método também baseado em tempo de percurso, para superfícies genéricas.

Kidera, Sakamoto e Sato (2006) estudaram detecção de superfície mas com radares, utilizando envelope de círculos e tempos de percurso. Esse trabalho é interessante pois analisa a sensibilidade a ruídos, mostrando que um método específico baseado em derivadas não é muito robusto. O método suporta superfícies genéricas.

Detecções de superfícies podem ser executadas por técnicas de segmentação, que requerem uma imagem formada como entrada. Keitmann-Curdes et al. (2006) utilizaram segmentação com o objetivo de aplicar a técnica na determinação do perfil de uma chapa em hidroformação. Nesse caso em particular o objetivo final era obter o formato complexo da superfície. Como no trabalho citado, muitas técnicas de segmentação utilizam algoritmos de minimização (LOBREGT; VIERGEVER, 1995), que podem exigir um alto poder de processamento.

Long e Cawley (2007) utilizaram um método baseado em imagem que não necessita de segmentação. Primeiro uma imagem de referência por varredura setorial de uma superfície plana é obtida. Para obter o perfil da superfície, outra imagem setorial é gerada e comparada com a imagem de referência. No trabalho a formação de imagem com água como acoplamento foi comparada com a formação de imagem com *array* flexível. Foi utilizada uma superfície complexa.

Quando a superfície é convexa ou plana, a segmentação pode ser substituída por uma simples detecção de pico (MATUDA; BUIOCHI; ADAMOWSKI, 2012), quando considera-se que o valor mais alto no eco mais forte na imagem está sobre a interface. Mas nesse caso uma imagem por abertura sintética é necessária para cada pico, que define um ponto da interface. Para a técnica ser eficiente é preciso utilizar um equipamento com alto poder de processamento paralelo e boa largura de banda, por exemplo FPGAs no equipamento de aquisição.

Recentemente Camacho et al. (2014) desenvolveram três métodos baseados em tempo de percurso: em modo pulso-eco, quando os elementos emitem e recebem, um de cada vez; em modo *pitch-catch*, quando um elemento emite e vários recebem; e com onda plana, onde todos os elementos emitem simultaneamente, sem atrasos aplicados. A superfície foi considerada localmente plana, mas os resultados mostraram uma boa exatidão, com erros RMS em torno de 10 μm , embora os erros tenham sido definidos em relação à curva ajustada, e não à curva real. O tempo de processamento apresentado foi de 2 s, mas com a utilização do MATLAB®. Os métodos foram desenvolvidos para superfícies genéricas com curvas suaves.

1.2.2 Formação de imagens através de superfícies curvas

Após a interface ser detectada, os atrasos devem ser calculados para a formação de imagem, considerando o material de acoplamento e o objeto. De acordo com o princípio de Fermat, o caminho mais rápido deve ser considerado neste cálculo. Nesse processo um ponto na

interface é selecionado para cada combinação de elemento do *array* e ponto na imagem. Para interfaces planas o problema pode ser resolvido analiticamente (WESTON et al., 2012), mas para interfaces não planas a busca precisa ser otimizada.

Parrilla et al. (2008) utilizaram o método Newton-Raphson para achar o ponto de interface com tempo de percurso mínimo. O tempo de processamento para uma imagem foi alto, 72 s, para 84420 leis focais ou atrasos, mas com execução em MATLAB®. O resultado mostra que mesmo com otimização o custo da busca pelo tempo mínimo pode ser alto.

Andrade et al. (2009) estudaram a formação de imagens por varredura setorial, em imersão, com interface curva convexa conhecida. O trabalho mostrou que a região de máxima amplitude de campo acústico, em excitação contínua, no interior do objeto, forma uma curva e não uma reta como nos casos com interface plana. Os resultados mostraram que há um ganho na qualidade da imagem se esse efeito da interface curva for considerado.

Hunter, Drinkwater e Wilcox (2010) estudaram a focalização automática por otimização com recozimento simulado (*simulated annealing*). Em câmeras fotográficas, a focalização automática é muito mais simples, pois só necessita de um grau de liberdade. No artigo a interface é modelada por uma curva *spline*, portanto com vários graus de liberdade, e a função-objetivo é uma fórmula que mede o contraste na imagem. É utilizado um *array* flexível, mas a idéia pode ser aplicada a ensaios em imersão com *arrays* lineares. O problema dessa técnica é que o processamento pode ser muito demorado, pois é necessário formar uma imagem em cada iteração.

Sutcliffe et al. (2012) formaram imagem por TFM (*total focusing method*) (HOLMES; DRINKWATER; WILCOX, 2005) em GPU, utilizando uma peça com superfície curva convexa. O processamento da imagem foi rápido, 6 ms, mas em baixa resolução (120×80). Os cálculos dos atrasos foram mais demorados, 49 s por imagem, mas não está claro como foi feito o processamento. Esse trabalho também mostra que os cálculos para a determinação dos atrasos podem ser pesados.

Uma solução interessante é o método SAUL (*Surface Adaptive Ultrasound*) (ROBERT et al., 2012), baseado em tempo de percurso. O método SAUL utiliza incidência paralela de ondas, enquanto todos os métodos citados anteriormente utilizam ondas divergentes. No método SAUL a primeira aquisição é feita com onda plana, em que todos os elementos do *array* transmitem ao mesmo tempo. Os tempos de percurso dos primeiros ecos nos sinais capturados são utilizados para iterativamente ajustar os atrasos na transmissão, a fim de tornar a frente de onda cada vez mais próxima do paralelismo na incidência. A incidência paralela elimina o problema da refração. O método já funciona em tempo real (ROBERT et al., 2012). Como desvantagens, o método atualmente não é focalizado e necessita de equipamento de aquisição com muitos canais, que são mais caros que sistemas multiplexados. No método original a imagem formada não representa a verdadeira geometria da peça, mas a reconstrução da superfície está sendo estudada (ROBERT et al., 2013).

Cruza et al. (2013) apresentaram uma nova abordagem para evitar o custo do princípio de Fermat. Foi desenvolvido um procedimento de obtenção de um *array* virtual, que permite considerar somente um meio de propagação. Os atrasos obtidos são uma aproximação, mas segundo o artigo foram obtidos erros da ordem de nanosegundos. O método foi implementado em *hardware*, para funcionamento em tempo real. São suportadas superfícies genéricas com curvas suaves, e as imagens são feitas por varredura setorial.

Dziewierz, Lardner e Gachagan (2013) estudaram a formação de imagem assumindo uma interface conhecida. Para diminuir a quantidade de cálculo na busca pelas trajetórias mais rápidas, o princípio de Fermat foi aplicado somente em parte dos pontos da imagem. A partir desses pontos foi ajustada uma curva para que os atrasos fossem interpolados. O processamento foi realizado em GPU, resultando em uma taxa de imagens de 3,3 Hz para uma imagem por TFM com resolução de 1024×1024 , e um *array* de 64 elementos. Porém o tempo de transferência de dados entre a memória principal e a GPU não foi considerado. O método aceita superfícies genéricas com curvas suaves.

Sutcliffe et al. (2013) mostraram que detecção de superfície e formação de imagem por TFM com *array* de 32 elementos, com compensação automática de refração, podem ser executadas em tempo real com GPUs de médio desempenho. Porém foi utilizada uma resolução baixa (240×80). No trabalho a interface era complexa, e foi detectada por um método baseado em tempo de percurso. Segundo o artigo a detecção de superfície foi feita no PC enquanto o cálculo dos atrasos e a formação de imagem foram processados na GPU. Isso mostra que a detecção de superfície pode ser uma tarefa leve em termos de processamento.

1.3 Objetivos

O objetivo deste trabalho é desenvolver métodos de formação de imagens por ultrassom de objetos com superfícies convexas, com detecção automática da superfície, utilizando *array* multiplexado. Para tanto, as seguintes atividades foram definidas:

- Desenvolver métodos eficientes de detecção de superfícies convexas baseados em técnicas de formação de imagem e tempo de percurso de ecos, capazes de serem processados em uma CPU de uso geral em frações de segundo.
- Comparar os métodos de detecção de superfície desenvolvidos, baseados em formação de imagem e em tempo de percurso, com relação ao tempo de processamento e exatidão nas medições obtidas.
- Introduzir otimizações na formação de imagens através de dois meios de propagação distintos, de modo que a utilização do princípio de Fermat não gere uma carga de processamento excessiva. O processamento deve ser feito em frações de segundo, em uma CPU de uso geral, pelo menos para baixas resoluções de imagem.

- Utilizar combinação de imagens formadas com diferentes grupos de elementos, e verificar se há ganhos na qualidade da imagem.
- Estudar métodos de formação de imagem através de dois meios de propagação distintos, com focalização na interface entre esses dois meios. Nesse caso, os pontos focais funcionam como elementos de um transdutor virtual. Verificar se é possível evitar o uso do princípio de Fermat, já que os elementos virtuais estão na superfície do objeto, que é feito de um único material.

1.4 Motivação

A formação de imagens de objetos com superfícies não planas, em ensaios não destrutivos interativos, com focalização, ainda não é uma tecnologia difundida. O uso de CPUs de uso geral no processamento pode levar a uma redução nos custos de desenvolvimento do *software*, e também de *hardware* se um PC for necessário no ensaio. Além disso, se o processamento for realizado no PC o *firmware* das FPGAs no equipamento de aquisição pode ser mais simples, e FPGAs com menor capacidade podem ser utilizadas. O uso de equipamentos de aquisição multiplexados também permite uma redução no custo. A redução de custos tende a estimular a utilização da tecnologia, contanto que a qualidade da imagem seja suficiente.

1.5 Organização do trabalho

No capítulo 2, são apresentados conceitos básicos de formação de imagens com *arrays* ultrassônicos, e alguns métodos importantes de formação de imagens. No capítulo 3 são descritos os métodos utilizados neste trabalho para formação de imagens de objetos com superfícies curvas. O capítulo 4 apresenta os materiais e métodos, onde são descritos os equipamentos e programas de computador utilizados, e procedimentos e configurações dos experimentos. No capítulo 5 são apresentados resultados dos experimentos realizados e respectivas discussões. Detalhes das configurações dos experimentos são também apresentados nesse capítulo. Finalmente, no capítulo 6 são apresentadas as conclusões do trabalho.

2 FORMAÇÃO DE IMAGENS COM ARRAYS ULTRASSÔNICOS

2.1 Introdução

No passado, a focalização de ondas de ultrassom era feita por meio de lentes acústicas ou pelo próprio formato do transdutor. Com o aparecimento dos *arrays*, tornou-se possível o controle eletrônico da focalização, pois cada elemento de um *array* de ultrassom pode ser utilizado de forma independente. Essa capacidade, aliada aos sistemas eletrônicos digitais, levou ao desenvolvimento dos sistemas atuais de formação de imagens por ultrassom, que têm como importantes vantagens a portabilidade e o uso de energia não ionizante e segura, se os níveis de potência forem controlados. Por esses e outros motivos, imagens ultrassônicas por *array* são muito utilizadas em diagnósticos médicos e em ensaios não destrutivos (END).

2.2 Princípios básicos

Na formação de imagens por ultrassom, utilizam-se ondas acústicas com frequências maiores que 20 kHz. A propagação de ondas acústicas obedece à equação de onda no material. Por exemplo, a equação de onda linear para fluidos sem perda é dada por (KINSLER et al., 2000):

$$\nabla^2 \bar{p} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \bar{p}}{\partial t^2} \quad (2.1)$$

onde $\bar{p}$ é a pressão acústica ou desvio relativo à pressão de equilíbrio, e c é a velocidade de propagação no meio.

Três tipos de onda são muito importantes em formação de imagens, as ondas planas, as esféricas e as cilíndricas, que são soluções da equação de onda. Para as condições de contorno e iniciais de ondas planas propagando-se na direção do eixo x , as equações de onda para meios lineares e sem perdas admitem soluções na forma (KINSLER et al., 2000):

$$\bar{p} = B_1 e^{i(\omega t - kx)} + B_2 e^{i(\omega t + kx)} \quad (2.2)$$

Para ondas cilíndricas e pontos não muito próximos do eixo central:

$$\bar{p} = \frac{B_1}{\sqrt{r}} e^{i(\omega t - kr)} + \frac{B_2}{\sqrt{r}} e^{i(\omega t + kr)} \quad (2.3)$$

Para ondas esféricas e pontos não muito próximos do centro:

$$\bar{p} = \frac{B_1}{r} e^{i(\omega t - kr)} + \frac{B_2}{r} e^{i(\omega t + kr)} \quad (2.4)$$

As constantes B_1 e B_2 podem ter valor real ou complexo, $k = \omega/c$ é o número de onda, $\omega = 2\pi f$ é a velocidade angular, f é a frequência da onda, r é a distância do ponto de interesse ao centro ou ao eixo central e $i = \sqrt{-1}$.

As três soluções representam ondas senoidais que propagam-se com velocidade c ; para sinal negativo no expoente, as ondas propagam-se no sentido positivo da coordenada x ou r , e vice-versa. Nos três casos a solução para um determinado sentido de propagação pode ser escrita na forma:

$$\bar{p}(\mathbf{x}, t) = \text{Re}(B(\mathbf{x})e^{i\phi(\mathbf{x})}e^{i\omega t}) = B(\mathbf{x})\cos(\omega t + \phi(\mathbf{x})), \quad (2.5)$$

onde $\mathbf{x}$ é vetor posição do ponto de interesse no campo, $B(\mathbf{x})$ não tem parte imaginária e define a amplitude do sinal e $\phi(\mathbf{x})$ é o desvio de fase dependente da posição $\mathbf{x}$. Para ondas planas $B(\mathbf{x})$ não depende de $\mathbf{x}$. A onda pode também ser representada apenas pelo número complexo $B(\mathbf{x})e^{i\phi(\mathbf{x})}$, que indica a amplitude e o desvio de fase.

Quando a amplitude das ondas é pequena o suficiente para permitir que o meio de propagação seja considerado linear, ondas transientes podem ser definidas como uma sobreposição de ondas senoidais.

2.3 Padrão de feixe para campo distante

O modelo mais simples de *array*, onde os elementos do transdutor *array* são representados por linhas infinitas com largura infinitesimal, é mostrado na fig. 8. Os elementos geram ondas cilíndricas.

Figura 8 – Modelo de *array* de linhas infinitas.

Quando o ponto no qual a pressão é calculada está tão longe que, linhas saindo dos elementos e passando pelo ponto podem ser consideradas paralelas, diz-se que o ponto está no campo distante. No campo distante vale o diagrama na fig. 9. O valor do campo no ponto de interesse é a soma das contribuições de cada elemento, e é dada por:

$$\bar{p}(\theta) = \sum_{m=0}^{N_e-1} \frac{a_m}{\sqrt{r}} e^{ik\Delta r_m} = \sum_{m=0}^{N_e-1} \frac{a_m}{\sqrt{r}} e^{ikm d_p \sin \theta_f} \quad (2.6)$$

onde d_p é a distância entre os centros dos elementos, N_e é o número de elementos do *array*, θ_f varia de $-\pi/2$ a $\pi/2$, r é a distância entre o elemento e o ponto no campo e as distâncias Δr_m estão indicadas na fig. 9. Nesse modelo, as frentes de onda têm formato cilíndrico e os

Figura 9 – Diagrama do cálculo do campo distante para o modelo de linhas infinitas.

coeficientes a_m são as amplitudes de excitação. Os elementos emitem ondas senoidais em fase. Como a distância r é muito maior que os valores de Δr_m , $\sqrt{r}$ pode ser considerado constante.

A eq.(2.6) pode ser comparada à Transformada de Fourier de Tempo Discreto (TFTD) (OPPENHEIM; SCHAFER; BUCK, 1999, p. 48):

$$\tilde{A}(\omega_n) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \tilde{a}[m]e^{-i\omega_n m} \quad (2.7)$$

onde $\tilde{a}[m]$ é um sinal discretizado no tempo e ω_n é a velocidade angular normalizada, em radianos por amostra, definida por:

$$\omega_n = 2\pi f_e T_{ae} \quad (2.8)$$

onde f_e é a frequência espacial e $T_{ae} = d_p$ é o período de amostragem espacial, e

$$kd_p \sin \theta_f = -2\pi f_e T_{ae} \Leftrightarrow \frac{2\pi}{\lambda} d_p \sin \theta_f = -2\pi f_e T_{ae} = -2\pi f_e d_p \Leftrightarrow f_e = -\frac{\sin \theta_f}{\lambda} \quad (2.9)$$

onde λ é o comprimento de onda.

Das eq.(2.6) e (2.7) o padrão de feixe (*beam pattern*) pode ser calculado por uma Transformada de Fourier de Tempo Discreto, não no tempo, mas em x . Deve ser observado que, das eq.(2.8) e (2.9), ω_n depende de $\sin \theta_f$ e de λ . Ou seja, o mapeamento é não linear e o campo gerado depende da frequência da excitação.

Na eq.(2.7), a função $\tilde{A}(\omega_n)$ é periódica com período 2π . Assim, para que não ocorra *aliasing*, tem-se $|\omega_n| \leq \pi$. Com as eq.(2.8) e (2.9):

$$|\omega_n| = \left| 2\pi d_p \frac{\sin \theta_f}{\lambda} \right| \leq \pi \Leftrightarrow d_p \leq \frac{\lambda}{2|\sin \theta_f|} \quad (2.10)$$

Se θ_f varia de $-\pi/2$ a $\pi/2$, chega-se à condição $d_p \leq \lambda/2$. Se o módulo de θ_f for mais limitado, o valor de d_p pode ser maior. Quando ocorre *aliasing*, aparecem os efeitos dos chamados lóbulos de espaçamento (*grating lobes*). Na fig. 10 é mostrado o padrão de feixe para $d_p = \lambda/2$. Na fig 11, para $d_p = 2\lambda$, os lóbulos de espaçamento são os picos com $\theta_f \neq 0$ e amplitude máxima. Os lóbulos de espaçamento ocorrem quando a diferença de fase entre sinais provenientes de elementos vizinhos é um múltiplo inteiro de 2π .

Figura 10 – Padrão de feixe para $d_p = \lambda/2$, sem apodização, para 32 elementos. Figura 11 – Padrão de feixe para $d_p = 2\lambda$, sem apodização, para 32 elementos.

Como o cálculo de padrão de feixe é equivalente a uma TFTD, as técnicas de aplicação de janelas podem ser utilizadas. Para isso, são definidos valores dos coeficientes a_m maiores no centro do *array* e menores nos extremos, e esse procedimento é chamado de apodização. Cada tipo de janela tem um efeito diferente, mas basicamente o que ocorre é um balanço entre a largura do lóbulo central e o nível dos lóbulos laterais. Ou seja, se a janela tem lóbulos laterais com nível baixo o lóbulo central é largo, e vice-versa.

Para excitação pulsada, de banda larga, os problemas de lóbulos de espaçamento são menores, pois os pulsos de curta duração geram menos sobreposição. Outra explicação é a ocorrência de interferência destrutiva parcial entre os lóbulos laterais para diferentes frequências.

2.4 Abertura efetiva

O padrão de feixe na emissão é calculado pela eq.(2.6). Pelo princípio da reciprocidade (KINSLER et al., 2000), a equação também vale na recepção, se for considerado um refletor

pontual. Na eq.(2.7), se $\tilde{a}_t[m]$ e $\tilde{a}_r[m]$ são as funções de abertura na transmissão e na recepção respectivamente, e $\tilde{A}_t(\omega_n)$ e $\tilde{A}_r(\omega_n)$ são os padrões de feixe na transmissão e na recepção respectivamente, o padrão de feixe em pulso-eco é dado por $\tilde{A}_t(\omega_n) \cdot \tilde{A}_r(\omega_n)$. Esse padrão de feixe é calculado pela Transformada de Fourier de Tempo Discreto de $\tilde{a}_t[m] * \tilde{a}_r[m]$, onde $*$ é a operação de convolução, e o resultado da convolução é chamado de abertura efetiva (*effective aperture*) (LOCKWOOD; FOSTER, 1995). A abertura efetiva é a função de abertura que produziria a mesma resposta que a função de abertura original se o campo gerado pelo transmissor tivesse a mesma amplitude para todos os ângulos θ_f (GEHLBACH; ALVAREZ, 1981). A abertura efetiva também é chamada de *coarray* (JOHNSON; KARAMAN; KHURI-YAKUB, 2005).

Em cada aquisição para a formação de uma imagem, podem ser ativados elementos diferentes, na transmissão e na recepção, portanto, produzindo aberturas efetivas distintas. Se o meio de propagação pode ser considerado linear, as aberturas efetivas em cada aquisição são somadas.

A abertura efetiva utiliza o padrão de feixe para campo distante e excitação senoidal, porém essa técnica também é utilizada com focalização e excitação pulsada (LOCKWOOD; FOSTER, 1995).

2.5 Transdutores reais

Transdutores reais possuem elementos retangulares, como os da fig. 12. No cálculo de distâncias e atrasos, normalmente são utilizados os centros dos elementos, mas cada ponto da superfície do elemento pode ter uma distância diferente para o ponto de interesse. Na simulação de um elemento com área não nula, pode-se considerar que cada ponto da superfície do elemento produz ondas esféricas. O resultado é uma sobreposição de ondas ligeiramente fora de fase. Em simulações, quando se excita um elemento do *array* com um delta de Dirac, em cada ponto do espaço é obtida uma resposta a impulso que não é um delta de Dirac, devido à área não nula do elemento. Essa resposta a impulso é chamada de resposta a impulso espacial, pois depende da posição.

O campo acústico do elemento é a integral das contribuições de cada ponto na área do elemento. A integral na área pode ser convertida em um somatório de subelementos (SUNG; YANG; JENG, 2005), ou seja, com discretização na superfície do elemento e no tempo. Outro método é a solução analítica da integral na superfície (EMETERIO; ULLATE, 1992), mas com discretização no tempo. Nesse segundo caso, a princípio a velocidade de cálculo é maior, mas o resultado apresenta picos e descontinuidades que são reduzidos com o aumento da resolução no tempo. Por esse motivo o ajuste do número de amostras por tempo deve ser feito com critério.

O fato de o elemento real ter uma área não nula pode fazer com que os níveis dos lóbulos de espaçamento sejam menores em relação à fig. 11. Por exemplo, elementos retangulares são o resultado de uma convolução dos elementos de linha com uma função retangular no eixo x , o

Figura 12 – Exemplo de elementos com proporções idênticas às de um transdutor *array* comercial.

que significa uma multiplicação por uma função sinc no padrão de feixe (MACOVSKI, 1979).

Excitações curtas com poucos períodos de duração também reduzem o nível dos lóbulos de espaçamento. Nos lóbulos de espaçamento, canais vizinhos têm diferença de fase entre si de múltiplos inteiros de 2π , então um pulso recebido por um canal é deslocado no tempo em relação a um pulso recebido em um canal vizinho. Quando os canais são distantes, os respectivos pulsos simplesmente não apresentam sobreposição.

Mas mesmo com elementos reais e excitação em banda larga os lóbulos de espaçamento ainda podem causar ruídos na formação da imagem.

2.6 Formação de imagem

Em um *array* (fig. 13), cada elemento piezelétrico pode ser excitado e também consegue capturar sinais de forma independente. Essa capacidade é utilizada na focalização eletrônica das ondas acústicas, através da aplicação de atrasos individuais para cada canal do equipamento que aciona os elementos.

No processo de formação de uma imagem por transdutor *array* de ultrassom, primeiro o equipamento de aquisição excita eletricamente os elementos transmissores, que emitem ondas acústicas. As ondas propagam-se e sofrem reflexão quando há diferença de impedâncias acústicas (KINO, 2000) entre materiais diferentes. Podem ocorrer também efeitos como refração e difração. Os elementos receptores do transdutor então convertem as ondas acústicas recebidas em sinais elétricos, que são por sua vez transformados em sinais digitais. Os sinais digitais recebidos podem ser representados por gráficos no modo A (*A-mode* ou *A-scan*). Na fig. 14 podem ser vistos sinais recebidos para excitação por pulso retangular, com ecos produzidos por refletores.

Figura 13 – Um array linear e o sistema de coordenadas global utilizado.

Figura 14 – (a) Exemplo de A-scan para um refletor pontual e (b) ampliação do primeiro eco.

Na formação de imagens, é preciso definir uma grade, cujos nós têm posição (x_G, y_G, z_G) (fig. 15) e estão localizados em pontos do campo ao redor do transdutor onde deseja-se obter a intensidade da imagem. A densidade da grade precisa ser alta o suficiente para que seja possível a reprodução das frequências espaciais mais altas contidas na imagem. Nos sinais recebidos pelo array, só há informação de amplitude em função do tempo. Os instantes de tempo nos sinais precisam ser mapeados para os pontos na grade, e os valores na grade devem então ser interpolados para a matriz de *pixels* da tela.

No mapeamento (fig. 16), para cada ponto na grade, calcula-se o tempo t_{eco} no A-scan onde deve aparecer um eco se um refletor pontual existir naquele ponto. Para isso, deve-se obter o caminho percorrido pela onda desde o momento inicial no A-scan. No caso da figura, para somente um meio de propagação, a distância percorrida é calculada por $r_E + r_R$. As ondas propagam-se de modo divergente, mas os caminhos são representados por retas. O tempo então pode ser calculado por $t_{eco} = (r_E + r_R)/c$, onde c é a velocidade de propagação acústica no meio. O valor no A-scan no tempo t_{eco} é acumulado na respectiva posição na grade. Como resultado, os ecos nos A-scans são mapeados para pontos na grade que representam prováveis refletores.

O problema nesse procedimento é que, para um refletor pontual, quando são utilizados somente um elemento transmissor e um receptor, na imagem aparece uma elipse passando pelo refletor pontual (fig. 17). Um dos focos da elipse fica no elemento transmissor e o outro no

Figura 15 – Mapeamento e interpolação.

Figura 16 – Mapeamento. As posições do elemento transmissor e do receptor são dadas por x_E e x_R , respectivamente.

receptor. Isso acontece porque há infinitos pontos que geram o mesmo valor de t_{eco} , os pontos na elipse. Se o meio de propagação é considerado linear, podem ser somadas imagens parciais produzidas com mais combinações de elementos transmissores e receptores. Por exemplo, na fig. 18 são utilizados dois elementos transmissores e dois receptores, com somente um elemento transmitindo em cada aquisição. São possíveis quatro combinações de elementos transmissores e receptores. Cada combinação gera uma elipse, e todas as elipses passam pela localização do refletor. Com o aumento do número de elementos ativos, por interferência construtiva a região próxima ao refletor vai sendo reforçada, e as elipses vão sendo atenuadas. Na fig. 19 são utilizados 32 elementos transmissores e 32 receptores, também com somente um elemento transmitindo em cada aquisição. São 1024 combinações possíveis de elementos. As elipses foram bem atenuadas, mas ainda podem ser vistos alguns vestígios perto do eco.

Figura 17 – Imagem com um elemento transmitindo (elem. 15) e um recebendo (elem. 31) em um *array* simulado de 32 elementos.

Figura 18 – Imagem com dois elementos transmitindo (elem. 15 e 24) e dois recebendo (elem. 10 e 31) em um *array* simulado de 32 elementos.

Figura 19 – Imagem com 32 elementos transmitindo e 32 recebendo em um *array* simulado de 32 elementos.

Quando mais de um elemento transmite em cada aquisição, a focalização de ondas na emissão pode ser feita através da aplicação de atrasos individuais para cada elemento transmissor. Como a distância e portanto o tempo de percurso entre cada elemento e o ponto focal dependem da posição do elemento, o momento da emissão precisa ser ajustado por meio de atrasos para que as ondas cheguem em fase no foco. Com excitação pulsada, a focalização na emissão é sempre fixa, pois a partir do momento em que a onda deixa o transdutor ela não pode mais ser controlada. Na fig. 20, é mostrada a focalização na emissão para excitação por pulso. As frentes de onda têm formato aproximadamente cilíndrico quando a altura dos elementos é muito maior que a largura, ou aproximadamente esférico quando as dimensões dos elementos não são muito maiores que o comprimento de onda no meio. O comprimento de onda pode ser calculado por $\lambda = c/f$, onde a frequência f é obtida pelo espectro de frequências da forma de onda de excitação. Se a excitação for transiente, conforme o caso utiliza-se a frequência central f_c ou a frequência máxima $f_{\max}$. Os arcos na fig. 20 têm tamanhos diferentes pois o pulso de excitação foi disparado em momentos diferentes. A curva tangente aos arcos é aproximadamente um arco de círculo, em que o raio vai sendo reduzido à medida que as ondas avançam. No ponto focal, os arcos são sobrepostos em interferência construtiva, o que produz um pico de pressão. A partir desse momento a pressão vai se tornando menor e menos concentrada. A focalização na emissão tem como objetivo concentrar a energia na região focal. Assim, um refletor no foco gera um eco forte e com boa relação sinal/ruído, enquanto refletores em regiões longe do foco normalmente produzem ecos mais fracos.

Figura 20 – Focalização em emissão para o ponto focal F , com (a) as frentes de onda a meio caminho e (b) as ondas sobre o ponto focal.

O acesso aos sinais pelo instante t_{eco} calculado, isto é, o mapeamento entre posições na grade de imagem e os sinais capturados, em conjunto com a superposição de configurações diferentes de elementos transmissores e receptores, resulta em focalização na recepção. A focalização na recepção alinha os ecos presentes nos sinais capturados por canais de recepção distintos.

A descrição matemática da formação de imagem apresentada, para um ponto P na grade

da imagem, com índice p , é dada por:

$$S_{pe_b} = \sum_{j=e_b+e_{r1}}^{e_b+e_{r2}} S_{pje_b} = \sum_{j=e_b+e_{r1}}^{e_b+e_{r2}} a_j \left(\sum_{i=e_b+e_{t1}}^{e_b+e_{t2}} s_{ij}(\Delta t_{ipj}) \right) \quad (2.11)$$

onde:

e_b é o índice do elemento-base, o primeiro elemento do grupo ativo,

e_{t1} e e_{t2} são os índices relativos a e_b do primeiro e do último elementos transmissores ativos no grupo, respectivamente,

e_{r1} e e_{r2} são os índices relativos a e_b do primeiro e do último elementos receptores ativos no grupo, respectivamente,

i é o índice do elemento transmissor,

j é o índice do elemento receptor,

a_j é o coeficiente de apodização na recepção,

s_{ij} é o sinal para o transmissor i e o receptor j e

Δt_{ipj} é o tempo de percurso da trajetória mais rápida entre o transmissor i , o ponto P e o receptor j , segundo o princípio de Fermat. Supõe-se que há um grupo de elementos ativos adjacentes no array. Se o grupo ativo tem tamanho limitado e menos elementos que o array, pode-se utilizar um equipamento de aquisição multiplexado, que possui canais eletrônicos suficientes apenas para acionar o grupo ativo, e não o array inteiro. O uso de multiplexação torna mais baixo o custo do equipamento. Em cada grupo, considera-se que há um subgrupo de elementos transmissores adjacentes e um subgrupo de elementos receptores adjacentes. Os índices dos elementos podem ser visualizados na fig. 21, para transmissão, e na fig. 22, para recepção. Se várias configurações forem utilizadas e se os meios de propagação forem considerados lineares, o resultado é a soma dos valores de S_{pe_b} para cada caso.

Figura 21 – Diagrama dos índices dos elementos do array para a formação de imagens, em transmissão.

Figura 22 – Diagrama dos índices dos elementos do array para a formação de imagens, em recepção.

O acesso aos sinais s_{ij} pelo valor de Δt_{ipj} pode ser implementado por uma aplicação de atraso, por esse motivo e pela somatória da eq.(2.11) a técnica é chamada de atraso e soma (*delay-and-sum*).

Quando há somente um meio de propagação, as trajetórias mais rápidas são representadas por segmentos de reta, e portanto:

$$\Delta t_{ipj} = \frac{r_{ip} + r_{pj}}{c} \quad (2.12)$$

onde:

r_{ip} é a distância entre o emissor i e o ponto P ,

r_{pj} é a distância entre o ponto P e o receptor j e

c é a velocidade de propagação no meio.

2.6.1 Princípio de Fermat

Quando há somente um meio de propagação, a trajetória mais rápida entre dois pontos é um segmento de reta. Para dois ou mais meios, é preciso considerar as interfaces entre os meios. Para interface plana entre dois meios e ondas planas, o princípio de Fermat é equivalente à lei de Snell (SCHMERR JR., 1998, p. 115). Nesse caso, há solução analítica para a equação polinomial de quarto grau do problema (WESTON et al., 2012). Trabalhos recentes consideram também trajetórias com tempo de percurso estacionário, ou seja, aceitam máximos locais (BORN; WOLF, 2005; WESTON et al., 2012).

Para uma interface não plana entre dois meios, na fig. 23, os pontos Q e $\bar{Q}$ precisam ser selecionados de tal modo que os tempos de percurso sejam mínimos. Nesse caso, o valor de Δt_{ipj} na eq.(2.11) é dado por:

$$\Delta t_{ipj} = (r_{iq}/c_1 + r_{qp}/c_2) + (r_{p\bar{q}}/c_2 + r_{\bar{q}j}/c_1) \quad (2.13)$$

onde:

r_{iq} é a distância do transmissor i ao ponto Q na interface,

r_{qp} é a distância do ponto Q na interface ao ponto P na grade,

$r_{p\bar{q}}$ é a distância do ponto P na grade ao ponto $\bar{Q}$ na interface,

$r_{\bar{q}j}$ é a distância do ponto $\bar{Q}$ na interface ao receptor j e

c_1 e c_2 são as velocidades de propagação nos meios 1 e 2, respectivamente.

2.6.2 Métodos

Os métodos de formação de imagem podem ser caracterizados pelos seguintes fatores:

- O número de aquisições feitas por imagem.
- Em cada aquisição, quais elementos transmitem e quais recebem.

Figura 23 – Diagrama para o cálculo dos atrasos pelo princípio de Fermat.

- Como são determinadas as trajetórias das ondas.
- Se são aplicados atrasos na emissão.
- O formato da grade de imagem e qual parte da grade é mapeada em cada aquisição.

A seguir serão citados alguns métodos essenciais de formação de imagem, inicialmente considerando somente um meio de propagação.

2.6.2.1 Varredura

Na formação de imagens por varredura (fig. 24), a emissão é focalizada, e o foco percorre uma linha no caso da varredura linear (*linear scan*) ou um arco no caso da varredura setorial (*sectorial scan*). Em cada aquisição é utilizado um grupo de elementos adjacentes, no qual todos os elementos transmitem e todos recebem. A grade é retangular na varredura linear e é um setor circular na varredura setorial. Em cada aquisição, apenas uma coluna da grade é mapeada na varredura linear, e apenas um raio da grade é mapeado na varredura setorial. Essas colunas ou raios são chamados de linhas de varredura (*scan lines*) e ficam sobre uma reta que passa pelo centro do grupo de elementos emissores ativos. Portanto o número de aquisições por imagem é igual ao número de linhas de varredura. Na varredura setorial o grupo é fixo, mas na varredura linear o índice do primeiro elemento do grupo é incrementado a cada nova aquisição.

Figura 24 – Varredura (a) linear e (b) setorial. Os pontos indicam as posições dos focos.

Na varredura setorial, o número de linhas de varredura é igual ao número de focos e também igual ao número de ângulos intermediários de varredura. Na varredura linear, se o tamanho do grupo é N_g e o número total de elementos é N_e , o número de linhas de varredura é $N_e - N_g + 1$.

A focalização na transmissão é sempre fixa, isto é, é a mesma para todos os pontos na linha de varredura. Na fig. 25, r_f/c é o tempo que as ondas demoram para ir do elemento transmissor ao foco. Os atrasos são calculados de modo a compensar as diferenças, para que as ondas cheguem ao mesmo tempo no foco.

Figura 25 – Cálculo dos atrasos para focalização na transmissão.

Na fig. 26, é mostrado o que acontece com os sinais com a aplicação dos atrasos em emissão, para um refletor no foco. As ondas atingem o foco ao mesmo tempo, mas os ecos chegam em tempos diferentes, pois as distâncias entre os elementos receptores e o refletor são diferentes.

A focalização na recepção pode ser fixa ou dinâmica. Na focalização fixa, considera-se na ida a trajetória do centro do grupo ao ponto de interesse, que fica sobre a linha de varredura. Na volta, considera-se a trajetória do ponto de interesse ao centro do grupo. Ao tempo de percurso é somado o atraso na transmissão para a posição central do grupo, e também é somada a diferença entre o atraso na transmissão para a posição central do grupo e o atraso na transmissão para o elemento receptor. Deve-se observar que os atrasos são calculados para o ponto focal, e não em função do ponto de interesse. Quando o grupo tem um número par de elementos, há dois elementos centrais, e o atraso é interpolado a partir dos valores nesses elementos.

Na focalização dinâmica, considera-se também na ida a trajetória do centro do grupo ao ponto de interesse, que fica sobre a linha de varredura. Na volta, considera-se a trajetória do ponto de interesse ao elemento receptor. Ao tempo de percurso é somado o atraso na transmissão para a posição central do grupo. A focalização dinâmica considera a posição do ponto de interesse em relação às posições dos elementos receptores.

Como a transmissão é feita com todos os elementos do grupo e é focalizada, ecos produzidos por refletores na região focal têm boa relação sinal-ruído, devido às ondas com alta energia. Porém se o refletor estiver longe da região focal os ecos tendem a ser mais fracos e

Figura 26 – Tempos dos sinais para imagem por varredura.

distorcidos, pois os sinais em cada canal são detectados com diferenças de fase incorretas.

Outros tipos de varredura são possíveis, pois o foco pode percorrer uma trajetória qualquer. Na fig. 27 pode ser vista a abertura efetiva para um exemplo de *array* com quatro elementos.

Figura 27 – Abertura efetiva para imagem por varredura.

2.6.2.2 SAFT

No método SAFT (*synthetic aperture focusing technique*), em cada aquisição um só elemento emite e o mesmo recebe. A grade tem formato arbitrário mas é geralmente retangular ou um setor circular. O mapeamento é feito para a grade inteira, ou seja, a cada aquisição há a formação de uma imagem parcial. Considera-se a trajetória do elemento transmissor ao ponto na grade e deste ao elemento receptor. Se o número de elementos no grupo utilizado é N_g , o número de aquisições e de imagens parciais por imagem também é N_g .

Esse tipo de método é chamado de abertura sintética pois a área do transdutor é dividida em partes, cujos efeitos são combinados no resultado final. Nos métodos de abertura sintética uma desvantagem é a emissão não focalizada e com menor energia devido à área emissora

menor por aquisição, levando a uma relação sinal-ruído baixa nos sinais capturados, antes do processamento. Uma das vantagens é a ausência de sobreposições de ecos para refletor pontuais, para qualquer posição da grade. Como as transmissões são feitas e armazenadas elemento a elemento, no processamento é possível definir atrasos para cada canal de forma independente. Consequentemente, é possível focalizar em qualquer ponto da imagem.

Na fig. 28 pode ser vista a abertura efetiva para um exemplo de *array* com quatro elementos. A abertura efetiva do SAFT mostra que o seu passo do array d_p crítico é $\lambda/4$ e não $\lambda/2$, pois há zeros intercalados entre os valores não nulos na função de abertura. Deve-se lembrar que, com excitação pulsada, de banda larga, as frequências contidas no pulso de ultrassom maiores que a frequência central f_c também devem ser consideradas.

Figura 28 – Abertura efetiva para imagem por SAFT.

2.6.2.3 STA

O método STA (*synthetic transmit aperture*) também é um método de abertura sintética, mas a área é dividida somente na transmissão. No método STA, em cada aquisição um só elemento emite e todos no grupo ativo recebem. A grade tem formato arbitrário mas é geralmente retangular ou um setor circular. O mapeamento é feito para a grade inteira, ou seja, a cada aquisição há a formação de imagens parciais. Considera-se a trajetória do elemento transmissor ao ponto na grade e deste ao elemento receptor. Se o número de elementos no grupo utilizado é N_g , o número de aquisições por imagem também é N_g .

Em relação ao SAFT, o STA forma mais imagens parciais, uma para cada combinação de elemento transmissor e receptor, ou seja, N_g^2 . Isso contribui para uma melhoria na relação sinal/ruído após o processamento.

O STA também é chamado de *total focusing method* (TFM) (HOLMES; DRINKWATER; WILCOX, 2005). O processo de captura de sinais para todas as combinações de elementos trans-

missores e receptores também é chamado de *full matrix capture* (FMC) (HOLMES; DRINKWATER; WILCOX, 2005).

Na fig. 29 pode ser vista a abertura efetiva para um exemplo de *array* com quatro elementos. A abertura efetiva do STA é idêntica à da imagem por varredura (fig. 27).

Figura 29 – Abertura efetiva para imagem por STA.

2.7 Método Phase Coherence Factor (PCF)

Para diminuir o ruído em imagens, por exemplo, ruído causado por lóbulos de espaçamento, podem ser utilizados métodos não lineares. Um método eficaz é o Phase Coherence Factor (PCF) (CAMACHO; PARRILLA; FRITSCH, 2009). O método utiliza as fases dos sinais para cada elemento receptor, para cada ponto na imagem, para calcular um fator que multiplica os valores na imagem.

No método PCF, os ângulos $\phi_i(m)$ em radianos para cada elemento receptor m são obtidos pela fase dos sinais de ultrassom S_{pje_b} (eq.(2.11)), convertidos para sinal analítico. Para tratar a descontinuidade entre π e $-\pi$, é definida a função auxiliar:

$$\phi_i^A(m) = \begin{cases} \phi_i(m) + \pi & \phi_i(m) < 0 \\ \phi_i(m) - \pi & \phi_i(m) \geq 0 \end{cases} \quad (2.14)$$

Além disso, a seguinte função é definida:

$$sf = \min[\sigma(\phi_i(m)), \sigma(\phi_i^A(m))] \quad (2.15)$$

onde σ é o desvio padrão. O PCF é então calculado por:

$$PCF = \max \left[0, 1 - \frac{\gamma_{PCF}}{\sigma_0} \cdot sf \right] \quad (2.16)$$

onde $\sigma_0 = \pi / \sqrt{3}$ e γ_{PCF} é um parâmetro de ajuste.

O valor de PCF é próximo de 1 quando as fases dos sinais são quase idênticas, e é reduzido quando as fases são muito diferentes. Na fig. 30a, no tempo para a linha pontilhada as fases são iguais, logo o PCF tem valor 1. Na fig. 30b, em um lóbulo de espaçamento, somente parte dos sinais têm fases semelhantes, então o valor do PCF é baixo. Como consequência, os lóbulos de espaçamento são atenuados.

Figura 30 – Ecos em sinais para (a) lóbulo central e (b) lóbulo de espaçamento.

O método PCF utiliza sinais analíticos, com parte real e imaginária. As fases são determinadas a partir desses sinais complexos, pela função arco tangente. Essa função pode representar um alto peso no processamento, pois é executada para cada ponto na imagem e para cada elemento receptor.

Uma opção é o método Sign Coherence Factor (SCF), publicado em conjunto com o PCF, que utiliza somente a polaridade do sinal, isto é, se o valor é positivo ou negativo. O SCF, portanto, não necessita de sinal analítico nem da função arco tangente. Por outro lado, quando o sinal cruza o nível zero, o ruído pode ser mais forte que o sinal e o SCF pode ficar com um valor baixo, mesmo em sinais coerentes. Por esse motivo pode ser necessário utilizar um filtro suavizador para evitar transientes (CAMACHO; PARRILLA; FRITSCH, 2009).

3 TÉCNICAS PARA FORMAÇÃO DE IMAGENS DE OBJETOS COM SUPERFÍCIES CURVAS

3.1 Detecção de superfície

Neste passo, a posição e o formato da superfície são detectados, utilizando o próprio *array* responsável pela formação de imagem. Os métodos por STA, de arcos e de curva tangente, descritos a seguir, utilizam ondas divergentes. O método por STA é baseado em imagem, o de curva tangente é baseado em tempo de percurso, e o método de arcos é híbrido. Os métodos nesta seção suportam apenas superfícies planas ou convexas com curvas suaves.

Métodos de detecção de superfície baseados em imagem utilizam a soma de sinais, e a consequência é que eles naturalmente ignoram ecos distorcidos com nível baixo, causados pela direcionalidade do elemento transdutor quando o ângulo de chegada do eco é desfavorável. Por outro lado, métodos baseados em tempo de percurso não precisam usar procedimentos de formação de imagem, portanto, são potencialmente mais leves no processamento.

3.1.1 Método por STA

Na detecção de superfície por STA, para cada grupo de elementos uma imagem é gerada. Para a formação de imagem é utilizada a eq.(2.11), com:

$$e_{t1} = 0,$$

$$e_{r1} = 0,$$

$$e_{t2} = N_g - 1,$$

$$e_{r2} = N_g - 1,$$

$$a_j = 1$$

e N_g é o número de elementos no grupo. Ou seja, todos os elementos do grupo transmitem e recebem, mas a transmissão é feita com um elemento de cada vez. Na imagem a posição do valor máximo é considerada um ponto da superfície (MATUDA; BUIOCHI; ADAMOWSKI, 2012). O número de aquisições é igual ao número de grupos vezes o número de elementos N_g em cada grupo.

Na fig. 31 pode ser vista uma imagem por STA. É mostrado o envelope da imagem original, mas no método de detecção de superfície por STA não é utilizada a detecção de envelope. A extensão do grupo de elementos ativos pode ser vista na parte inferior da imagem. A interface é indicada pela linha pontilhada, e o pico pelo círculo branco. Podem ser vistos ruídos por lóbulo de espaçamento entre a interface e o *array*, que ocorrem pois o *array* utilizado tem passo $d_p = 2\lambda$ em água.

Esse método tem como desvantagem a necessidade de formar uma imagem inteira para cada grupo de elementos, ou seja, para cada ponto da superfície obtido.

Figura 31 – Exemplo de uma imagem por STA para detecção de superfície.

A resolução na posição dos pontos é limitada em $\sqrt{\Delta x_G^2 + \Delta z_G^2}$, onde Δx_G e Δz_G são os passos na grade da imagem nas direções x e z respectivamente. Por exemplo, para uma resolução de $75 \mu\text{m}$ e uma imagem de 60 mm por 35 mm , é necessária uma grade de 1132×661 . A distância de $75 \mu\text{m}$ é equivalente a um quarto do comprimento de onda na água à frequência de 5 MHz .

3.1.2 Método de arcos

A detecção de superfície por STA exige a formação de imagens para a obtenção dos pontos para o ajuste da curva da interface. O método de arcos evita esse custo, mas ainda utiliza técnicas de formação de imagem. Primeiro um elemento central e_c no grupo ativo de elementos envia e todos os elementos receptores ativos do grupo capturam os sinais. O sinal do elemento central, que também recebe, é utilizado no cálculo do tempo de percurso. Com a velocidade de propagação c_1 , a distância $r_t = c_1 \Delta t_c / 2$ do elemento central à superfície é obtida, onde Δt_c é o tempo de percurso. Um arco circular é então definido, centralizado no elemento emissor e com raio r_t (fig. 32).

O ângulo α para o ponto de tangência P na fig. 32 é determinado através da aplicação da equação para abertura sintética sobre o arco obtido. No método de arcos, o valor da imagem em um ponto P_a sobre o arco, para o elemento-base e_b , que é o primeiro elemento do grupo ativo de elementos no *array* multiplexado, é dado por:

$$S_{e_b p} = \sum_{j=e_b+e_{r1}}^{e_b+e_{r2}} (s_{ij}(\Delta t_{ipj})) \quad (3.1)$$

onde $i = e_b + e_c$, e_{r1} e e_{r2} são o primeiro e o último elementos receptores ativos respectivamente, s_{ij} é o sinal capturado para o elemento transmissor i e elemento receptor j , p é o índice do

Figura 32 – O método de arcos.

ponto P_a e Δt_{ipj} é o tempo de percurso para o caminho mais rápido começando no elemento transmissor, passando pelo ponto P_a e terminando no elemento receptor, de acordo com o princípio de Fermat. Na detecção de superfície somente um meio de propagação é considerado, portanto, o caminho mais rápido é representado por uma linha reta do elemento transmissor ao ponto P_a , mais outra linha reta do ponto P_a ao elemento receptor. O ângulo α para o ponto P é então obtido aproximadamente pela posição do máximo valor calculado sobre o arco.

Como o cálculo é executado sobre um arco em vez de sobre uma grade de pontos, o processamento pode ser mais rápido que em outros métodos baseados em imagem. Um número ímpar de elementos receptores é utilizado, com o mesmo número de elementos à esquerda e à direita do elemento central. Como o raio do arco é obtido pelo tempo de percurso e o ângulo pela equação de formação de imagens por abertura sintética, o método é a rigor híbrido.

Na prática o arco precisa ser discretizado. O efeito da discretização foi simulado utilizando um objeto cilíndrico com raio R_{cil} e centro sobre o eixo z , com o elemento transmissor na origem. (fig. 33). Se o valor máximo está sobre o ponto P , mas devido à discretização o ponto (x_{arco}, z_{arco}) foi selecionado, o ponto detectado não está sobre a superfície, mas a uma distância dela dada por:

$$\varepsilon_{arc} = \sqrt{x_{arco}^2 + ((r_t + R_{cil}) - z_{arco})^2} - R_{cil} \quad (3.2)$$

onde $x_{arco} = r_t \sin(\gamma)$ e $z_{arco} = r_t \cos(\gamma)$.

Na fig. 34, o erro ε_{arco} é apresentado, para $R_{cil} = 15$ mm e $r_t = 15$ mm. Para um desvio no arco de 0,3 mm, o erro é somente 6 μ m, e isso mostra que a discretização do arco não precisa ser muito fina, o que contribui para a velocidade de processamento.

A resolução na direção radial depende da taxa de amostragem $\bar{f}_a$ do sinal capturado, após interpolação, e é calculada por $c_1/(2\bar{f}_a)$. Por exemplo, para uma resolução de 75 μ m, em água, a taxa de amostragem deve ser no mínimo de $\bar{f}_a = 10$ MHz. Essa taxa é facilmente atendida.

Figura 33 – Erro devido à discretização do arco.

Figura 34 – Erro devido a um desvio no arco relativo ao ponto de tangência.

3.1.3 Método de curva tangente

O método de curva tangente é baseado em tempo de percurso, pois seus cálculos precisam somente do tempo de percurso dos ecos provenientes da superfície do objeto. Quando o eco da superfície é o mais forte em um sinal, sua posição é detectada simplesmente pelo pico do sinal. Dada uma combinação de um elemento transmissor e um elemento receptor, o tempo de percurso do eco é convertido para distância utilizando a velocidade de propagação, e essa distância fornece informação de alcance, mas ainda não define uma direção. O espaço de possíveis posições do refletor é uma elipse com um foco no elemento transmissor e outro no elemento receptor (fig. 35), com $r_1 + r_2$ igual à distância do percurso. Com mais combinações de elementos transmissores e receptores, outras elipses são definidas. A superfície é dada pela curva tangente a todas essas elipses. Se a superfície do objeto não fosse tangente às elipses, ela geraria ecos com tempo de percurso maior ou menor que os tempos detectados, o que seria uma contradição. Essa abordagem já foi utilizada em outros trabalhos (BARSHAN, 1999; AUBRY et al., 2002). A contribuição do método de curva tangente é simplesmente a delimitação da área de interesse, descrita a seguir.

Neste método, o elemento transmissor é sempre um elemento central de índice e_c (fig. 35). Além disso, há um número ímpar de elementos receptores, nas mesmas condições do método de arcos. O índice do elemento receptor é indicado por e_r .

Figura 35 – O método de curva tangente.

Como o número de elementos receptores é limitado, o número de elipses também é, o que faz com que os pontos de tangência fiquem restritos a uma região na interface do objeto. Fora dessa região a superfície do objeto está muito distante de qualquer elipse formada pelo elemento central e um elemento receptor. Por esse motivo, a busca pela curva tangente deve ser executada somente nessa região limitada, que é a área de interesse.

Para definir os limites dessa região, primeiro considera-se o arco circular centralizado no elemento transmissor. Depois considera-se uma elipse, cujos focos estão no elemento transmissor e no elemento receptor (fig. 35). O arco tem raio $r_t = c_1 \Delta t_c / 2$, onde Δt_c é o tempo de percurso do eco refletido na superfície do objeto quando o elemento central é o transmissor e o receptor.

Na elipse, $2a_{el} = c_1 \Delta t_r$ e $2c_{el} = |e_c - e_r|d_p$, onde Δt_r é o tempo de percurso para o elemento central e_c como transmissor e o elemento e_r como receptor, d_p é o passo do array, a_{el} é o semieixo maior e $2c_{el}$ é a distância entre os focos. A excentricidade da elipse é calculada por $e_{el} = c_{el}/a_{el}$. Também na elipse, a distância do elemento central a um ponto na elipse é dada por (WEISSTEIN, 2014):

$$r_1 = \frac{a_{el}(1 - e_{el}^2)}{1 \pm e_{el} \cos \theta} \quad (3.3)$$

onde o sinal de mais e o de menos no denominador são utilizados quando o elemento receptor está à esquerda ou à direita do elemento central, respectivamente.

Na intersecção de uma elipse com o arco centralizado no elemento central, $r_1 = r_t$, e com a eq.(3.3),

$$\cos \theta_i = \pm \left(\frac{a_{el}(1 - e_{el}^2) - r_t}{r_t e_{el}} \right) \quad (3.4)$$

onde o sinal à esquerda da fração é escolhido como na eq.(3.3), e θ_i é o valor do ângulo θ na intersecção entre o arco circular e uma das elipses.

Se não houvesse ruído, o maior valor do ângulo θ_i , considerando todas as elipses definidas pelos elementos receptores correspondentes, seria obtido para o elemento receptor mais à esquerda, e o menor valor para o elemento receptor mais à direita. Com sinais reais, com ruído, nem sempre isso ocorre. Por esse motivo os valores de θ_i para todas as intersecções são obtidos, e os ângulos mínimo e máximo, $\theta_{\min}$ e $\theta_{\max}$ respectivamente, são considerados como limites para a região na qual a curva tangente é determinada (fig. 36). Nessa região, o ângulo θ é discretizado, e para cada ângulo intermediário o máximo valor de r_1 é selecionado, considerando todas as elipses. O valor de r_1 é calculado pela eq.(3.3). Com o ângulo θ intermediário e o máximo valor de r_1 , a posição de um ponto na superfície é definido. Há um ponto para cada valor intermediário de θ . Desse modo, o método de curva tangente gera muitos pontos para cada grupo de elementos, em contraste com o método de arcos, que gera apenas um ponto por grupo.

Como o passo do *array* não é infinitamente pequeno, a curva obtida não é suave, e é somente uma aproximação da curva tangente. O efeito pode ser visualizado na fig. 36, na qual os erros foram exagerados.

Figura 36 – Diferença entre a curva tangente e a curva detectada pelo método de curva tangente.

A determinação da resolução do método é complexa, pois envolve equações de elipses. Podem ser utilizadas as equações para as resoluções no método de arcos, como aproximação.

3.2 Formação de imagem com compensação da refração

Neste passo, a interface já é conhecida e a imagem é formada com o auxílio do princípio de Fermat. As formações de imagem por STA, por abertura sintética combinada e por STA combinada, descritos a seguir, utilizam ondas divergentes. A formação de imagem por *array* virtual utiliza ondas convergentes, com focalização na interface.

3.2.1 Formação de imagem por STA

O processo de formação de imagens por STA é quase igual ao da seção 3.1.1, porém é feita a busca pela trajetória mais rápida como indicado na seção 2.6.1. Neste caso, porém, para a formação da imagem, somente um grupo de elementos do *array* é utilizado.

3.2.2 Formação de imagem por abertura sintética combinada

A imagem é formada por abertura sintética, com combinação dos dados provenientes de aquisições para vários grupos de elementos, com elementos-base distintos. Somente um elemento central do grupo transmite em cada aquisição, e todos os elementos do grupo recebem. Se o grupo tem um número par de elementos, existem dois elementos centrais, e um deles deve ser escolhido. Para a formação da imagem é utilizada a eq.(2.11), com:

$$e_{t1} = e_c,$$

$$e_{t2} = e_c,$$

$$e_{r1} = 0,$$

$$e_{r2} = N_g - 1$$

e N_g é o número de elementos no grupo. O elemento e_c é o central. A busca pela trajetória mais rápida é feita como indicado na seção 2.6.1. A combinação é feita por soma coerente. Dependendo da escolha dos grupos de elementos, é necessário utilizar apodização. O objetivo é o aumento da resolução em relação à imagem feita com somente um grupo de elementos.

3.2.3 Formação de imagem por STA combinada

Neste caso, são formadas imagens como na seção 3.2.1, para vários grupos diferentes de elementos. As imagens são então combinadas por soma coerente. Dependendo da escolha dos grupos de elementos, é necessário utilizar apodização. Como o número de elementos transmissores é maior que no caso de abertura sintética combinada, em teoria a relação sinal-ruído deve ser melhor.

3.2.4 Formação de imagem por *array* virtual

Quando o *array* transmite com vários elementos simultaneamente, com focalização, o ponto focal pode ser tratado como um elemento de um *array* virtual. *Arrays* virtuais podem ser utilizados para aumentar a energia da emissão em imagens por abertura sintética (PASSMANN; ERMERT, 1996; FRAZIER; O'BRIEN, 1998; BAE; JEONG, 2000). Mais recentemente, *arrays* virtuais foram utilizados para evitar a busca pela trajetória mais rápida em ensaios por imersão. Lukomski, Stepinski e Kowal (2012) focalizaram a emissão na superfície plana do objeto sob teste, e com isso a trajetória é fixa, pois passa pelo ponto focal.

Neste trabalho, ondas convergentes são focalizadas em uma superfície não plana (fig. 37). Na ida pode ser utilizada a trajetória do elemento transmissor ao ponto focal, e do ponto focal

ao ponto P . Na volta a trajetória pode ser determinada pelo princípio de Fermat, ou pode-se considerar a trajetória passando pelo ponto focal. No segundo caso, a busca pela trajetória mais rápida não é necessária. Porém, em teoria, o uso do princípio de Fermat na volta é mais adequado, pois as ondas no retorno não são focalizadas.

Figura 37 – Formação de imagem por *array* virtual.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Local e equipamentos

Os experimentos foram realizados no Laboratório de Ultrassom da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Foi utilizado um *array* linear da Imasonic (França) modelo 7279 (fig. 38), com frequência central $f_c = 5$ MHz, 128 elementos, passo de 0,6 mm e elementos com largura de 0,5 mm e altura de 12 mm. Como o passo tem um valor de aproximadamente 2λ , onde λ é o comprimento de onda na água, o *array* pode gerar ruído devido a lóbulos de espaçamento quando o ensaio é feito em água, pois o passo é 4 vezes o valor ideal de $\lambda/2$. Em alumínio não há esse problema.

Figura 38 – Array Imasonic 7279.

Os sinais do *array* foram capturados com um equipamento de aquisição Sitau MX 32:128 (Dasel Sistemas, Espanha) (fig. 39), com 32 canais multiplexados em 128, taxa de amostragem máxima de $f_a = 40$ MHz e resolução de 12 bits no conversor A/D. A conexão entre o equipamento e o PC é via USB 2.0.

Figura 39 – Sitau MX 32:128.

A temperatura da água foi medida com um termômetro HD 2127.2 (Delta OHM, Itália), com um sensor TP 472 I (Pt100). Segundo o manual do equipamento, a exatidão do termômetro

era aproximadamente $\pm 0,85^\circ\text{C}$ na data dos experimentos. Essa exatidão depende do tempo percorrido desde a última calibração, que foi feita logo após a fabricação.

As dimensões dos objetos utilizados nos experimentos, incluindo o *array*, foram medidas com um paquímetro digital Mitutoyo, com $\pm 0,02\text{ mm}$ de tolerância, segundo o fabricante.

4.2 Corpos de prova

Foram utilizados dois blocos cilíndricos de alumínio como corpos de prova (fig. 40), com furos passantes de 3 mm de diâmetro simulando defeitos. Os dois blocos têm diâmetro de 70 mm e altura de 40 mm. As posições dos furos nos blocos 1 e 2 podem ser vistas no apêndice A.

Figura 40 – Corpos de prova: (a) bloco 1 e (b) bloco 2.

Os blocos são simétricos para facilitar a verificação da posição angular em torno do eixo central do cilindro, que tem a direção do eixo y . É comum a utilização de blocos com furos em diferentes profundidades, mas optou-se por dois blocos, um com furos mais distantes da superfície e outro com furos mais próximos, para evitar o efeito de sombra, quando um furo esconde outro em posição posterior.

A velocidade de propagação para ondas longitudinais, nos blocos, foi medida por ultrassom em pulso-eco, resultando no valor $c_2 = 6426\text{ m/s}$. Essa velocidade no alumínio foi utilizada em todos os experimentos. Para a formação de imagens utilizando a velocidade c_{c2} das ondas de cisalhamento, c_{c2} foi estimada inicialmente em $c_2/2$. Em seguida foi ajustada até que o máximo de contraste na imagem fosse atingido, de modo aproximado. O valor utilizado nos experimentos é de $c_{c2} = 3150\text{ m/s}$.

4.3 Processamento

Os dados foram armazenados em disco no formato HDF5¹, que pode ser lido e gravado por programas em C/C++, Python, Octave e MATLAB®, entre outros. Para pós-processamento

¹ <<http://www.hdfgroup.org/HDF5/>>

e processamentos onde o desempenho não é essencial, foram utilizados *scripts* Python com o auxílio das bibliotecas NumPy², SciPy³ e Matplotlib⁴ (HUNTER, 2007).

Para executar processamentos em que o desempenho era importante, um programa *multi-thread* foi escrito em C++ pelo autor. Foi utilizado o compilador GCC 4.7.2, em um sistema operacional com o *kernel* Linux para a arquitetura x86-64. A interface gráfica (fig. 41), em inglês, serve apenas para selecionar a tarefa, iniciar ou parar a execução, mostrar mensagens e visualizar os resultados. Todos os parâmetros dos métodos são definidos em arquivos texto que são lidos antes de cada execução.

Figura 41 – A interface gráfica do programa de processamento escrito em C++.

O programa em C++ contém rotinas chamadas de padrão, que são apenas moderadamente otimizadas. Também contém rotinas utilizando OpenCL, um padrão aberto para programação paralela (KHRONOS OPENCL WORKING GROUP, 2012). Foram utilizadas três implementações do padrão OpenCL:

- Implementação incluída no *driver* 331.67 da NVIDIA, com cabeçalhos em NVIDIA CUDA Toolkit versão 5.5.22. Suporta processamento somente em GPUs da NVIDIA. Implementa OpenCL versão 1.1.
- AMD Accelerated Parallel Processing (APP) SDK versão 2.9-RC (*release candidate*). Suporta processamento em GPUs da AMD e CPUs. Implementa OpenCL versão 1.2.
- Intel SDK for OpenCL Applications XE versão 2013-R3. Em sistemas com Linux, suporta somente processamento em CPUs. Implementa OpenCL versão 1.2.

Os programas e *scripts* foram executados em um PC com um processador Intel Core i5 3470, com *clock* de 3,2 GHz e quatro núcleos. Como o Turbo Boost da CPU estava ativado,

² <<http://www.numpy.org>>

³ <<http://www.scipy.org>>

⁴ <<http://matplotlib.org>>

o *clock* efetivo era de 3,4 GHz. O PC tem 8 GB de RAM DDR3, com barramento de memória de 64 bits em dois canais e *clock* de memória de 800 MHz. Essa CPU possui uma taxa de processamento teórica de operações de ponto flutuante, em precisão simples, de 3,4 GHz (*clock*) $\times$ 4 (núcleos) $\times$ 8 (instruções vetoriais AVX: 8 operações por ciclo) $\times$ 2 (uma instrução de soma e uma de multiplicação por ciclo) = 218 GFLOPS.

A implementação da NVIDIA para o OpenCL utilizou uma GPU com processador NVIDIA GeForce GT-240 com 1 GB de RAM DDR3, barramento de memória de 128 bits e *clock* de memória de 790 MHz. O *clock* do processador da GPU é de 1,34 GHz. Essa GPU possui uma taxa de processamento teórica de operações de ponto flutuante, em precisão simples, de 1,34 GHz (*clock*) $\times$ 96 (núcleos) $\times$ 2 (uma operação de soma e uma de multiplicação por ciclo) = 257 GFLOPS. Esse número não é muito superior ao obtido para a CPU, porém é uma capacidade de processamento teórica.

4.4 Convenções

A taxa de amostragem $\bar{f}_a$ indica a taxa de amostragem de saída se os sinais foram interpolados, ou a taxa original f_a caso contrário. O índice do primeiro elemento do *array* é zero.

4.5 Montagem do experimento

Figura 42 – Posicionamento do bloco em relação ao *array*.

Figura 43 – Vista lateral do posicionamento do bloco em relação ao *array*.

O corpo de prova e o *array* foram apoiados em uma placa plana de alumínio de 3 mm de espessura, com um espaçador entre o *array* e a placa, para que o *array* e o bloco ficassem

centralizados entre si na direção y . O espaçamento entre o bloco e o *array* na direção z foi ajustado com o auxílio de uma placa de 3 mm de espessura com um furo circular, no qual o bloco se encaixava (fig. 42 e 43). O centro do bloco foi colocado no eixo central do *array*, para que houvesse simetria no experimento. Essa simetria não é necessária na utilização dos métodos desenvolvidos, mas simplifica a análise dos resultados. Quatro valores para a distância entre o bloco e o *array* foram utilizados (15, 20, 30 e 40 mm).

Como não é possível ver as posições dos elementos devido às camadas de casamento e de proteção, o alinhamento em x entre o bloco e o *array* foi feito pela caixa do transdutor, portanto confiou-se na precisão de fabricação do *array*. Esse alinhamento foi ajustado visualmente.

O conjunto foi colocado em um tanque com água, completamente abaixo da superfície. A água tem baixas perdas, pequeno comprimento de onda e permite um bom acoplamento acústico entre o *array* e o objeto. Entretanto, um problema da água é a grande diferença entre a sua velocidade de propagação e a do material do objeto, o que pode provocar fortes efeitos de refração.

4.6 Cálculo da velocidade de propagação na água

Antes de cada conjunto de aquisições foi medida a temperatura da água, para o cálculo da velocidade de propagação. A velocidade de propagação na água foi calculada pela equação (MARCZAK, 1997):

$$\begin{aligned}
 c_1 = & 1,402385 \times 10^3 + \\
 & 5,038813 T - 5,799136 \times 10^{-2} T^2 + \\
 & 3,287156 \times 10^{-4} T^3 - 1,398845 \times 10^{-6} T^4 + \\
 & 2,787860 \times 10^{-9} T^5
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

onde T é a temperatura da água em graus Celsius.

4.7 Calibração do sistema de aquisição

Como sistemas de aquisição e transdutores reais não têm resposta ideal, eles precisam ser calibrados se uma alta exatidão é desejada. Para 48 dos 128 elementos do *array*, o seguinte procedimento foi executado para cada elemento: utilizando um refletor plano, paralelo à face frontal do transdutor a uma distância $d = 40$ mm, a média de 64 aquisições foi calculada e interpolada com taxa de amostragem na saída de $\bar{f}_a = 16f_a$. Em cada sinal resultante, um segmento foi selecionado. O início do segmento é o instante $t_d = 2d/c_1 = (2 \cdot 40 \text{ mm})/c_1$, o momento em que um delta de Dirac seria recebido se o sistema tivesse uma resposta ideal. O fim do segmento foi selecionado arbitrariamente, em um instante em que o eco já foi atenuado. A média dos segmentos selecionados dos 48 elementos foi então obtida e o resultado é o sinal de referência s_{ref} , que teve a taxa de amostragem reduzida de volta para $f_a = 40$ MHz (fig. 44). A constante c_1 é a velocidade de propagação na água, obtida da temperatura medida.

Figura 44 – O pulso de referência (s_{ref}).

Figura 45 – Comparação entre o sinal capturado e a correlação cruzada entre esse sinal e o sinal de referência s_{ref} . O início do sinal s_{ref} está posicionado no instante de valor máximo da correlação cruzada.

A correlação cruzada entre o sinal s_{ref} e um sinal capturado resulta em um sinal no qual o pico está no tempo de percurso Δt (fig. 45). O erro em Δt devido à discretização no tempo tem valor absoluto menor que $1/\bar{f}_a$.

No sinal de referência s_{ref} , a posição do pico do envelope foi medida em 3,03 períodos na frequência f_c , utilizando interpolação com taxa de saída de $\bar{f}_a = 16f_a$. Esse deslocamento do envelope é utilizado para ajustar a posição do eco quando a correlação cruzada não é utilizada. A correlação cruzada compensa esse deslocamento.

4.8 Seleção dos grupos de elementos

Alguns dos métodos desenvolvidos neste trabalho utilizam *arrays* multiplexados, com diferentes grupos de elementos ativados em cada aquisição. Devem ser definidos quais os grupos selecionados e em que ordem serão acionados. A detecção de superfície pelo método de arcos e de curva tangente, e as respectivas formações de imagens combinadas usam a mesma sequência de grupos, portanto, a escolha do número de grupos deve levar em consideração os dois procedimentos.

O número de grupos foi escolhido conforme as seguintes condições: o primeiro elemento

do primeiro grupo é o primeiro elemento do *array*, o último elemento do último grupo é o último elemento do *array*, o espaçamento entre grupos é uniforme e existe um grupo central no centro do *array*. Quatro valores que obedecem a essas condições são 3, 5, 7 e 9 grupos, sendo 32 elementos para cada grupo e um *array* com 128 elementos.

Quando somente o elemento 15 em cada grupo transmite, números menores que 7 não são adequados, porque nesses casos a abertura efetiva (GEHLBACH; ALVAREZ, 1981) da imagem combinada tem zeros que não podem ser eliminados com apodização (fig. 46a). Para 9 grupos, a abertura efetiva tem dentes (fig. 46c), mas eles podem ser eliminados com apodização na recepção (fig. 47). Quanto maior o número de grupos, mais pontos no ajuste de curva, o que é bom para atenuação de erros, mas é maior a quantidade de dados e a carga de processamento. O número de 9 grupos foi escolhido, mesmo considerando que com 7 grupos a apodização não é necessária (fig. 46b). Com 9 grupos, há alguma superposição de dados, mostrada pelos dentes na fig. 46c, e as transições na abertura efetiva com apodização são mais suaves em comparação com o caso de 7 grupos.

Figura 46 – Abertura efetiva para a imagem combinada, com o elemento 15 transmissor de cada grupo, sem apodização, para (a) 5 grupos, (b) 7 grupos e (c) 9 grupos.

Nas fig. 48, 49 e 50 podem ser vistos os padrões de feixe no campo distante para a abertura efetiva da imagem combinada, utilizando 7 grupos, 9 grupos com apodização e 9 grupos sem apodização, respectivamente. Para 9 grupos com apodização, o nível dos lóbulos laterais é menor em relação ao caso com 7 grupos. Para 9 grupos sem apodização, aparecem vários picos indesejáveis, mostrando que a apodização é necessária nesse caso. Deve-se lembrar que esses padrões de feixe são para campo distante, com excitação contínua. Para excitação pulsada e imagens por abertura sintética, os resultados são diferentes, principalmente quando há dois ou

Figura 47 – (a) Abertura efetiva para a imagem combinada, com o elemento 15 transmissor de cada grupo, com apodização para 9 grupos, e (b) a respectiva função de apodização na recepção.

mais meios de propagação envolvidos. Mas a análise em campo distante permite detectar os casos em que há distorção excessiva, como na fig. 50, e portanto, identificar a necessidade de apodização.

Figura 48 – Padrão de feixe no campo distante para a abertura efetiva da imagem combinada, para 7 grupos e frequência de 5 MHz em água.

Para o caso em que todos os elementos do grupo transmitem, na imagem por STA combinada, a seleção dos grupos foi feita de forma similar ao caso com somente um elemento transmissor por grupo (fig. 51). A configuração com 9 grupos também foi escolhida, com a mesma apodização.

Nas fig. 52 e 53 podem ser vistos os padrões de feixe no campo distante para a abertura efetiva da imagem STA combinada, utilizando 9 grupos com apodização e 9 grupos sem apodização, respectivamente. Na fig. 52 o nível dos lóbulos laterais é menor em relação à fig. 49, e o caso sem apodização, na fig. 53, não é tão grave quanto na fig. 50.

Os 9 grupos selecionados começam nos elementos-base 0, 12, 24, 36, 48, 60, 72, 84 e

Figura 49 – Padrão de feixe no campo distante para a abertura efetiva da imagem combinada, para 9 grupos com apodização e frequência de 5 MHz em água.

Figura 50 – Padrão de feixe no campo distante para a abertura efetiva da imagem combinada, para 9 grupos sem apodização e frequência de 5 MHz em água.

96. Somente três grupos seriam necessários para o ajuste de um círculo no caso do método de arcos, mas os pontos adicionais ajudam na redução e na análise dos erros.

4.9 Preparação dos sinais

Nos métodos de arcos e de curva tangente, os sinais de ultrassom capturados a uma taxa de amostragem de $f_a = 40$ MHz foram interpolados e passaram por filtragem DC. Em seguida, as correlações cruzadas entre os resultados e o sinal de referência s_{ref} foram obtidas. O tempo de percurso foi então obtido pelo pico dos sinais resultantes.

Nas formações de imagens, os sinais capturados a uma taxa de amostragem de $f_a = 40$ MHz foram interpolados, passaram por filtragem DC e foram convertidos em sinais analíticos (SZABO, 2004) com o auxílio da transformada de Hilbert (MARPLE S.L., 1999). Sinais analíticos contêm o sinal original na parte real e o sinal deslocado em 90° na parte imaginária. A transformada

Figura 51 – Abertura efetiva para a imagem por STA combinada, sem apodização para (a) 5 grupos, (b) 7 grupos, (c) 9 grupos, e (d) abertura efetiva com apodização para 9 grupos.

Figura 52 – Padrão de feixe no campo distante para a abertura efetiva da imagem STA combinada, para 9 grupos com apodização e frequência de 5 MHz em água.

Figura 53 – Padrão de feixe no campo distante para a abertura efetiva da imagem STA combinada, para 9 grupos sem apodização e frequência de 5 MHz em água.

de Hilbert foi utilizada para efetuar esse deslocamento de fase. O valor absoluto do sinal analítico representa o envelope do sinal original, com limitações (apêndice C). As formações de imagens então utilizaram esses sinais contendo números complexos. Embora o processamento de sinais com números complexos seja mais pesado que com os sinais originais, se a transformada de Hilbert fosse executada após a formação de imagem, alguns defeitos poderiam aparecer, devido às descontinuidades na interface entre o bloco de alumínio e a água (apêndice C). A utilização de sinais analíticos na formação de imagem permitiu o uso de grades de imagem com menor resolução.

Os sinais capturados e o sinal de referência s_{ref} foram interpolados com taxa de amostragem na saída de $\bar{f}_a = 4f_a$, em todos os experimentos. Com essa taxa de amostragem o máximo erro absoluto na detecção de interface, devido à discretização, é $4,7 \mu\text{m}$ em água. O filtro passa-baixas empregado nas interpolações usa uma função sinc multiplicada por uma janela de Kaiser, com 80 dB de atenuação mínima na banda de rejeição. Para a obtenção de valores nos sinais em posições intermediárias entre duas posições discretas, os valores foram interpolados linearmente. Todas as filtragens e correlações cruzadas foram processadas no domínio da frequência.

4.10 Detecção de superfície

Na detecção de superfície, o erro entre os pontos detectados e o círculo de referência, o círculo que é considerado a forma real do objeto, é dado por:

$$\varepsilon_{\text{ref}} = \sqrt{(x_p - x_c)^2 + (z_p - z_c)^2} - R_{\text{cil}} \quad (4.2)$$

onde (x_p, z_p) são as coordenadas do ponto, (x_c, z_c) são as coordenadas do centro do círculo de referência e R_{cil} é o seu raio. De forma semelhante, o erro entre os pontos detectados e o círculo

ajustado é dado por:

$$\varepsilon_{aj} = \sqrt{(x_p - \bar{x}_c)^2 + (z_p - \bar{z}_c)^2} - \bar{R}_{cil} \quad (4.3)$$

onde $(\bar{x}_c, \bar{z}_c)$ são as coordenadas do centro do círculo ajustado e $\bar{R}_{cil}$ é o seu raio.

Para ambos os métodos de detecção de superfície propostos, de arcos e de curva tangente, os pontos nos arcos foram separados por $\lambda_1/4$, onde λ_1 é o comprimento de onda em água na frequência f_c , e foi utilizado o elemento 15 do grupo como elemento central.

Para o método de arcos, uma simples simulação foi definida. Para cada combinação de elemento transmissor e receptor, foi encontrado por busca iterativa o caminho mais rápido saindo do elemento transmissor, refletindo no círculo de referência e chegando no elemento receptor. Com c_1 e o percurso mais rápido, o tempo de percurso Δt foi obtido. No sinal simulado, o sinal de referência s_{ref} foi inserido no instante Δt . Essa simulação considera que a forma do sinal não depende da distância d entre o *array* e o objeto, nem do ângulo θ_p (definido na fig. 32).

4.11 Ajuste de curva

Como os objetos analisados são cilíndricos, os pontos obtidos na detecção de superfície foram utilizados no ajuste de um círculo. Os ajustes de círculos foram realizados com o método de Pratt (PRATT, 1987), na implementação proposta por Chernov e Lesort (2005). Esse método é adequado a essa aplicação pois funciona bem mesmo quando os pontos cobrem apenas uma fração da circunferência.

Os métodos de detecção de superfície propostos podem funcionar também com outras superfícies planas ou convexas. No caso de outras superfícies convexas, as curvas precisam ser suaves, devido ao baixo número de pontos detectados por grupo de elementos, em especial para o método de arcos.

4.12 Formação de imagem

Segundo o princípio de Fermat as trajetórias mais rápidas devem ser consideradas nos cálculos dos atrasos para a formação de imagem. Foi utilizado um procedimento simples para obter a trajetória mais rápida. No procedimento, processa-se coluna por coluna da grade da imagem. Em cada coluna, o processamento inicia da interface e continua até a última linha no topo da imagem. Para o primeiro ponto na coluna, a busca iterativa é feita em toda a interface, em dois níveis de discretização. Para os outros pontos, a busca é feita em torno do ponto da interface selecionado anteriormente. Nos experimentos com ondas divergentes, o espaçamento dos pontos na interface foi definido em $\lambda_2/4$, onde λ_2 é o comprimento de onda no alumínio na frequência f_c . A interface foi gerada entre os ângulos -170° e -10° , onde 0° está definido na direção e no sentido de x . Para as configurações do experimento, a máxima diferença absoluta entre os índices dos pontos de interface selecionados nas iterações atual e anterior resultou em 1, com exceção do segundo ponto em cada coluna, perto da interface. Em outras palavras, para

a maioria dos pontos na imagem, o número de iterações para a busca do caminho mais rápido não depende do número de pontos na interface, e é menor que uma constante de baixo valor, o que é bom para o desempenho. Porém essa técnica não funciona para superfícies genéricas.

As imagens combinadas são obtidas por soma coerente de subimagens por abertura sintética, que são formadas para grupos de elementos individuais. As subimagens utilizam a apodização na recepção definida na seção 4.8. As imagens por ultrassom neste trabalho são apresentadas com interpolação por *nearest-neighbor*, pois, desse modo, a real resolução da imagem fica mais visível. As imagens foram normalizadas pelo nível mais alto, porém, não considerando a região com ecos fortes na interface. Como geralmente os ecos na interface são mais fortes que os ecos dos furos, em muitos casos ocorreu saturação nessa região.

Os métodos de detecção de superfície e de formação de imagens neste trabalho utilizam os mesmos sinais de ultrassom. Como os ganhos no equipamento de aquisição foram ajustados para os ecos da interface, que são mais fortes que os ecos dos furos, a relação sinal-ruído nas imagens não foi otimizada. Para melhorar a relação sinal-ruído nas imagens, outras aquisições teriam que ser feitas, com ganhos otimizados para os ecos dos furos.

Para as imagens com um elemento transmissor por grupo, foi utilizado o elemento 15 do grupo como elemento central, com todos os 32 elementos do grupo recebendo.

5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

5.1 Detecção de superfície por STA

Neste experimento, a detecção de superfície foi feita através de imagens pelo método STA. Foi utilizado espaçamento de grade $\lambda_1/16$, onde λ_1 é o comprimento de onda na água na frequência central f_c . Na fig. 54 é mostrado o erro ε_{ref} entre os pontos detectados e o círculo de referência, com detecção por pico do envelope, para quatro valores da distância d entre o *array* e o objeto. Na fig. 55 é mostrado o erro ε_{ref} para utilização de correlação cruzada entre os sinais capturados e o sinal de referência s_{ref} . O ângulo θ_p é definido na fig. 32, e é calculado utilizando o centro do círculo ajustado. A assimetria nas fig. 54 e 55, em torno de $\theta_p = 0$, é devido à imprecisão no posicionamento do *array* em relação ao bloco na direção x .

Figura 54 – Detecção de superfície pelo método STA por pico de envelope: Erros entre as posições dos pontos detectados e o círculo de referência, para diferentes valores da distância d .

Nas fig. 56 e 57, no cálculo de ε_{ref} foi utilizada a coordenada $\bar{x}_c$ do centro do círculo ajustado, o que fez com que as curvas ficassem aproximadamente simétricas em torno de $\theta_p = 0$. Essa correção funciona como compensação do erro de posicionamento do *array* em relação ao bloco (direção x) e é justificada pela simetria do bloco e do experimento. A maior diferença absoluta aplicada nessa compensação foi de 0,17 mm.

Mas os valores de ε_{ref} variam muito em função da distância d entre o objeto e o *array*. Para tentar compensar essas diferenças, o valor de d foi medido por pulso-eco, utilizando os dois elementos centrais do *array*, 63 e 64. Considerou-se a velocidade de propagação calculada pela temperatura da água. Foram feitas duas medidas, primeiro transmitindo com o elemento 63 e recebendo com o elemento 64, e depois transmitindo com o elemento 64 e recebendo com o

Figura 55 – Detecção de superfície pelo método STA por correlação cruzada: Erros entre as posições dos pontos detectados e o círculo de referência, para diferentes valores da distância d .

Figura 56 – Detecção de superfície pelo método STA por pico de envelope: Erros entre as posições dos pontos detectados e o círculo de referência, utilizando $\bar{x}_c$ do círculo ajustado, para diferentes valores da distância d .

Figura 57 – Detecção de superfície pelo método STA por correlação cruzada: Erros entre as posições dos pontos detectados e o círculo de referência, utilizando $\bar{x}_c$ do círculo ajustado, para diferentes valores da distância d .

elemento 63. A média dos tempos de percurso medidos por correlação cruzada foi então calculada. Como a distância percorrida é $2\sqrt{(d_p/2)^2 + d^2}$, onde d_p é o passo do *array*, e a velocidade e o tempo de percurso são conhecidos, pode-se calcular o valor de d corrigido. Essa medição de distância é influenciada por erros na velocidade de propagação e no sinal de referência, erros que são, em boa parte, compensados para o grupo de elementos central, que localiza-se na região em que as medições foram feitas. Mas para outros grupos esses erros podem afetar os resultados. Como consequência, com essa calibração, a exatidão experimental obtida na detecção de superfície é útil somente para comparação entre os métodos utilizados. A maior diferença absoluta aplicada nessa compensação foi de 0,092 mm.

Nas fig. 58 e 59 são mostrados o erro ϵ_{ref} em relação ao círculo de referência calibrado, e o erro ϵ_{aj} em relação ao círculo ajustado, respectivamente, para detecção por pico de envelope. Nas fig. 60 e 61 são mostrados o erro ϵ_{ref} em relação ao círculo de referência calibrado, e o erro ϵ_{aj} em relação ao círculo ajustado, respectivamente, para detecção por correlação cruzada. O círculo de referência calibrado tem a coordenada z_c corrigida pela diferença entre o d medido e o original.

Com a calibração do círculo de referência, os resultados para os diferentes valores da distância d se aproximaram. No caso da detecção por pico do envelope, os erros para os pontos com baixo valor absoluto de θ_p foram muito atenuados. Porém no caso da detecção por correlação cruzada os erros com baixo valor absoluto de θ_p situaram-se em torno de $\epsilon_{ref} = 20 \mu m$.

Os erros absolutos para o círculo de referência calibrado resultaram maiores para os grupos mais à esquerda e mais à direita. Isso pode ser explicado pelas maiores inclinações da superfície do objeto em relação ao *array*.

Figura 58 – Detecção de superfície pelo método STA por pico de envelope: Erros entre as posições dos pontos detectados e o círculo de referência calibrado, para diferentes valores da distância d .

Figura 59 – Detecção de superfície pelo método STA por pico de envelope: Erros entre as posições dos pontos detectados e o círculo ajustado, para diferentes valores da distância d .

Figura 60 – Detecção de superfície pelo método STA por correlação cruzada: Erros entre as posições dos pontos detectados e o círculo de referência calibrado, para diferentes valores da distância d .

Figura 61 – Detecção de superfície pelo método STA por correlação cruzada: Erros entre as posições dos pontos detectados e o círculo ajustado, para diferentes valores da distância d .

Os máximos valores absolutos de ε_{ref} e ε_{aj} resultaram maiores para detecção por pico do envelope, por esse motivo a detecção por correlação cruzada foi escolhida para os demais experimentos de detecção de superfície, mesmo existindo o desvio de 20 μm para a detecção por correlação cruzada.

Quando apenas 9 elementos foram utilizados na detecção por correlação cruzada, com 4 à esquerda e 4 à direita do elemento central 15, o desvio nos erros foi reduzido para aproximadamente 10 μm , o que mostra que o desvio depende do número de elementos utilizado.

5.2 Detecção de superfície pelo método de arcos

Neste experimento, a detecção de superfície foi feita pelo método de arcos, utilizando o elemento 15 do grupo como elemento central transmissor e com o ângulo α (fig. 32) na faixa de 30° a 150°. Para aumentar a velocidade de processamento e reduzir a quantidade de dados de aquisição, menos elementos receptores podem ser utilizados. Quando muitos elementos receptores (por exemplo 17 elementos) foram utilizados, picos duplos apareceram nas curvas de valores calculados ao longo dos arcos (fig. 62). Isso ocorre quando o pico na imagem completa não está exatamente sobre o arco circular. Esse problema é mais grave no grupo central, isto é, aparece com menos elementos receptores em relação a outros grupos. Os picos duplos desaparecem quando o número de elementos receptores é diminuído (por exemplo 9 elementos) (fig. 63). As simulações, definidas na seção 4.10, confirmaram esse comportamento (fig. 62 e 63). Os picos duplos podem estar relacionados ao desvio nos erros apresentado na detecção de superfície por STA com correlação cruzada, na seção 5.1.

Figura 62 – Valores normalizados da imagem ao longo do arco tangente à superfície, no método de arcos, para o grupo central de elementos, $d = 20\text{ mm}$ e 17 elementos receptores ativos. Os lóbulos laterais indicados são lóbulos de espaçamento.

Figura 63 – Valores normalizados da imagem ao longo do arco tangente à superfície, no método de arcos, para o grupo central de elementos, $d = 20$ mm e 9 elementos receptores ativos. Os lóbulos laterais indicados são lóbulos de espaçamento.

Utilizando o grupo que inicia no elemento-base 84, foram obtidas as fig. 64 e 65, para 17 e 9 elementos receptores ativos respectivamente. As diferenças entre os resultados simulados e experimentais são maiores em relação aos resultados com o grupo central, mas pode-se ainda observar os picos duplos. Com 9 elementos receptores ativos a região em torno do pico apresenta uma boa concordância entre os resultados experimentais e simulados. A simulação não foi muito exata nesse caso pois ela considera que o formato dos ecos é constante, isto é, não depende da posição relativa entre o objeto e o *array*, e nessa configuração o objeto não está diretamente acima do grupo ativo.

O número de elementos receptores também interfere na largura do lóbulo principal (fig. 66) e no nível máximo dos lóbulos laterais (fig. 67). A fig. 66 mostra o efeito dos picos duplos para mais de 9 elementos receptores. Considerando as fig. 66 e 67, o número de 9 elementos receptores por grupo foi escolhido para os experimentos seguintes. Para 9 elementos receptores, a máxima largura do lóbulo principal tem o menor valor e o máximo nível de lóbulos laterais não é tão alto quanto para menos elementos. O uso de menos elementos receptores poderia aumentar o desempenho, mas decidiu-se não operar no limite.

Os erros na detecção da superfície, obtidos pelo método de arcos, podem ser vistos na fig. 68 para o círculo de referência calibrado, e na fig. 69 para o círculo ajustado, para 9 elementos receptores. O ângulo θ_p é definido na fig. 32. Com a calibração do círculo de referência, os erros para o grupo central foram muito atenuados. Os erros absolutos para o círculo de referência calibrado resultaram maiores para os grupos mais à esquerda e mais à direita, devido às maiores inclinações, com valores absolutos menores que 25 μm . Porém, para os demais grupos, o erro absoluto manteve-se abaixo de 5 μm . Os erros absolutos para o círculo ajustado

Figura 64 – Valores normalizados da imagem ao longo do arco tangente à superfície, no método de arcos, para o grupo com o elemento-base 84, $d = 20$ mm e 17 elementos receptores ativos.

Figura 65 – Valores normalizados da imagem ao longo do arco tangente à superfície, no método de arcos, para o grupo com o elemento-base 84, $d = 20$ mm e 9 elementos receptores ativos.

Figura 66 – Máxima largura do lóbulo principal a -6 dB, para o método de arcos, considerando todos os grupos de elementos e todos os valores da distância d utilizados, para cada número de elementos receptores ativos.

Figura 67 – Máximo valor de lóbulo lateral, para o método de arcos, considerando todos os grupos de elementos e todos os valores da distância d utilizados, para cada número de elementos receptores ativos.

resultaram menores que $6 \mu\text{m}$, o que significa que os pontos formam um arco de círculo com boa aproximação. Os erros obtidos são compatíveis com os erros na detecção por STA, sem apresentar o desvio detectado no método STA por correlação cruzada.

5.3 Detecção de superfície pelo método de curva tangente

Neste experimento, a detecção de superfície foi feita pelo método de curva tangente, utilizando o elemento 15 do grupo como elemento central transmissor. Para aumentar a velocidade de processamento e reduzir a quantidade de dados de aquisição, menos elementos receptores podem ser utilizados. O mínimo número de elementos aceito pelo método, nas configurações dos experimentos, foi 7. Mas um tratamento melhor de casos especiais poderia reduzir esse número para 3. Para que os métodos de arcos e de curva tangente pudessem ser comparados, o mesmo número de elementos receptores por grupo foi adotado, ou seja, 9.

Os erros na detecção da superfície, obtidos pelo método de curva tangente, podem ser

Figura 68 – Método de arcos: Erros entre as posições dos pontos detectados e o círculo de referência calibrado, para diferentes valores da distância d .

Figura 69 – Método de arcos: Erros entre as posições dos pontos detectados e o círculo ajustado, para diferentes valores da distância d .

vistos na fig. 70 para o círculo de referência calibrado, e na fig. 71 para o círculo ajustado, para 9 elementos receptores. O ângulo θ_p é definido na fig. 32. Os marcadores não são muito visíveis devido à quantidade de pontos, maior que no método de arcos, mas a tendência geral pode ser observada, principalmente os erros máximos. Com a calibração do círculo de referência, os erros para o grupo central foram muito atenuados, mas não tanto como no método de arcos. Os erros absolutos para o círculo de referência calibrado resultaram maiores para os grupos mais à esquerda e mais à direita, devido às maiores inclinações, com valores absolutos menores que $25\text{ }\mu\text{m}$. Porém para os demais grupos o erro absoluto manteve-se abaixo de $6,5\text{ }\mu\text{m}$. Os erros absolutos para o círculo ajustado resultaram menores que $7\text{ }\mu\text{m}$, o que significa que os pontos formam um arco de círculo com boa aproximação. Os erros obtidos são compatíveis com os obtidos pelo método de arcos.

Figura 70 – Método de curva tangente: Erros entre as posições dos pontos detectados e o círculo de referência calibrado, para diferentes valores da distância d .

5.4 Comparação dos resultados pelos métodos de arcos e de curva tangente

Os erros na detecção de superfície, para os métodos de arcos e de curva tangente, foram comparados para vários valores de números de elementos ativos na recepção. Na fig. 72, para o método de arcos, os efeitos dos picos duplos podem ser observados quando se tem mais de 13 elementos na recepção. Na mesma figura, para o método de curva tangente, o erro é muito maior quando o número de elementos na recepção é maior que 21. Isso ocorre quando o eco está tão distorcido que o valor de pico ocorre em um lóbulo posterior ou anterior, e não no lóbulo principal. Essa distorção aparece para valores absolutos altos de θ_p . Os grupos de elementos mais à esquerda e mais à direita possuem os maiores valores absolutos de θ_p . Esses resultados mostram que o método de arcos comporta-se melhor na presença de sinais malformados. Mas pelo menos o método de curva tangente nunca gerou pontos muito distantes da superfície, nos

Figura 71 – Método de curva tangente: Erros entre as posições dos pontos detectados e o círculo ajustado, para diferentes valores da distância d .

experimentos efetuados. O máximo erro para o método de arcos é menor em relação ao método de curva tangente, mas para menos que 15 elementos receptores ativos os erros são equivalentes. O método de curva tangente, apesar de produzir mais pontos na detecção de superfície, não levou a um menor erro, para um número de elementos receptores menor que 13.

Figura 72 – Máximo erro absoluto entre as posições dos pontos detectados e o círculo de referência calibrado, considerando todos os valores da distância d utilizados, em função do número de elementos receptores ativos. Os resultados para os métodos de arcos e de curva tangente são mostrados.

Nas fig. 73 e 74, podem ser vistos sinais após correlação com o sinal de referência s_{ref} , com formato normal e distorcido, respectivamente. Podem ser observadas as diferenças na forma de onda e também na amplitude do sinal. As ondas distorcidas causam o aumento dos erros no método de curva tangente quando muitos elementos receptores são utilizados (fig. 72)

Na fig. 75, o erro RMS é mostrado. Para o método de curva tangente, o problema dos ecos distorcidos apresenta-se mais progressivo, enquanto o problema dos picos duplos, para o

Figura 73 – Sinal normal após correlação com o sinal de referência.

Figura 74 – Sinal após correlação com o sinal de referência, distorcido.

método de arcos, é mais destacado. Observa-se que, enquanto o método de arcos apresenta um menor valor máximo, o método de curva tangente tem uma faixa mais ampla com erros reduzidos, de 7 a 21 elementos receptores ativos.

5.5 Formação de imagem por STA

Neste experimento, uma imagem é formada por abertura sintética, pelo método STA, utilizando apenas um grupo de elementos do *array*, com todos os elementos do grupo transmitindo, um por vez. Não é utilizada apodização.

Nas imagens desta seção, as grades têm espaçamento de $\lambda_2/16$, em x e em z . O comprimento de onda λ_2 é definido para o alumínio na frequência central f_c . Resoluções maiores não resultaram em melhorias significativas. É utilizado somente um valor para a distância d , 20 mm. Como interface, é utilizado o círculo detectado pelo método de arcos.

As imagens podem ser vistas nas figuras 76, 77, 78 e 79, para dois elementos-base. Nas imagens, as linhas pontilhadas indicam a posição de referência não calibrada do bloco de

Figura 75 – Máximo valor RMS do erro entre as posições dos pontos detectados e o círculo de referência calibrado, considerando todos os valores da distância d utilizados, em função do número de elementos receptores ativos. Os resultados para os métodos de arcos e de curva tangente são mostrados.

alumínio, os círculos na parte inferior da interface indicam os pontos detectados, e a faixa de elementos receptores ativos é mostrada na parte inferior. Os ecos na interface concentram-se em uma pequena região. Para o elemento-base 84, a imagem resultou sensivelmente pior em relação à imagem para o elemento-base 48, principalmente para os furos mais distantes do grupo de elementos ativos. Na fig. 76, a largura do eco do furo central em -6 dB é $1,9\lambda_2$, onde λ_2 é o comprimento de onda no alumínio para a frequência central $f_c = 5$ MHz.

Figura 76 – Imagem do bloco 1 pelo método STA para o elemento-base 48.

Os ecos estão corretamente posicionados sobre as partes das bordas dos furos que estão mais próximas da região ativa da interface do bloco, ou seja, a região da interface com ecos

Figura 77 – Imagem do bloco 1 pelo método STA para o elemento-base 84.

Figura 78 – Imagem do bloco 2 pelo método STA para o elemento-base 48.

Figura 79 – Imagem do bloco 2 pelo método STA para o elemento-base 84.

significativos. Essas partes das bordas dos furos recebem as frentes das ondas provenientes do *array* com incidência aproximadamente normal. Porém a largura dos ecos aumenta muito para os furos mais distantes da região ativa da interface. Se fosse utilizado apenas um elemento emissor, a qualidade da imagem seria ainda pior.

5.5.1 Ondas de cisalhamento

Para produzir as fig. 80 e 81 do bloco 1, foi utilizada a velocidade de propagação das ondas de cisalhamento no material do bloco, com valor de $c_{c2} = 3150$ m/s. Na água somente ocorrem ondas longitudinais, mas na interface pode ocorrer conversão de modo, com a geração de ondas de cisalhamento no alumínio.

Devido ao comprimento de onda menor em relação às ondas longitudinais, os ecos resultaram menores, porém somente os ecos de parte dos furos podem ser visualizados. Para o elemento-base 48, somente os ecos dos três furos mais à esquerda e dos três mais à direita podem ser vistos, e para o elemento-base 84, somente os ecos dos três furos mais à direita podem ser vistos. Além disso, como as ondas longitudinais e de cisalhamento ocorrem simultaneamente no objeto, entre os furos e a parte inferior da interface podem ser vistos ruídos devidos às ondas longitudinais, que são mais rápidas que as ondas de cisalhamento. A presença dos ecos dos furos, ainda que parcialmente, nas posições corretas, indica a existência de ondas de cisalhamento. A existência de regiões nas quais ecos não são detectados torna inadequado esse procedimento de formação de imagem, a não ser que a área de interesse seja restrita.

Figura 80 – Imagem do bloco 1 pelo método STA, utilizando a velocidade de propagação de ondas de cisalhamento no bloco, para o elemento-base 48.

Figura 81 – Imagem do bloco 1 pelo método STA, utilizando a velocidade de propagação de ondas de cisalhamento no bloco, para o elemento-base 84.

5.6 Formação de imagem por abertura sintética combinada

Neste experimento, uma imagem é formada pela soma coerente de 9 subimagens. Cada subimagem é gerada por abertura sintética utilizando apenas um grupo de elementos do *array*, e um elemento transmissor por grupo, o elemento central. É aplicada apodização na recepção, descrita na seção 4.8. Na formação de cada subimagem, como somente um elemento transmite, a relação sinal-ruído é baixa.

Nas imagens desta seção, as grades têm espaçamento de $\lambda_2/16$, em x e em z , exceto quando indicado outro valor. O comprimento de onda λ_2 é definido para o alumínio na frequência central f_c . Resoluções maiores não resultaram em melhorias significativas. É utilizado somente um valor para a distância d , 20 mm. Como interface, é utilizado o círculo detectado pelo método de arcos.

As imagens combinadas podem ser vistas nas fig. 82 e 83. As linhas pontilhadas indicam a posição de referência não calibrada do bloco de alumínio, os círculos na parte inferior da interface indicam os pontos detectados e a faixa de elementos receptores ativos é mostrada na parte inferior.

Figura 82 – Imagem do bloco 1 por abertura sintética combinada, com espaçamento de grade $\lambda_2/4$.

Os ecos estão corretamente posicionados sobre as partes das bordas dos furos que estão mais próximas da região ativa da interface do bloco, ou seja, a região da interface com ecos significativos. A resolução obtida é aproximadamente a mesma para todos os furos, o que não acontece nas imagens por STA que utilizam apenas um grupo de elementos (seção 5.5). Os resultados mostram que a combinação de subimagens levou a uma melhoria na resolução,

Figura 83 – Imagem do bloco 2 por abertura sintética combinada, com espaçamento de grade $\lambda_2/4$.

mesmo utilizando apenas um elemento transmissor por grupo. Na fig. 82, a largura do eco do furo central em -6 dB é $0,98\lambda_2$, onde λ_2 é o comprimento de onda no alumínio para a frequência central $f_c = 5$ MHz. Ou seja, obteve-se uma largura que é quase a metade da largura para a imagem STA com um grupo de elementos. No bloco 2 o problema de reverberação é pior, pois as reverberações causadas pelos furos inferiores interferem nas imagens dos demais furos.

A resolução de grade utilizada é baixa, porém efeitos de *aliasing* não foram observados. A utilização do sinal analítico na formação de imagem permitiu uma resolução de grade menor, pois a frequência máxima $f_{\max}$ no sinal medida em -20 dB foi reduzida de $8,3$ MHz para $3,1$ MHz. Para a frequência máxima com o uso de sinal analítico, $\lambda_{\min} = c_2/f_{\max} = 6426/(3,1 \times 10^6) = 2,1$ mm. O espaçamento de grade $\lambda_2/4 = 0,32$ mm precisa ser menor que $\lambda_{\min}/4\sqrt{2} = 0,37$ mm, o que ocorre na configuração utilizada. Utilizou-se $\lambda_{\min}/4\sqrt{2}$ em vez de $\lambda_{\min}/2$ pois na formação de imagem há uma compressão das ondas, e foi considerada a distância entre pontos da grade medida na diagonal, o que explica o fator $\sqrt{2}$. Quando a propagação é na direção perpendicular ao *array*, as distâncias entre os picos de ondas na imagem, antes da obtenção do envelope, são divididas por 2. Isso ocorre pois são consideradas a ida e a volta das ondas.

O ganho no equipamento de aquisição foi ajustado para os ecos provenientes da interface, mais fortes que os ecos dos furos. Como foram utilizados os mesmos sinais na detecção de superfície e na formação de imagem, o ganho definido não é ótimo com relação aos ecos dos furos. Isso causou uma perda na relação sinal/ruído. Para resolver esse problema, novas aquisições teriam que ser feitas para a formação de imagem, o que aumentaria os tempos de aquisição e de transferência de dados.

Quando a imagem é normalizada pelo pico, se não há defeitos a imagem simplesmente mostra o ruído de fundo. Por esse motivo, em ensaios não destrutivos, normalmente calibra-se o sistema com uma peça contendo defeitos com posição e dimensões controladas, e o ganho é mantido constante.

5.6.1 Imagem sem apodização

Na fig. 84, pode ser vista a imagem do bloco 1 com apodização e melhor resolução em relação à fig. 82, com espaçamento da grade de $\lambda_2/16$. A imagem foi formada sem apodização na fig. 85, onde podem ser observadas manchas abaixo dos ecos dos furos, com nível máximo em -25 dB. A apodização conseguiu eliminar esses ruídos com eficácia.

Figura 84 – Imagem do bloco 1 por abertura sintética combinada, com apodização.

5.6.2 Aplicação do método PCF

Na imagem da fig. 84 foi aplicado o método com o parâmetro $\gamma_{PCF} = 2,0$. O método PCF é muito útil neste caso pois a imagem é produzida com somente um elemento transmissor por grupo, o que leva a uma relação sinal-ruído desfavorável. O resultado, na fig. 86, mostra que o PCF removeu boa parte das reverberações e do ruído de fundo, e também os ecos na região da interface. Porém o PCF achatou os ecos dos furos. O método PCF foi altamente eficaz, porém os resultados mostram que é necessário ajustar o parâmetro γ_{PCF} de modo a não reduzir demasiadamente os ecos.

Figura 85 – Imagem do bloco 1 por abertura sintética combinada, sem apodização.

Figura 86 – Imagem do bloco 1 por abertura sintética combinada, com aplicação do PCF.

5.6.3 Ondas de cisalhamento

Para produzir a fig. 87, foi utilizada a velocidade de propagação das ondas de cisalhamento no material do bloco, com valor de $c_{c2} = 3150$ m/s. Na água somente ocorrem ondas longitudinais, mas na interface pode ocorrer conversão de modo, com a geração de ondas de cisalhamento no alumínio. Devido ao comprimento de onda menor em relação às ondas longitudinais, os ecos resultaram menores, porém somente os ecos dos três furos mais à esquerda e dos três mais à direita podem ser vistos. Além disso, como as ondas longitudinais e de cisalhamento ocorrem simultaneamente no objeto, entre os furos e a parte inferior da interface podem ser vistos ruídos devidos às ondas longitudinais, que são mais rápidas que as ondas de cisalhamento. A presença dos ecos dos furos, ainda que parcialmente, nas posições corretas, indica a existência de ondas de cisalhamento.

Figura 87 – Imagem do bloco 1 por abertura sintética combinada, utilizando a velocidade de propagação de ondas de cisalhamento no bloco.

5.6.4 Ondas de cisalhamento com o método PCF

Na fig. 88, foi utilizada a velocidade de propagação das ondas de cisalhamento no material do bloco, e foi aplicado o método PCF com o parâmetro $\gamma_{PCF} = 2,0$. O PCF conseguiu atenuar boa parte do ruído gerado pelas ondas longitudinais, mas mantendo os ecos dos furos. Porém a imagem ainda não é adequada, pois os ecos dos furos centrais estão ausentes.

Figura 88 – Imagem do bloco 1 por abertura sintética combinada, utilizando a velocidade de propagação de ondas de cisalhamento no bloco e o método PCF.

5.7 Formação de imagem por STA combinada

Neste experimento, uma imagem é formada pela soma coerente de 9 subimagens. Cada subimagem é gerada por STA utilizando apenas um grupo de elementos do *array*, com todos os elementos do grupo transmitindo, um por vez. Apodização na recepção é aplicada, descrita na seção 4.8. O objetivo deste experimento é analisar as perdas causadas pelo uso de somente um elemento transmissor por grupo (seção 5.6).

Nas imagens desta seção, as grades têm espaçamento de $\lambda_2/16$, em x e em z . O comprimento de onda λ_2 é definido para o alumínio na frequência central f_c . Resoluções maiores não resultaram em melhorias significativas. É utilizado somente um valor para a distância d , 20 mm. Como interface, é utilizado o círculo detectado pelo método de arcos.

As imagens combinadas podem ser vistas nas fig. 89 e 90. As linhas pontilhadas indicam a posição de referência não calibrada do bloco de alumínio, os círculos na parte inferior da interface indicam os pontos detectados e a faixa de elementos receptores ativos é mostrada na parte inferior.

Os ecos estão corretamente posicionados sobre as partes das bordas dos furos que estão mais próximas da região ativa da interface do bloco, ou seja, a região da interface com ecos significativos. No bloco 2 o problema de reverberação é pior, como na seção 5.6.

Em comparação com a formação de imagem combinada com somente um elemento emissor por grupo (seção 5.6), a resolução é praticamente a mesma, mas o ruído de fundo é

Figura 89 – Imagem do bloco 1 pelo método STA, combinada.

Figura 90 – Imagem do bloco 2 pelo método STA, combinada.

menor. Na região entre os furos e a parte inferior da interface, na fig. 89, o pico do ruído de fundo diminuiu de -33 dB para -42 dB, um ganho de 9 dB. Na fig. 89, a largura do eco do furo central em -6 dB é $1,0\lambda_2$, onde λ_2 é o comprimento de onda no alumínio para a frequência central $f_c = 5$ MHz. Essa largura é equivalente à da imagem combinada com um elemento transmissor por grupo.

5.7.1 Imagem sem apodização

Na fig. 91, a imagem do bloco 1 é vista com faixa dinâmica de 50 dB. Na fig. 92, a imagem foi formada sem apodização. A faixa dinâmica teve que ser aumentada em relação à seção 5.6.1, pois com faixa de 40 dB era difícil identificar as diferenças. Mas mesmo com faixa de 50 dB as diferenças são mais sutis que no outro caso.

Figura 91 – Imagem do bloco 1 pelo método STA, combinada, com faixa dinâmica de 50 dB.

5.7.2 Aplicação do método PCF

Na imagem da fig. 89 foi aplicado o método com o parâmetro $\gamma_{PCF} = 2,0$. O resultado, na fig. 93, mostra que o PCF removeu boa parte das reverberações e do ruído de fundo, e também os ecos na região da interface. Neste caso o método PCF foi altamente eficaz. Não foi observado o achatamento dos ecos ocorrido na seção 5.6.2.

5.7.3 Ondas de cisalhamento

Para produzir a fig. 94, foi utilizada a velocidade de propagação das ondas de cisalhamento no material do bloco, com valor de $c_{c2} = 3150$ m/s. Devido ao comprimento de onda menor em

Figura 92 – Imagem do bloco 1 pelo método STA, combinada, sem apodização, com faixa dinâmica de 50 dB.

Figura 93 – Imagem do bloco 1 pelo método STA, combinada, com aplicação do PCF.

relação às ondas longitudinais, os ecos resultaram menores, porém somente os ecos dos três furos mais à esquerda e dos três mais à direita podem ser vistos. O resultado é semelhante à da seção 5.6.3, porém com menor ruído de fundo.

Figura 94 – Imagem do bloco 1 pelo método STA, combinada, utilizando a velocidade de propagação de ondas de cisalhamento no bloco.

5.7.4 Ondas de cisalhamento com o método PCF

Na fig. 95, foi utilizada a velocidade de propagação das ondas de cisalhamento no material do bloco, e foi aplicado o método PCF com o parâmetro $\gamma_{PCF} = 2,0$. O PCF conseguiu atenuar boa parte do ruído gerado pelas ondas longitudinais, mas mantendo os ecos dos furos. Porém a imagem ainda não é adequada, pois os ecos dos furos centrais estão ausentes. O resultado é semelhante à da seção 5.6.4, mas com a presença de alguns ruídos adicionais pouco significativos.

5.8 Formação de imagem por *array* virtual

Neste experimento, a imagem é formada por *array* virtual, com e sem o princípio de Fermat. Não utilizou-se apodização e considerou-se a posição de referência não calibrada do bloco, para $d = 20$ mm, ou seja, a superfície não foi detectada automaticamente.

Nas imagens desta seção, as grades têm espaçamento de $\lambda_2/16$, em x e em z . O comprimento de onda λ_2 é definido para o alumínio na frequência central f_c . Resoluções maiores não resultaram em melhorias significativas. As linhas pontilhadas indicam a posição de referência não calibrada do bloco de alumínio, os círculos na parte inferior da interface indicam os pontos

Figura 95 – Imagem do bloco 1 pelo método STA, combinada, utilizando a velocidade de propagação de ondas de cisalhamento no bloco e o método PCF.

detectados pelo método de arcos, e a faixa total de elementos do *array* é mostrada na parte inferior da imagem. Os pontos detectados pelo método de arcos são indicados apesar de não terem sido utilizados, apenas para ilustração.

Quando o princípio de Fermat é utilizado, a busca é feita em dois níveis. No primeiro nível, a discretização da interface é mais espaçada, e no segundo mais fina. No segundo nível a busca é feita apenas ao redor do ponto obtido no primeiro nível. Esse esquema supõe que a interface possui apenas curvas suaves. Para o processamento do princípio de Fermat, a interface foi discretizada com passo de $\lambda_1/4$ entre os ângulos -170° e -10° , onde 0° está definido na direção e no sentido de x .

O *array* virtual foi definido entre os ângulos -116° e -64° sobre a interface, onde 0° está definido na direção e no sentido de x . Essa faixa de ângulos utiliza quase todos os grupos do *array*, com os três primeiros grupos e os três últimos não utilizados. Para ondas longitudinais, o número de elementos utilizados nos *arrays* virtuais é mostrado na tabela 1.

Tabela 1 – Número de elementos utilizados no *array* virtual, para ondas longitudinais.

Espaçamento	Número de elementos
λ_2	26
$\lambda_2/2$	51
$\lambda_2/4$	100
$\lambda_2/8$	199

Na fig. 96, podem ser vistas imagens do bloco 1 geradas pelo método de *array* virtual

utilizando o princípio de Fermat no retorno, para um espaçamento entre elementos do *array* virtual de λ_2 e $\lambda_2/2$. Com um espaçamento de $\lambda_2/4$ a melhora não foi significativa em relação ao resultado com $\lambda_2/2$. Podem ser observados alguns pré-ecos, abaixo dos ecos verdadeiros.

Em comparação com os resultados pelo método de abertura sintética combinada, na seção 5.6, a resolução é um pouco pior, a zona morta na interface maior e o ruído de fundo menor. Porém as imagens são semelhantes, e a diferença mais perceptível é a presença dos pré-ecos.

Na fig. 97 podem ser vistas imagens do bloco 1 geradas pelo método de *array* virtual sem a utilização do princípio de Fermat no retorno, para um espaçamento entre elementos do *array* virtual de $\lambda_2/4$ e $\lambda_2/8$. Com um espaçamento de $\lambda_2/16$ a melhora não foi significativa em relação ao resultado com $\lambda_2/8$. Também podem ser observados alguns pré-ecos, abaixo dos ecos verdadeiros, e um nível de ruído mais elevado em relação à fig. 96. Porém a resolução é semelhante à da fig. 96, mesmo sem o uso do princípio de Fermat no caminho de retorno das ondas acústicas.

Na fig. 98 pode ser vista uma imagem do bloco 2 gerada pelo método de *array* virtual utilizando o princípio de Fermat no retorno, para um espaçamento entre elementos do *array* virtual de $\lambda_2/2$. Com um espaçamento de $\lambda_2/4$ a melhora também não foi significativa em relação ao resultado com $\lambda_2/2$, como no bloco 1. Nesse caso, os ecos dos furos inferiores estão dentro da zona morta da interface, porém ainda podem ser visualizados.

Na fig. 99 pode ser vista uma imagem do bloco 2 gerada pelo método de *array* virtual sem a utilização do princípio de Fermat no retorno, para um espaçamento entre elementos do *array* virtual de $\lambda_2/8$. Com um espaçamento de $\lambda_2/16$ a melhora também não foi significativa em relação ao resultado com $\lambda_2/8$, como no bloco 1. Nessa imagem, a zona morta e o ruído de fundo já estão quase encobrindo os ecos dos furos, que ainda têm uma resolução equivalente à da fig. 98.

As fig. 96, 97, 98 e 99 mostram que o método sem o princípio de Fermat exige 4 vezes mais elementos no *array* virtual e produz imagens com qualidade pior, em relação ao método com o princípio de Fermat. No método de *array* virtual sem a utilização do princípio de Fermat, o funcionamento é como no método SAFT, isto é, apenas um elemento emite e recebe de cada vez. No SAFT o passo do *array* d_p crítico é $\lambda_{\min}/4$, onde $\lambda_{\min} = c_2/f_{\max}$ e $f_{\max}$ é a máxima frequência contida no pulso de excitação. Se a frequência máxima contida nos pulsos de ultrassom utilizados é $f_{\max} = 2f_c$, o passo crítico é $\lambda_2/8$, onde $\lambda_2 = c_2/f_c$. Esse passo crítico calculado coincide com os resultados experimentais, apesar da curvatura do *array* virtual.

No método de *array* virtual com a utilização do princípio de Fermat, o funcionamento é mais complexo, pois na ida é utilizado o *array* virtual, mas na volta o *array* real é empregado. Considerando o método STA como exemplo, o seu passo crítico é o dobro em relação ao método SAFT. Porém o método de *array* virtual com a utilização do princípio de Fermat exigiu apenas um

Figura 96 – Imagem do bloco 1 pelo método de *array* virtual com o princípio de Fermat, para um espaçamento de (a) λ_2 e (b) $\lambda_2/2$ entre elementos do *array* virtual.

Figura 97 – Imagem do bloco 1 pelo método de *array* virtual, sem o princípio de Fermat, para um espaçamento de (a) $\lambda_2/4$ e (b) $\lambda_2/8$ entre elementos do *array* virtual.

Figura 98 – Imagem do bloco 2 pelo método de *array* virtual com o princípio de Fermat, para um espaçamento de $\lambda_2/2$ entre elementos do *array* virtual.

Figura 99 – Imagem do bloco 2 pelo método de *array* virtual, sem o princípio de Fermat, para um espaçamento de $\lambda_2/8$ entre elementos do *array* virtual.

quarto do número de elementos virtuais exigidos pelo método sem a utilização do princípio de Fermat.

O tempo de execução foi medido pela média de 5 execuções e pode ser visto na tabela 2. Apesar de o método que não utiliza o princípio de Fermat ter 4 vezes mais elementos no *array* virtual que o método com o princípio de Fermat, o tempo de execução foi aproximadamente 8 vezes menor para o primeiro. O programa utilizado no processamento foi pouco otimizado, mas esse resultado mostra o peso que o princípio de Fermat representa em termos de processamento. Com uma otimização maior do *software* e dos parâmetros para a formação de imagem, menores tempos de execução podem ser obtidos, mas o esforço pode não ser justificado devido à baixa qualidade das imagens, no caso do método que não utiliza o princípio de Fermat.

Tabela 2 – Tempos de execução para o método de *array* virtual.

	Espaçamento do <i>array</i> virtual	Tempo de execução (s)
Com o princípio de Fermat	$\lambda_2/2$	180
Sem o princípio de Fermat	$\lambda_2/8$	22

5.8.1 Simulação de erro de posicionamento da interface

Para simular um erro no posicionamento da interface detectada, foi adicionado o valor de $2\lambda_1$ (0,6 mm) na posição do centro do círculo que representa a interface, em x e em z . Foi utilizado o método de *array* virtual com o princípio de Fermat, para um espaçamento de $\lambda_2/2$ entre elementos do *array* virtual. O resultado pode ser visto na fig. 100, onde pode-se observar que os ecos estão deslocados em relação aos furos, mas ainda podem ser identificados. Se o objetivo é a detecção de defeitos, sem a necessidade de detecção precisa das posições, esse grau de erro não impede o funcionamento do método. Deformações no formato da interface podem provocar erros mais sérios, como será visto na seção 5.9.

5.8.2 Aplicação do método PCF

Uma imagem foi gerada pelo método de *array* virtual com o princípio de Fermat, para um espaçamento de $\lambda_2/2$ entre elementos do *array* virtual, e nela foi aplicado o PCF, com o parâmetro $\gamma_{PCF} = 2,0$. O resultado, na fig. 101, mostra que o PCF removeu os pré-ecos, boa parte das reverberações e do ruído de fundo. Nesse caso, o PCF foi altamente eficaz.

No método de *array* virtual que não utiliza o princípio de Fermat, porém, o PCF atenuou quase toda a imagem, com a remoção total dos ecos dos furos, o que mostra que nesse método os sinais recebidos pelos elementos do transdutor têm pouca coerência de fase.

Figura 100 – Imagem do bloco 1 pelo método de *array* virtual com o princípio de Fermat, simulando um erro no posicionamento da interface, para um espaçamento de $\lambda_2/2$ entre elementos do *array* virtual.

Figura 101 – Imagem final do bloco 1 pelo método de *array* virtual com o princípio de Fermat e aplicação do PCF, para um espaçamento de $\lambda_2/2$ entre elementos do *array* virtual.

5.8.3 Ondas de cisalhamento

Para produzir a fig. 102 do bloco 1, foi utilizada a velocidade de propagação para ondas de cisalhamento no material do bloco, com valor de $c_{c2} = 3150$ m/s. Para o processamento foi utilizado o método de *array* virtual com o princípio de Fermat, para um espaçamento de $\lambda_2/4$ entre elementos do *array* virtual.

Devido ao comprimento de onda menor, o tamanho dos ecos também é menor, porém somente os ecos dos furos laterais podem ser visualizados. Além disso, como as ondas longitudinais e de cisalhamento ocorrem simultaneamente no objeto, entre os furos e a parte inferior da interface podem ser vistos ruídos devidos às ondas longitudinais, mais rápidas que as ondas de cisalhamento. A presença dos ecos dos furos, ainda que parcialmente, nas posições corretas, indica a existência de ondas de cisalhamento. Como nos outros experimentos deste trabalho usando ondas de cisalhamento, a existência de regiões nas quais ecos não são detectados torna inadequado esse procedimento de formação de imagem, a não ser que a área de interesse seja restrita. A presença de ondas de cisalhamento explica parte dos ruídos que aparecem na região além dos ecos dos furos, nas imagens usando ondas longitudinais, pois as ondas de cisalhamento são mais lentas.

Figura 102 – Imagem do bloco 1 pelo método de *array* virtual com o princípio de Fermat, utilizando a velocidade de propagação de ondas de cisalhamento no bloco, para um espaçamento de $\lambda_2/4$ entre elementos do *array* virtual.

5.9 Efeitos de erros na detecção de superfície

Para simular os efeitos de erros na detecção da interface, o círculo detectado pelo método de arcos, para $d = 20$ mm, foi modificado. No caso 1, $\bar{z}_c$ foi reduzido em 2,1 mm e $\bar{R}_{cil}$ foi reduzido em 1,95 mm, resultando em um erro absoluto máximo na posição da superfície de 0,15 mm ou $\lambda_1/2$ na região na qual θ_p tem um valor entre -30° e 30° . Essa região representa a faixa em que os pontos foram detectados. O parâmetro $\bar{z}_c$ é a coordenada em z do centro do círculo ajustado, e $\bar{R}_{cil}$ o seu raio.

No caso 2, $\bar{z}_c$ foi reduzido em 3,9 mm e $\bar{R}_{cil}$ foi reduzido em 3,6 mm, resultando em um erro absoluto máximo na posição da superfície de 0,30 mm ou λ_1 na região de pontos detectados. Foram então formadas imagens combinadas para o bloco 1, por abertura sintética com 1 elemento transmissor por grupo, utilizando as interfaces alteradas.

Figura 103 – Efeitos de erros na detecção da interface: (a) sem erros adicionados, (b) caso 1 e (c) caso 2. Os furos no bloco são indicados pelas linhas pontilhadas. A faixa dinâmica é de 40 dB.

A fig. 103a mostra a imagem formada utilizando a interface original. Na fig. 103b o caso 1 é mostrado e na fig. 103c o caso 2 é mostrado. Pode-se observar que, com as interfaces alteradas, os ecos ficaram mais alongados e em posições deslocadas.

Essas simulações são casos extremos. Neles a distância entre o círculo ajustado alterado e o círculo de referência, fora da região de pontos detectados, é muito maior que no interior da região. Mas mostram que erros de detecção de interface com valores de décimos de milímetro podem causar distorções significativas na imagem. A diferença entre o círculo ajustado alterado e o círculo de referência, fora da região de pontos detectados, pode ser observada na fig. 103, à esquerda e à direita das imagens, em (b) e (c).

5.10 Desempenho em uma CPU de uso genérico

Neste experimento, foi analisado o tempo de processamento para formação da fig. 82, com execução em uma CPU de uso geral. Quando o processamento é feito no PC, a eficiência na transferência de dados entre o equipamento de aquisição e o PC influencia muito nos resultados,

pois a quantidade de dados transferidos por imagem normalmente é maior do que no caso com processamento interno no equipamento de aquisição.

Utilizou-se espaçamento da grade de $\lambda_2/4$ na formação de imagem, com $d = 20$ mm e o bloco 1. A imagem resultante tem 244 colunas e 160 linhas, ou 39040 pontos. Mas como os pontos abaixo da interface não são processados, o número efetivo de pontos é 30511.

O equipamento de aquisição utilizado nos experimentos não é otimizado para processamento por abertura sintética em PCs, e consequentemente não foi possível obter uma taxa de transferência adequada pela conexão USB 2.0. O processamento, então, foi executado a partir de dados capturados previamente. O tempo de aquisição foi estimado considerando uma taxa de repetição de pulso (PRF - *pulse repetition frequency*) de 5 kHz, e uma taxa de transferência de 35 MB/s, que é um valor realístico para conexões USB 2.0 “High-speed” (BONI et al., 2012).

Com um tempo de aquisição de $70 \mu\text{s}$ na frequência de amostragem $f_a = 40$ MHz, a quantidade de dados por imagem é $9 \text{ (aquisições)} \times 2 \text{ (bytes/amostra)} \times 2800 \text{ (amostras)} \times 32 \text{ (canais de recepção)} = 1,613 \text{ MB}$. Com esses parâmetros, o tempo total de aquisição resultante vale $9 \text{ (aquisições)} \times (1/\text{PRF}) + 1.613 \text{ (dados)} / 35 \text{ (taxa de transferência)} = 47,9 \text{ ms}$. Assume-se que o equipamento controla toda a sequência de aquisição, e somente uma sequência de transferência de dados é executada para cada imagem.

Os tempos de execução mostrados na tabela 3, para cálculos em precisão simples e dupla, foram obtidos pela média de 100 execuções. A medição dos tempos de processamento começam com os dados dos sinais de ultrassom já carregados do disco rígido e armazenados na memória. As diferenças entre os resultados de cálculos em simples e dupla precisão foram medidas, para cada valor da distância d entre o objeto e o *array*. Para o método de arcos, a máxima distância entre os pontos correspondentes detectados nas duas precisões de ponto flutuante resultou em $0,0063 \mu\text{m}$. Para o método de curva tangente, o valor obtido foi $0,72 \mu\text{m}$, mais de 100 vezes maior, mas ainda menor que $1 \mu\text{m}$. Na formação de imagem, a máxima diferença ficou no nível de -82 dB em relação ao valor máximo na imagem. As pequenas diferenças indicam que precisão simples é adequada para os cálculos. Com a utilização de precisão dupla o tempo total de execução para a detecção de interface, ajuste de círculo e formação de imagem resultou em 1,83 vezes o tempo para precisão simples.

Os tempos para ajuste de círculo são maiores em precisão simples pois o cálculo é sempre feito em precisão dupla, e para precisão simples há o custo da conversão de tipos entre precisão simples e dupla. O método de curva tangente produz mais pontos, e consequentemente o ajuste de curva é mais demorado.

Se for considerada a execução serial da aquisição e do processamento, utilizando o método de arcos e precisão simples, a taxa de formação de imagens calculada é $10,2 \text{ Hz}$. A latência total para a aquisição, detecção de interface, ajuste de círculo e a formação de imagem, também para o método de arcos e precisão simples, resultou em $97,8 \text{ ms}$. A latência causada pela

Tabela 3 – Tempos de execução em CPU.

Operação	Tempo (ms)	
	Precisão simples	Precisão dupla
Aquisição (estimada)	47,9	47,9
Detecção de interface		
Arcos	5,51	6,30
Curva tangente	5,23	5,68
Ajuste de círculo		
Arcos	0,000158	0,000153
Curva tangente	0,000583	0,000480
Formação de imagem	44,4	85,0

visualização da imagem pode adicionar por exemplo outros 50 ms, valor este que depende do dispositivo gráfico e do monitor utilizado. Se o processamento fosse feito em paralelo à aquisição dos dados para a próxima imagem, a taxa de imagens poderia aumentar, mas como parte dos recursos do sistema seriam ocupados pela aquisição, o processamento seria mais lento. Portanto, o resultado seria uma taxa de imagens maior mas com uma latência também maior.

Na detecção de superfície, a preparação dos sinais de ultrassom capturados ocupou a maior parte do tempo de processamento. Para o método de arcos, 90,3 %, e para o método de curva tangente, 99,7 %. Se a preparação não fosse considerada, o processamento do método de arcos seria 32 vezes mais lento que no método de curva tangente, mas ambos os métodos seriam executados em menos de 1 ms.

Como a diferença entre o tempo de processamento e o tempo de aquisição é pequena, otimizações no processamento têm o ganho dividido aproximadamente por 2. Por exemplo, uma redução de 10 % no tempo de processamento para precisão simples corresponderia a uma redução de apenas 4,5 % no tempo total de aquisição mais processamento. O tempo de aquisição poderia ser reduzido consideravelmente com a utilização de uma conexão mais rápida, por exemplo USB 3.0 "SuperSpeed".

5.11 Desempenho com OpenCL

Na seção 5.10, os tempos de execução para a formação de imagem foram medidos sem a utilização do PCF (seção 2.7). Com o PCF, em precisão simples, o tempo aumentou de 44,4 ms para 107 ms, um aumento de 2,4×. O código utilizado nesses experimentos é chamado de implementação padrão.

Para que o desempenho aumentasse, o código teria que ser mais otimizado, por exemplo com instruções vetoriais da CPU. Instruções vetoriais são instruções SIMD (*single instruction, multiple data*), que processam vários dados com uma única instrução. Nas CPUs x86-64, instruções vetoriais são implementadas pelas extensões SSE e AVX, entre outras. As instruções SSE processam quatro valores de ponto flutuante em precisão simples de cada vez, e instruções

AVX processam oito valores de ponto flutuante em precisão simples de cada vez (INTEL, 2014). Teoricamente as instruções SSE são quatro vezes mais rápidas que instruções escalares, e as AVX são oito vezes mais rápidas. Na prática os ganhos podem ser menores, devido a fatores como limitações de velocidade do sistema de memória.

Outra solução é o uso de OpenCL, um padrão aberto para programação paralela (KHRONOS OPENCL WORKING GROUP, 2012) que suporta dispositivos como GPUs e CPUs. Com o tempo as GPUs foram adquirindo capacidade de programação. Os fabricantes, então, em vez de utilizar essa capacidade apenas para processar gráficos em 3D, passaram a permitir processamento genérico. Atualmente duas soluções principais permitem o acesso a essa capacidade de programação, o CUDA¹, da NVIDIA, que é utilizado apenas por GPUs da NVIDIA, e o OpenCL², que é suportado por muitos dispositivos de vários fabricantes.

Nos experimentos desta seção, foram utilizadas as implementações OpenCL da NVIDIA, da Intel e da AMD, e os desempenhos foram comparados. Os tempos de processamento foram obtidos pela média de 100 execuções. Foi utilizada grade de imagem com espaçamento de $\lambda_2/4$, e os cálculos utilizaram precisão simples. O PCF foi utilizado com $\gamma_{PCF} = 1$.

Na seção 5.10, foi mostrada a diferença máxima entre os resultados utilizando precisão simples e dupla, sem PCF na formação de imagem. Com o PCF, as diferenças são maiores. Em alguns pontos da imagem, a diferença absoluta chega a -32 dB em relação ao valor máximo na imagem. Mas se as dez maiores diferenças absolutas forem ignoradas, a diferença absoluta máxima cai para -47 dB. Os erros são altos mas ocorrem em pontos isolados, o que é indicado pela diferença absoluta média, que vale -116 dB, um valor muito inferior. Quando a faixa dinâmica na imagem é de -40 dB, esses erros são aceitáveis, mas se a faixa dinâmica for maior é preciso analisar a necessidade do uso de precisão dupla.

As implementações OpenCL da Intel e da AMD suportam somente CPUs no sistema utilizado, enquanto a implementação da NVIDIA suporta somente GPUs da fabricante. Foi utilizada uma GPU com processador NVIDIA GT-240, uma placa antiga, que não suporta processamento em precisão dupla, não possui *cache* de memória global e utiliza PCI Express 2.0.

GPUs fazem uma grande diferença quando possuem alto poder de processamento e grande largura de banda de memória. Por exemplo, há GPUs com largura de banda de 288 GB/s e capacidade de processamento de 4,29 TFLOPS em precisão simples (NVIDIA, 2013b). No caso da GT-240 utilizada, a largura de banda nominal é de apenas 790 MHz (*clock*) $\times$ 2 (DDR) $\times$ (128/8) (largura do barramento em bytes) = 25,3 GB/s. A GPU tem 96 núcleos CUDA (NVIDIA, 2013a), enquanto GPUs mais rápidas chegam a ter por exemplo 2880 (NVIDIA, 2013b). Mas o objetivo é verificar se mesmo uma GPU de baixa capacidade pode ajudar no processamento, com um baixo custo.

O funcionamento do código padrão pode ser visto na fig.104. O código utiliza *multith-*

¹ <http://www.nvidia.com/object/cuda_home_new.html>, acesso em 20 jun. 2014.

² <<https://www.khronos.org/opencl/>>, acesso em 20 jun. 2014.

reading, mas a implementação do método PCF é direta, sem o uso de instruções vetoriais. Na implementação com OpenCL, o código que é repetido para cada grupo de elementos na fig.104 precisou ser quebrado, pois parte da tarefa foi executada por código C++ normal e parte por código OpenCL. Devido à relativamente baixa largura de banda do barramento PCI Express, que conecta a GPU ao sistema, é recomendável diminuir a transferência de dados entre a GPU e o sistema (NVIDIA, 2013a), que é chamado de *host*. Para ilustrar o problema, a taxa de transferência do *host* à GPU obtida foi de apenas 6,4 GB/s. Portanto, o ideal seria passar a maior parte possível do processamento para a GPU, no caso específico do experimento. Mas a aplicação de atrasos, que consiste em ler posições de memória de forma não homogênea, poderia ficar muito lenta na GPU, que não tem *cache* de memória global e tem memória lenta.

Figura 104 – Fluxograma da formação de imagem para a implementação padrão.

Na fig. 105 é mostrado o funcionamento com OpenCL, onde a rotina P1 é executada por código normal na CPU, e as rotinas T e P2 utilizam OpenCL. A rotina T, que faz a transferência de dados da memória do *host* para a memória da GPU, envolve o *host* e a GPU. A GPU processa dados usando sua memória exclusiva. A rotina P2 utiliza um *kernel* OpenCL que roda na GPU (apêndice B). Os *kernels* são programados em uma linguagem semelhante à ISO C99, com

Figura 105 – Fluxograma da formação de imagem para a implementação com OpenCL.

extensões. Quando o OpenCL é utilizado em CPUs, as tarefas de transferência de dados não são necessárias, ou melhor, não devem ser executadas para não deixar o processamento mais lento. A rotina P1 é responsável por gerar a sequência de dados que é transferida para a GPU ou é utilizada diretamente pela CPU. A ordem dos dados é muito importante, pois cada dispositivo tem as suas características de desempenho. Em CPUs, é recomendável que *threads* acessem dados em sequência e *threads* distintas acessem linhas de *cache* diferentes, para que o funcionamento do *cache* seja otimizado. Porém em GPUs é desejado que *threads* vizinhas acessem dados também vizinhos na memória (NVIDIA, 2013a). Como resultado, dispositivos diferentes podem precisar de otimizações diferentes em OpenCL.

A rotina P1 gera 32 números complexos, um para cada elemento receptor, em cada ponto válido da imagem, isto é, pontos que estão acima da interface. O número de pontos válidos é indicado por N. Três sequências para os dados foram testadas. Cada posição de memória é indicada por $P[i]Re[j]$ ou $P[i]Im[j]$, onde $P[i]$ indica que o dado refere-se ao ponto com índice i e $Re[j]$ e $Im[j]$ indicam parte real e parte imaginária para o elemento receptor j respectivamente. As sequências são:

Sequência 1:

```
P[0]Re[0]  P[0]Im[0]  P[0]Re[1]  P[0]Im[1]  ... P[0]Re[31]  P[0]Im[31]
...
P[N-1]Re[0] P[N-1]Im[0] P[N-1]Re[1] P[N-1]Im[1] ... P[N-1]Re[31] P[N-1]Im[31]
```

Sequência 2:

```
P[0]Re[0]  P[0]Im[0]  P[1]Re[0]  P[1]Im[0]  ... P[N-1]Re[0]  P[N-1]Im[0]
...
P[0]Re[31] P[0]Im[31] P[1]Re[31] P[1]Im[31] ... P[N-1]Re[31] P[N-1]Im[31]
```

Sequência 3:

```
P[0]Re[0]  P[1]Re[0]  ... P[N-1]Re[0]
P[0]Im[0]  P[1]Im[0]  ... P[N-1]Im[0]
...
P[0]Re[31] P[1]Re[31] ... P[N-1]Re[31]
P[0]Im[31] P[1]Im[31] ... P[N-1]Im[31]
```

Na tabela 4 podem ser vistos os tempos para formação de imagem, com implementações OpenCL da NVIDIA (GPU) e da Intel (CPU). Os números em negrito são os melhores resultados em cada linha. Em OpenCL as transferências de dados e chamadas de *kernel* podem ser executadas de modo assíncrono, isto é, quando o programa não precisa esperar pelo término da execução da função. Os resultados da tabela 4 foram obtidos para execução síncrona, que facilita a análise. Como o objetivo do experimento é reduzir o tempo de processamento com PCF, a sequência 3 foi adotada nos demais experimentos. Nota-se que a implementação da Intel conseguiu reduzir muito o tempo de execução, e a GPU foi até mais lenta. Uma das explicações por esse bom

desempenho é que o compilador OpenCL da Intel consegue vetorizar automaticamente o código (INTEL, 2013).

Tabela 4 – Tempos de execução em milissegundos da formação de imagem com OpenCL para vários modos de organização dos dados em memória.

	Seq. 1	Seq. 2	Seq. 3
OpenCL CPU / com PCF	57,9	59,9	55,4
OpenCL CPU / sem PCF	48,2	54,7	51,9
OpenCL GPU / com PCF	81,3	65,1	64,8
OpenCL GPU / sem PCF	78,1	60,0	60,8

Com a implementação da AMD, foram obtidos os tempos de 56,1 ms sem PCF, e 106 ms com PCF, mais altos que os tempos da implementação da Intel. A implementação da AMD não era uma versão final, e talvez ela não seja otimizada para processadores de outros fabricantes. É importante lembrar que o desempenho relativo pode ser diferente em outros tipos de problemas.

As diferenças entre as imagens resultantes da implementação padrão e das implementações com OpenCL resultaram menores que -127 dB para a GPU, -132 dB para a implementação da Intel e -130 dB para a implementação da AMD. Portanto, o ganho de desempenho não foi devido a cálculos com menor exatidão.

Com execução síncrona, as tarefas são executadas uma depois da outra, como indicado na fig. 106a. Na execução assíncrona, o *kernel* OpenCL (P2) pode ser executado em paralelo à rotina P1 (fig. 106b), mas a rotina P1 precisa esperar pelo término da transferência de dados (T), se o mesmo *buffer* de memória for utilizado pelas rotinas P1 e T. Com a utilização de dois *buffers* a rotina P1 pode ser executada em paralelo à rotina T (fig. 106c). Mas como a transferência de dados utiliza parte dos recursos do *host*, a execução de P1 torna-se mais lenta. Com OpenCL em CPUs, a transferência de dados não é necessária, pois o código normal e a implementação OpenCL utilizam a mesma memória, e a execução comporta-se como síncrona no programa utilizado. As diferenças de tempo para formação de imagem para os vários modos de funcionamento podem ser vistas na tabela 5. Com *buffer* duplo e execução assíncrona, finalmente a GPU conseguiu contribuir para um tempo de execução menor em relação à implementação OpenCL em CPU.

Tabela 5 – Tempos de execução da formação de imagem com OpenCL em GPU.

		sem PCF	com PCF
<i>Buffer</i> simples	execução síncrona	60,8	64,8
<i>Buffer</i> simples	execução assíncrona	55,8	56,2
<i>Buffer</i> duplo	execução assíncrona	48,6	49,8

As implementações OpenCL conseguiram chegar a tempos de formação de imagens com PCF adequados. Com GPU, obteve-se um tempo de execução apenas 12 % maior em relação à implementação padrão sem PCF, e com CPU, um tempo 25 % maior. Apesar da necessidade de se programar a inicialização e manipulação de *buffers* e *kernels*, o ganho de desempenho foi

Figura 106 – Paralelismo de operações para (a) *buffer* simples e execução síncrona, (b) *buffer* simples e execução assíncrona e (c) *buffer* duplo e execução assíncrona.

conseguido com um código muito claro nos *kernels* (apêndice B). O elemento mais incomum é o *pragma* na linha 23 do apêndice B.2, utilizado por motivo de desempenho.

Na execução síncrona com GPU, a rotina P1 contribuiu com 18 ms no tempo total, a transferência de dados T com 11 ms e o *kernel* em P2 com 9,7 ms. Na implementação OpenCL da Intel, o *kernel* foi executado em 13 ms, um pouco mais lento. Esses tempos mostram que uma CPU atual de desempenho médio apresentou um desempenho pouco abaixo de uma GPU de baixo desempenho, nesse experimento. É interessante observar que o tempo de transferência de dados foi maior que o tempo de execução do *kernel* na GPU. A GPU conseguiu um tempo menor somente porque a CPU trabalhou em paralelo, no processamento da rotina P1.

O tempo de processamento da formação de imagem com PCF, por OpenCL em CPU, foi apenas 11 % maior em relação ao tempo com processamento em GPU. Mas se forem consideradas somente as rotinas P1, T e P2, diretamente envolvidas com o processamento em OpenCL, a diferença passa a ser de 20 %. Nesse caso, o tempo para execução das rotinas P1, T e P2 resultou em 32,6 ms para a CPU e 27,2 ms para a GPU. Esse ganho modesto pode ser explicado pelas taxas de processamento máximas teóricas e as larguras de banda de memória da CPU e da GPU utilizadas (seção 4.3), que não são muito diferentes. Mesmo com uma CPU com capacidade real de processamento igual à da GPU, o uso dos processadores em paralelo pode levar a uma redução no tempo de processamento.

Utilizando a rotina P1 (fig. 105) para gerar os dados, mas calculando o PCF por uma implementação direta na CPU, obteve-se o tempo de execução de 121 ms. Como o PCF utiliza a função arco tangente, que é pesada para ser calculada, experimentou-se usar a função `vmsAtan2` da biblioteca Intel Math Kernel Library (MKL)³ versão 11.1.3. Com a opção `VML_LA` (*low accuracy*), o tempo foi reduzido para 72,9 ms, e com a opção `VML_HA` (*high accuracy*), o tempo foi reduzido para 78,0 ms. Com isso explicou-se parte do problema de desempenho da implementação padrão, ou seja, a função para calcular o arco tangente era ineficiente.

³ < <https://software.intel.com/en-us/intel-mkl> >

6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

6.1 Conclusões

Na detecção de superfície, o método de arcos e o de curva tangente mostraram exatidões equivalentes quando 9 elementos receptores por grupo foram utilizados. Com mais de 13 elementos receptores, no método de arcos, os picos duplos que apareceram nas curvas dos arcos aumentaram os erros. No método de curva tangente, quando mais de 21 elementos receptores por grupo foram utilizados, o erro aumentou para um nível em torno de $\lambda_1/2$. Esse resultado mostrou que o método não é tão robusto quanto o método de arcos, porém esse problema pode ser resolvido com a rejeição de sinais de baixa amplitude. O método de arcos, baseado em imagem, naturalmente foi capaz de rejeitar os ecos distorcidos e com nível baixo. Mesmo com 9 elementos receptores por grupo, pontos com alto valor absoluto de θ_p (fig. 32) podem ocorrer, portanto, é importante tratar esses casos. Os dois métodos de detecção de superfície propostos apresentaram exatidão compatível com a detecção por STA.

Considerando-se a preparação dos sinais, o método de arcos é quase tão rápido quanto o método de curva tangente. A preparação do sinal poderia ser executada em uma FPGA no equipamento de aquisição, o que daria uma vantagem em termos de desempenho ao método de curva tangente, mas a conexão entre o equipamento de aquisição e o PC teria que ser mais rápida, pois a quantidade de dados transferida seria maior.

A combinação de imagens foi efetiva, produzindo maiores resoluções em comparação com imagens formadas com somente um grupo de elementos. A técnica de abertura efetiva funcionou mesmo com dois meios de propagação e interface curva. O uso da velocidade de propagação de ondas de cisalhamento permite um aumento na resolução dos ecos, porém a efetividade é limitada, pois a cobertura da área do objeto não é total.

A taxa de formação de imagens estimada, com detecção automática da superfície do objeto pelos métodos propostos, e execução em uma CPU de uso geral com desempenho médio, permitem ensaios não destrutivos interativos. O processamento na CPU simplifica o sistema de aquisição e potencialmente reduz custos de desenvolvimento.

Os tempos de execução para a detecção de superfície resultaram muito menores que os tempos de aquisição e de formação de imagem, portanto, a detecção de superfície não é um gargalo de desempenho. O tempo de aquisição pode ser reduzido com o uso de uma conexão mais rápida entre o equipamento de aquisição e o PC, como USB 3.0. A formação de imagem pode ser acelerada, por exemplo, com um *software* mais otimizado, mas se o usuário precisa de resoluções maiores, a utilização de GPUs rápidas é recomendada, pois possuem maior largura de banda de memória e mais capacidade de processamento paralelo, porém representam um custo adicional no sistema.

O método PCF foi eficaz na maioria dos experimentos realizados, reduzindo o ruído de fundo e reverberações. O custo de processamento pode ser alto, principalmente com implementação direta do método. A utilização de OpenCL foi capaz de reduzir o tempo de processamento a um nível próximo da formação de imagem sem PCF, com processamento somente na CPU ou em operação conjunta da CPU e de uma GPU de baixa capacidade. Com a evolução das GPUs embutidas em CPUs, esse tipo de aplicação pode ter um custo ainda menor. Pode-se com isso evitar cópias de dados devido ao compartilhamento da memória, mas esse mesmo compartilhamento pode se tornar um gargalo no desempenho.

O método de *array* virtual na formação de imagens de objetos com superfícies curvas não apresentou boa qualidade. É preciso investigar a utilização de apodização. Uma possível aplicação é com objetos feitos de material com altas perdas, pois nesse caso a emissão focalizada permitiria uma relação sinal-ruído melhor.

6.2 Trabalhos futuros

Neste trabalho foram utilizados somente objetos cilíndricos. É preciso investigar como os métodos propostos de detecção de superfície funcionam com superfícies planas ou convexas genéricas. Outros métodos que suportam superfícies genéricas podem ser comparados quanto a desempenho e exatidão.

Foram utilizados objetos com superfícies lisas. Pode-se analisar o que acontece no caso de objetos com superfícies corroídas, por exemplo tubos de aço imersos em água do mar.

O desempenho, com OpenCL, de CPUs com GPUs embutidas pode ser analisado, utilizando-se os métodos apresentados neste trabalho.

REFERÊNCIAS

- ANDRADE, M. et al. Optimization of complex shape part inspections with phased arrays. In: *Ultrasonics Symposium (IUS), 2009 IEEE International*. [S.l.: s.n.], 2009. p. 733–736. ISSN 1948-5719.
- AUBRY, J.-F. et al. Skull surface detection algorithm to optimize time reversal focusing through a human skull. In: *Ultrasonics Symposium, 2002. Proceedings. 2002 IEEE*. [S.l.: s.n.], 2002. v. 2, p. 1451–1454. ISSN 1051-0117.
- BAE, M.-H.; JEONG, M.-K. A study of synthetic-aperture imaging with virtual source elements in B-mode ultrasound imaging systems. *Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, IEEE Transactions on*, v. 47, n. 6, p. 1510–1519, Nov 2000. ISSN 0885-3010.
- BARSHAN, B. Ultrasonic surface profile determination by spatial voting. *Electronics Letters*, v. 35, n. 25, p. 2232–2234, Dec 1999. ISSN 0013-5194.
- BONI, E. et al. A high performance board for acquisition of 64-channel ultrasound RF data. In: *Ultrasonics Symposium (IUS), 2012 IEEE International*. [S.l.: s.n.], 2012. p. 2067–2070. ISSN 1948-5719.
- BORN, M.; WOLF, E. *Principles of optics*. 7. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
- CAMACHO, J. et al. Automatic dynamic depth focusing for NDT. *Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, IEEE Transactions on*, v. 61, n. 4, p. 673–684, April 2014. ISSN 0885-3010.
- CAMACHO, J.; PARRILLA, M.; FRITSCH, C. Phase coherence imaging. *Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, IEEE Transactions on*, v. 56, n. 5, p. 958–974, may 2009. ISSN 0885-3010.
- CASULA, O. et al. Control of complex components with smart flexible phased arrays. *Ultrasonics*, v. 44, Supplement, n. 0, p. e647–e651, 2006. ISSN 0041-624X. Proceedings of Ultrasonics International (UI'05) and World Congress on Ultrasonics (WCU).
- CHERNOV, N.; LESORT, C. Least squares fitting of circles. *Journal of Mathematical Imaging and Vision*, Springer Netherlands, v. 23, n. 3, p. 239–252, 2005. ISSN 0924-9907.
- CRUZA, J. et al. New method for real-time dynamic focusing through interfaces. *Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, IEEE Transactions on*, v. 60, n. 4, p. 739–751, April 2013. ISSN 0885-3010.
- DZIEWIERZ, J.; LARDNER, T.; GACHAGAN, A. A design methodology for 2D sparse NDE arrays using an efficient implementation of refracted-ray TFM. In: *Ultrasonics Symposium (IUS), 2013 IEEE International*. [S.l.: s.n.], 2013. p. 136–138. ISSN 1948-5719.
- EMETERIO, J. L. S.; ULLATE, L. G. Diffraction impulse response of rectangular transducers. *The Journal of the Acoustical Society of America, ASA*, v. 92, n. 2, p. 651–662, 1992.
- FRAZIER, C.; O'BRIEN, W. Synthetic aperture techniques with a virtual source element. *Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, IEEE Transactions on*, v. 45, n. 1, p. 196–207, Jan 1998. ISSN 0885-3010.

- GEHLBACH, S. M.; ALVAREZ, R. E. Digital ultrasound imaging techniques using vector sampling and raster line reconstruction. *Ultrasonic Imaging*, v. 3, n. 1, p. 83–107, 1981. ISSN 0161-7346.
- 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. ISSN 0963-8695.
- HUNTER, A. J.; DRINKWATER, B. W.; WILCOX, P. D. Autofocusing ultrasonic imagery for non-destructive testing and evaluation of specimens with complicated geometries. *NDT & E International*, v. 43, n. 2, p. 78 – 85, 2010. ISSN 0963-8695.
- HUNTER, J. D. Matplotlib: A 2D graphics environment. *Computing In Science & Engineering*, IEEE COMPUTER SOC, v. 9, n. 3, p. 90–95, 2007.
- INTEL. *Intel SDK for OpenCL Applications XE 2013 R2 - Optimization Guide*. [S.l.], 2013.
- INTEL. *Intel 64 and IA-32 Architectures Optimization Reference Manual*. mar. 2014. [S.l.], 2014.
- JOHNSON, J.; KARAMAN, M.; KHURI-YAKUB, B. Coherent-array imaging using phased subarrays. part I: basic principles. *Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, IEEE Transactions on*, v. 52, n. 1, p. 37–50, Jan 2005. ISSN 0885-3010.
- KEITMANN-CURDES, O. et al. Contour tracking of specularly reflecting surfaces. *Ultrasonics*, v. 44, Supplement, n. 0, p. e1089–e1092, 2006. ISSN 0041-624X. Proceedings of Ultrasonics International (UI'05) and World Congress on Ultrasonics (WCU).
- KHRONOS OPENCL WORKING GROUP. *The OpenCL Specification*. v. 1.2 rev. 19. [S.l.], 2012.
- KIDERA, S.; SAKAMOTO, T.; SATO, T. A robust and fast imaging algorithm without derivative operations for UWB pulse radars. In: *Antennas and Propagation, 2006. EuCAP 2006. First European Conference on*. [S.l.: s.n.], 2006. p. 1–6.
- KINO, G. *Acoustic waves: devices, imaging, and analog signal processing*. [S.l.]: Prentice-Hall, Inc., 2000.
- KINSLER, L. et al. *Fundamentals of acoustics*. 4. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, Inc., 2000.
- LOBREGT, S.; VIERGEVER, M. A discrete dynamic contour model. *Medical Imaging, IEEE Transactions on*, v. 14, n. 1, p. 12–24, Mar 1995. ISSN 0278-0062.
- LOCKWOOD, G.; FOSTER, F. Design of sparse array imaging systems. In: *Ultrasonics Symposium, 1995. Proceedings., 1995 IEEE*. [S.l.: s.n.], 1995. v. 2, p. 1237–1243 vol.2. ISSN 1051-0117.
- LONG, R.; CAWLEY, P. Phased array inspection of irregular surfaces. *AIP Conference Proceedings*, AIP, v. 894, n. 1, p. 814–821, 2007.
- LUKOMSKI, T.; STEPINSKI, T.; KOWAL, J. Synthetic aperture focusing technique with virtual transducer for immersion inspection of solid objects. *Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, v. 54, n. 11, p. 623–627, 2012.
- MACOVSKI, A. Ultrasonic imaging using arrays. *Proceedings of the IEEE*, v. 67, n. 4, p. 484–495, April 1979. ISSN 0018-9219.

- MARCZAK, W. Water as a standard in the measurements of speed of sound in liquids. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 102, n. 5, p. 2776–2779, 1997.
- MARPLE S.L., J. Computing the discrete-time analytic signal via FFT. *Signal Processing, IEEE Transactions on*, v. 47, n. 9, p. 2600–2603, Sep 1999. ISSN 1053-587X.
- MATUDA, M. Y.; BUIOCHI, F.; ADAMOWSKI, J. C. Imaging through a convex interface with unknown position and shape using an ultrasonic linear array. *AIP Conference Proceedings*, AIP, v. 1433, n. 1, p. 177–180, 2012.
- NVIDIA. *CUDA C Programming Guide*. 5.5.22. ed. [S.l.], 2013.
- NVIDIA. *NVIDIA Tesla K-Series datasheet*. out. 2013. [S.l.], 2013.
- OPPENHEIM, A. V.; SCHAFER, R. W.; BUCK, J. R. *Discrete-time signal processing*. 2nd. ed. [S.l.]: Prentice-Hall, 1999.
- PARRILLA, M. et al. Dynamic focusing through arbitrary geometry interfaces. In: *Ultrasonics Symposium, 2008. IUS 2008. IEEE*. [S.l.: s.n.], 2008. p. 1195–1198.
- PASSMANN, C.; ERMERT, H. A 100-MHz ultrasound imaging system for dermatologic and ophthalmologic diagnostics. *Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, IEEE Transactions on*, v. 43, n. 4, p. 545–552, July 1996. ISSN 0885-3010.
- PRATT, V. Direct least-squares fitting of algebraic surfaces. *SIGGRAPH Comput. Graph.*, ACM, New York, NY, USA, v. 21, p. 145–152, August 1987. ISSN 0097-8930.
- ROBERT, S. et al. Real-time inspection of complex composite structures with a self-adaptive ultrasonic technique. In: *18th World Conference on Nondestructive Testing*. [S.l.: s.n.], 2012.
- ROBERT, S. et al. Real-time nondestructive testing of composite aeronautical structures with a self-adaptive ultrasonic technique. *Measurement Science and Technology*, v. 24, n. 7, p. 074011, 2013.
- SCHMERR JR., L. W. *Fundamentals of ultrasonic nondestructive evaluation – a modeling approach*. New York: Plenum Press, 1998.
- SCHUSTER, A. *An introduction to the theory of optics*. 2. ed. London: E. Arnold, 1909.
- SUNG, C.-C.; YANG, H.-I.; JENG, J.-H. Calculation of spatial impulse response for array transducer. *Japanese Journal of Applied Physics*, The Japan Society of Applied Physics, v. 44, n. 10, p. 7680–7689, 2005.
- SUTCLIFFE, M. et al. Full matrix capture with time-efficient auto-focusing of unknown geometry through dual-layered media. *Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, v. 55, n. 6, p. 297–301, 307, 2013.
- SUTCLIFFE, M. et al. Real-time full matrix capture with auto-focussing of known geometry through dual layered media. *NDT 2012*, 2012.
- SZABO, T. L. *Diagnostic ultrasound imaging: inside out*. [S.l.]: Elsevier, 2004.
- WEISSTEIN, E. W. *Ellipse*. *From MathWorld – A Wolfram Web Resource*. 2014. Disponível em: <<http://mathworld.wolfram.com/Ellipse.html>>. Acesso em: 24 fev. 2014.

WESTON, M. et al. Time efficient auto-focussing algorithms for ultrasonic inspection of dual-layered media using Full Matrix Capture. *NDT & E International*, v. 47, n. 0, p. 43–50, 2012. ISSN 0963-8695.

APÊNDICE A – DIMENSÕES DOS CORPOS DE PROVA

Figura 107 – Dimensões do bloco 1.

Figura 108 – Dimensões do bloco 2.

APÊNDICE B – KERNELS OPENCL

B.1 Kernel para imagem sem PCF

```

1  __kernel void processImageKernel(
2      __global float* rawData,
3      __global float* gridValueRe,
4      __global float* gridValueIm,
5      __constant float* rxApod,
6      unsigned int numGridPoints) {
7
8      float rxSignalListRe[NUM_RX_ELEM];
9      float rxSignalListIm[NUM_RX_ELEM];
10
11     const unsigned int point = get_global_id(0);
12     if (point >= numGridPoints) return;
13
14     for (unsigned int i = 0; i < NUM_RX_ELEM; ++i) {
15         rxSignalListRe[i] = rawData[ (i << 1) * numGridPoints + point];
16         rxSignalListIm[i] = rawData[((i << 1) + 1) * numGridPoints + point];
17     }
18
19     float sumRe = 0.0f;
20     float sumIm = 0.0f;
21     for (unsigned int i = 0; i < NUM_RX_ELEM; ++i) {
22         sumRe += rxSignalListRe[i] * rxApod[i];
23         sumIm += rxSignalListIm[i] * rxApod[i];
24     }
25
26     gridValueRe[point] += sumRe;
27     gridValueIm[point] += sumIm;
28 }

```

B.2 Kernel para imagem com PCF

```

1  float arithmeticMean(float* data) {
2      float sum = 0.0f;
3      for (unsigned int i = 0; i < NUM_RX_ELEM; ++i) {
4          sum += data[i];
5      }
6      return sum * (1.0f / NUM_RX_ELEM);
7  }
8
9  float standardDeviation(float* data) {
10     float sum = 0.0f;
11     float mean = arithmeticMean(data);
12     for (unsigned int i = 0; i < NUM_RX_ELEM; ++i) {
13         float e = data[i] - mean;
14         sum += e * e;
15     }
16     return sqrt(sum * (1.0f / NUM_RX_ELEM));
17 }
18
19 float calcPCF(float* re, float* im, float factor) {
20     float phi[NUM_RX_ELEM];
21     float phiAux[NUM_RX_ELEM];
22
23     #pragma unroll
24     for (unsigned int i = 0; i < NUM_RX_ELEM; ++i) {
25         phi[i] = atan2(im[i], re[i]);
26     }
27     for (unsigned int i = 0; i < NUM_RX_ELEM; ++i) {
28         phiAux[i] = phi[i] - copysign(M_PI_F, phi[i]);
29     }
30
31     float sf = fmin(standardDeviation(phi), standardDeviation(phiAux));
32     return fmax(0.0f, 1.0f - factor * sf);
33 }
34
35 __kernel void processImagePCFKernel(
36     __global float* rawData,
37     __global float* gridValueRe,
38     __global float* gridValueIm,
39     __constant float* rxApod,
40     unsigned int numGridPoints,
41     float pcfFactor) {
42
43     float rxSignalListRe[NUM_RX_ELEM];
44     float rxSignalListIm[NUM_RX_ELEM];
45
46     const unsigned int point = get_global_id(0);
47     if (point >= numGridPoints) return;
48
49     for (unsigned int i = 0; i < NUM_RX_ELEM; ++i) {
50         rxSignalListRe[i] = rawData[(i << 1) * numGridPoints + point];
51         rxSignalListIm[i] = rawData[((i << 1) + 1) * numGridPoints + point];
52     }
53
54     float pcf = calcPCF(rxSignalListRe, rxSignalListIm, pcfFactor);
55
56     float sumRe = 0.0f;
57     float sumIm = 0.0f;
58     for (unsigned int i = 0; i < NUM_RX_ELEM; ++i) {
59         sumRe += rxSignalListRe[i] * rxApod[i];
60         sumIm += rxSignalListIm[i] * rxApod[i];
61     }
62
63     gridValueRe[point] += sumRe * pcf;
64     gridValueIm[point] += sumIm * pcf;
65 }

```

APÊNDICE C – EXEMPLOS DE DETECÇÃO DE ENVELOPE

Nas figuras abaixo a detecção de envelope foi feita usando o valor absoluto do sinal analítico, cuja parte imaginária foi calculada pela transformada de Hilbert.

Figura 109 – Detecção de envelope para um sinal normal.

Figura 110 – Detecção de envelope para um sinal com nível DC não nulo.

Figura 111 – Detecção de envelope para um sinal truncado.