**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
FFCLRP – DEPARTAMENTO DE FÍSICA
PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA APLICADA À MEDICINA E
BIOLOGIA**

**IMPLEMENTAÇÃO DA TÉCNICA DE MAGNETO-ACUSTOGRAFIA EM UM
EQUIPAMENTO DE ULTRASSOM DIAGNÓSTICO POR IMAGEM.**

Diego Ronaldo Thomaz Sampaio

Dissertação apresentada à Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Ribeirão Preto da Universidade de São Paulo, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Ciências. Área: Física Aplicada à Medicina e Biologia.

DIEGO RONALDO THOMAZ SAMPAIO

**IMPLEMENTAÇÃO DA TÉCNICA DE MAGNETO-ACUSTOGRAFIA EM UM
EQUIPAMENTO DE ULTRASSOM DIAGNÓSTICO POR IMAGEM.**

Dissertação apresentada à Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Ribeirão Preto da Universidade de São Paulo, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de concentração:
Física Aplicada à Medicina e Biologia.

Orientador:
Prof. Dr. Antonio Adilton Oliveira Carneiro

Versão Corrigida
Original em outubro de 2014

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

FICHA CATALOGRÁFICA

Sampaio, Diego Ronaldo Thomaz.

Implementação da técnica de magneto-acustografia em um equipamento de ultrassom por imagem/ Diego Ronaldo Thomaz Sampaio; orientados Prof. Dr. Antonio Adilton Oliveira Carneiro. Ribeirão Preto. 2014. 118 p.

Dissertação (Mestrado – Programa de Pós-graduação em Física Aplicada à Medicina e Biologia) – Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Ribeirão Preto da Universidade de São Paulo.

1. Vibro-magneto-acustografia. 2. Ultrassom. 3. Elastografia. 4. Viscoelasticidade.

Nome: Diego Ronaldo Thomaz Sampaio

Título: Implementação da técnica de magneto-acustografia em um equipamento de ultrassom diagnóstico por imagem.

Dissertação apresentada à Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Ribeirão Preto da Universidade de São Paulo, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

Aprovado em: ____/____/____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr.: _____ Instituição: _____

Julgamento: _____ Assinatura: _____

Prof. Dr.: _____ Instituição: _____

Julgamento: _____ Assinatura: _____

Prof. Dr.: _____ Instituição: _____

Julgamento: _____ Assinatura: _____

Dedico este trabalho à Maria do Carmo, minha mãe e pilar, ao Wilson, meu pai, tio e amigo, a minha irmã, Rita, a minha companheira Paula e às memórias de meu pai Ronaldo e minha mãe Nazaré.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família, que sempre acreditou em mim e me apoiou desde quando sai de Belém-PA até hoje, especialmente a minha mãe Maria do Carmo Thomaz Sampaio e ao meu tio Wilson José dos Santos, pelo amor, carinho e compreensão. A minha Tia Maria de Nazaré Tomaz dos Santos, que nos deixou em 2013, a quem sou eternamente grato por ter me amado e me criado como um filho. A minha irmã Rita de Cássia Sampaio, por ter sempre me motivado a ingressar na USP. A minha esposa Paula F. Thomaz Sampaio por estar sempre do meu lado, me apoiando e motivando nos momentos difíceis e ao meu primo Michel Goes de Melo Sampaio por ser meu amigo e companheiro de todas as horas.

A todos os meus amigos de Jaboticabal-SP em especial a Alan Rodrigo Panosso, Fabricio Hirota Hada, Myrko Araujo Micali e Vinicius Galvão dos Santos, pelas risadas e divertidas aventuras.

Meus agradecimentos ao Prof. Dr. Antonio Adilton Oliveira Carneiro por ter me motivado, orientado e me dado esta oportunidade de crescimento científico, profissional e pessoal.

Ao Prof. Dr. Theo Zeferino Pavan pela atenção e ajuda nas discussões científicas, simulações e nos momentos de dificuldade durante este trabalho.

Aos técnicos Sérgio Oliveira Bueno da Silva, José Luiz Aziani, Carlos Renato da Silva e Agnelo Bastos.

A todo o pessoal da IX Turma de Física Médica da USP de Ribeirão Preto-SP e aos colegas do Grupo de Inovação em Instrumentação Médica e Ultrassom – GIIMUS, pela amizade e colaboração.

A Faculdade de Filosofia Ciências e Letras de Ribeirão Preto, pela oportunidade de ingresso no programa de pós-graduação em Física Aplicada a Medicina e Biologia.

A CAPES e CNPq pelo apoio financeiro e a FAPESP pela concessão da bolsa de Mestrado.

“O que falta às pessoas não é força, e sim, vontade.”

Victor Hugo.

RESUMO

SAMPAIO, D. R. T. Implementação da técnica de magneto-acustografia em um equipamento de ultrassom de diagnóstico por imagem. 2014. 118f. Dissertação (Mestrado – Programa de Pós-graduação em Física Aplicada à Medicina e Biologia) – Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto – SP, 2014.

A magneto-acustografia ou, em uma nova terminologia mais abrangente, vibromagneto-acustografia (VMA) é uma técnica que combina técnicas magnéticas e acústicas, a fim de observar o comportamento visco-elástico de um meio material marcado com partículas magnéticas (alvo). A força magnética oscilatória de frequência (ω) provoca, dentro do alvo, movimento das partículas e do meio material com frequência (2ω). O feixe acústico pulso-eco utilizado para detectar o movimento das estruturas, tem uma frequência de repetição de pulso (PRF), no mínimo, cinco vezes maior que a frequência do movimento do alvo. Assim, a proposta deste projeto foi desenvolver um protocolo de aquisição, processamento e análise da técnica VMA, por meio da implementação de uma plataforma automatizada de aquisição, que forneça dados estruturados para posteriormente através de uma plataforma de processamento analisar diferentes aplicações da técnica VMA em fantasmas e *in vivo*.

A primeira etapa foi desenvolver a plataforma de aquisição utilizando um equipamento de ultrassom diagnóstico por imagem. Nesta etapa foi desenvolvido um software, com interface gráfica de usuário, escrito em C++ e Qt com a função de automatizar a excitação magnética e a aquisição acústica de alta resolução temporal, foram definidos os protocolos padrão dos modos de excitação magnética e de aquisição acústica em termos da taxa de aquisição dos frames ultrassônicos para gerar movimentos oscilatórios ou ondas de cisalhamento. Em seguida, os dados provenientes das aquisições foram estruturados por meio de um cabeçalho para transferência para outros computadores através do protocolo TCP/IP.

Depois foi desenvolvida um software, com interface gráfica de usuário, para a fase de processamento e análise. O processamento dos frames adquiridos em modo radiofrequência (RF) consistiu em obter mapas de deslocamentos ou velocidades das estruturas internas do meio material utilizado como alvo. Nesta etapa adaptamos o algoritmo de correlação cruzada normalizada com correção de pico de máxima correlação

e obtivemos mapas otimizados para a técnica VMA. A avaliação da otimização destes mapas foi baseada na avaliação entre a resolução espacial e tempo computacional.

A partir do uso destes softwares em experimentos com fantasmas e *in vivo* foram desenvolvidos métodos de análise da frequência dos deslocamentos e segmentação/caracterização de ondas de cisalhamento em termos da sua velocidade e atenuação.

Por fim, foi implementado um sistema VMA automatizado composto, por uma plataforma de aquisição embarcada em equipamento de diagnóstico por ultrassom para aquisição de mapas de RF e, que posteriormente eram transferidos para um computador com hardware superior para geração de mapas de deslocamento do meio material. Os mapas foram analisados para determinação de parâmetros visco-elásticos. Além disso, através da implementação da técnica VMA, viabilizou-se estudos clínicos de maneira rápida e eficiente, por exemplo, análises gástricas após a digestão de alimentos marcados com partículas magnéticas e produção de ondas de cisalhamento para caracterização viscoelástica.

Palavras-chave: Ultrassom, Elastografia, Vibro-magneto-acustografia, Viscoelasticidade

ABSTRACT

SAMPAIO, D. R. T. Implementation of magneto motive technique in an ultrasound diagnostic equipment. 2014. 118f. Dissertation (Master) Faculty of Philosophy, Sciences and Letters of Ribeirão Preto, University of São Paulo, Ribeirão Preto – SP, 2014.

The magneto motive ultrasound (MMUs) is a novel technique, which combines magnetism and acoustics, in order to observe viscoelastic behavior of medium labeled with inserted magnetic particles. The magnetic force with modulation frequency (ω) creates a mechanical disturbance in the object of study with twice the modulation frequency (2ω). Was applied a pulse-echo ultrasonic beamforming with pulse repetition frequency (PRF) at least five times greater than frequency of internal structure movement. The aim of this study was to develop an acquisition, processing and analysis protocol for MMUs through implementation of an automated platform for acquisition, which provides structured datasets for further processing and analysis of different applications (tissue mimicking phantoms or *in vivo*) of MMUs.

First step was to develop the acquisition platform using an ultrasound research interface (URI). At this stage was developed a software with graphical user interface (GUI) written using C++ and Qt. This software automates magnetic excitation and acoustic acquisition, which has high frame rate. In addition, were defined default presets to provide oscillatory movement or shear waves. Then was created datasets acquired were structured and a header and transferred to an external personal computer through TCP/IP network.

Second, the processing software with graphical user interface for processing and analyzing was developed. The frames acquired in radiofrequency (RF) mode were processed into displacement or velocity maps of medium internal structures. In this stage, we adapted a cross correlation algorithm to optimize for MMUs datasets. The evaluation of these maps was based on tradeoff between spatial resolution and computation time.

Protocols for analysis of motion frequency and segmentation/characterization of shear waves, extracting velocity and attenuation for experiments performed with phantoms or *in vivo* were developed

In this work, it was implemented an automated MMUs system integrated with a software framework running on an ultrasound research interface (URI), which is used for acquisition of RF maps, further transferred for a PC with robust hardware to process into displacement maps. These maps were analyzed to obtain viscoelastic parameters of the medium. Moreover, this implementation of MMUs enables clinical fast and efficient trials for gastric evaluation of meals with magnetic particles and shear wave production for viscoelastic characterization.

Palavras-chave: Ultrasound, Magneto Motive Ultrasound, Elastography, Viscoelasticity

LISTA DE ABREVIATURAS

ARFI	Impulso por força de radiação acústica (Acoustic Radiation Force Impulse)
DSP	Processador Digital de Sinais (Digital signal processor)
FPGA	Field Programable Gate Array
GIIMUS	Grupo de Inovação em Instrumentação Médica e Ultrassom
GPU	Unidade de processamento gráfico (Graphical processor unit)
GUI	Interface gráfica de usuário (Graphical user interface)
MAT-MI	Tomografia magneto-acústica com indução magnética. (Magneto Acoustic Tomography with Magnetic Induction)
PC	Computador pessoal (Personal Computer)
PRF	Frequência de repetição de pulso (Pulse Repetition Frequency)
RF	Radiofrequência (Radiofrequency)
ROE	Região de Excitação (Region of excitation)
ROI	Região de Interesse (Region of interest)
RX	Recepção de feixe acústico (Receive beamforming)
SDK	Kit de desenvolvimento de software (Software development kit)
TE	Elastografia por transiente (Transient Elastography)
TGC	Controle de ganho temporal (Time gain control)
TX	Transmissão de feixe acústico (Transmit beamforming)
URI	Plataforma de pesquisa em ultrassom (Ultrasound Research Interface)
US	Ultrassom (Ultrasound)
VMA	Vibro-magneto-acustografia (Magneto Motive Ultrasound)
VMA-A	Plataforma de aquisição da técnica vibro magneto acustografia (acquisition framework for magneto motive ultrasound)
VMA-P	Plataforma de processamento da técnica vibro magneto acustografia (processing framework for magneto motive ultrasound)

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Amplitude
B	Campo magnético
α	Coefficiente de atenuação
x, y, z	Coordenadas cartesianas
ρ	Densidade
u	Deslocamento das estruturas internas de um meio material
ϕ	Fase
F	Força resultante
f	Frequência
ω	Frequência angular
fs	Frequência de amostragem
G	Função de Green
w	Janela espacial
BW	Largura de banda
μ	Módulo de cisalhamento
λ	Módulo de compressibilidade
μ_1	Módulo de elasticidade
μ_2	Módulo de viscosidade
K	Numero de subsetores
μ_0	Permeabilidade magnética do vácuo
r	Profundidade
χ	Susceptibilidade magnética
fps	Taxa de quadros por segundo
t	Tempo
s	Traço da onda sísmica
$\mathcal{F}$	Transformada de Fourier
$\mathcal{H}$	Transformada de Hilbert
v	Velocidade das estruturas internas de um meio material
c	Velocidade de propagação
V	Voltagem
V	Volume

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Diagrama esquemático do sistema de VMA controlado somente pelo URI.....	11
Figura 2: Diagrama de utilização do SDK 5.7.4 Ultrasonix e cada uma das especificidades das bibliotecas Texo™, Impero™ e Amplio™.	13
Figura 3: Processo de formação de um frame composto por 128 linhas de RF de forma sequencial, neste caso ocorre uma emissão para cada linha formada.....	14
Figura 4: Avaliação do valor do fps para diferentes profundidades utilizando o feixe acústico sequencial em relação ao numero de elementos ativados.....	16
Figura 5: (a) Simulação do potencial senoidal com frequência de 100 Hz e a resposta da força magnética esperada e (b) o espectro de potencia desses sinais.	17
Figura 6: Simulação do potencial de um ciclo senoidal com frequência de 100 Hz e a resposta magnética esperada para o modo pulsado.....	18
Figura 7: Diagrama de desenvolvimento do VMA-A [topo (3 nível)], as classes principais que foram implementadas (2 nível) e as funções descritas sucintamente (1 nível).....	20
Figura 8: Representação de uma imagem utilizando a classe QImage.....	21
Figura 9: Interface gráfica de usuário do VMA Framework de aquisição.	23
Figura 10: Representação do (a) mapa de RF e (b) modo B obtido em uma amostra de parafina	26
Figura 11: (a) Mapa de RF obtido com um transdutor EC9-5/10 e (b) mapa de RF após processo de conversão para coordenadas cartesianas	27
Figura 12: (a) Todos os frames subsequentes são correlacionados com o primeiro para obtenção do mapa de deslocamento e (b) os frames são correlacionados em pares de maneira subsequente para obtenção do mapa de velocidade.	29
Figura 13: Processo de formação do mapa de deslocamento a partir de um mapa de RF. Escolhendo o elemento central ($n = 64$), correlacionamos dois frames sucessivos ($t = 1$ e $t = 2$) com janelas de tamanho fixo ($w = 100$) e 50% de sobreposição para obter o desvio (δ).....	30
Figura 14: Extração do traço sísmico ao longo da profundidade r de um mapa de deslocamento.....	32
Figura 15: Interface de gráfica de usuário da plataforma de pós-processamento da técnica VMA.	36

Figura 16: (a) Mapa de deslocamento simulado utilizando $f = 100 \text{ Hz}$, $\mu_1 = 25 \text{ kPa}$ e $\rho = 1000 \text{ kg.m}^{-3}$ e (b) mapa de fase.	39
Figura 17: Propagação da onda sísmica plana simulada vista no espaço nos instantes de tempo (a) 10 ms, (b) 12 ms e (c) 15 ms.	40
Figura 18: (a) Traço suavizado da onda sísmica simulada filtrada na frequência de excitação e (b) o espectro de magnitude.	40
Figura 19: Estimativas de parâmetros da onda sísmica simulada. Velocidade de grupo (a) pico, (b) vale e (c) correlação cruzada. Velocidade de fase (d) e atenuação (e).	48
Figura 20: (a) Sistema VMA com transdutor endocavitário (EC9-5/10) fixado no centro da bobina de magnetização. (b) bobina com concentrador de campo e um transdutor ultrassônico (L14-5/38) posicionado paralelamente e (c) perpendicular à direção do campo magnético axial.	52
Figura 21: Curva de calibração da bobina de excitação para obter um valor de 300 mT em uma região próxima da bobina.	53
Figura 22: A resposta do amplificador ao transiente para (a) 1 ciclo e (b) 3 ciclos. Observa-se um pico indesejado no começo (seta) e a metade final do ultimo ciclo do <i>burst</i> de entrada é deformada.	54
Figura 23: Espectro de magnitude do perfil da força magnética para (a) 1 ciclo e (b) 3 ciclos.	54
Figura 24: Campo magnético e gradiente calculado em uma região de 5,0 x 15,0 mm para os instantes (a) 10,0 ms e (b) 20,0 ms.	55
Figura 25: Perfil da força magnética ponderada na direção axial nos instantes de tempo (a) 10,0 ms e (b) 20,0 ms para um 1 ciclo com frequência de 100 Hz.	56
Figura 26: (a) Modo B do experimento utilizando com o fantoma de gelatina com esfera de ferrita de 7 mm e (b) mapa de deslocamento obtido no instante 22.8 ms.	57
Figura 27: (a) Deslocamento induzido ao longo do tempo e (b) espectro do deslocamento.	58
Figura 28: Mensuração do deslocamento induzido pelo material magnético no estômago de roedores.	58
Figura 29: (a) Modo B e (b) mapa de velocidade no instante 23.20 ms. (c) Análise do deslocamento do estomago do roedor e (d) espectro.	60
Figura 30: (a) Sistema VMA com transdutor ultrassônico posicionado em direção perpendicular a direção da força de excitação e (b) modo B.	61

Figura 31: (a) Gráfico do deslocamento da onda sísmica gerada a partir do movimento de uma esfera de metal e mapa de deslocamento nos instantes de tempo (b) 20,0 ms, (b) 21,5 ms e (c) 23,0 ms.	62
Figura 32: (a) Mapa de deslocamento obtido para 1 ciclo com frequência de excitação de $f = 100$ Hz e (b) mapa de fase.	63
Figura 33: Propagação de onda sísmica obtida experimental mente nos instantes (a) 10 ms, (b) 12 ms e (c) 15 ms.	64
Figura 34: (a) Traço sísmico obtido de posições diferentes e a janela de análise entre 8,0 a 18,0 ms (pontilhada). (b) Ajuste exponencial da amplitude ao longo da trajetória. Ajustes linear para o (c) maximos e o (d) minimos, respectivamente.	65
Figura 35: (a) Estimativa de velocidade de grupo utilizando o correlação cruzada de traços sísmicos e (b) espectro da janela temporal.	66
Figura 36: (a) Velocidade de fase obtida no instante 12,50 ms do mapa de fase e (b) Espectro da onda sísmica filtrado obtida no intervalo de 8,0 a 18,0 ms para estimativas de frequência de pico e frequência de centro de massa.	66
Figura 37: (a) Sistema VMA com transdutor ultrassônico posicionado em direção perpendicular a direção da força de excitação e (b) modo B de um fantoma com inclusão de maior rigidez em relação a base (seta branca) e uma esfera de metal (seta vermelha).	68
Figura 38: Avaliação de movimento induzido por esfera de metal a partir do (a) mapa de deslocamento obtido para 1 ciclo com frequência de excitação de $f = 100$ Hz e (b) mapa de fase.	68
Figura 39: Diagrama do desenvolvimento do projeto em termos da funcionalidade implementada para aquisição (azul) e processamento (verde).	73
Figura 40: Cabeçalho da plataforma de aquisição transferido para a plataforma de processamento via rede.	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Especificações técnicas do URI Sonix RP, Ultrasonix.....	12
Tabela 2: Especificações dos transdutores utilizados acoplados ao Sonix RP	13
Tabela 3: Características da bobina usada para gerar o campo magnético externo.....	16
Tabela 4: Parâmetros relacionados com as características mecânicas do meio estimados em uma trajetória de 30 mm ao longo do eixo axial. Tanto nos ajustes exponenciais quanto nos lineares o valor de R-quadrado foi igual a 1.....	49
Tabela 5: Parâmetros relacionados com as características mecânicas do meio estimados em uma trajetória de 4,50 mm ao longo do eixo axial.....	63
Tabela 6: Parâmetros da onda sísmica. (a-c) Velocidade de grupo, (d) velocidade de fase e (e) atenuação obtidas em uma trajetória de 8,75 mm ao longo do eixo axial, com valores R^2 maiores que 90%.....	67
Tabela 7: Parâmetros da onda sísmica da região 1, 2 e 3. (a-c) Velocidade de grupo, (d) velocidade de fase e (e) atenuação obtidas em trajetória de 5,00 mm ao longo do eixo axial, com valores de R^2 maiores que 90%.....	69
Tabela 8: Caracterização visco-elástica de fantoma heterogêneo em termos do modulo elástico e viscoso.....	70

SUMÁRIO

Agradecimentos	vii
Resumo	ix
Abstract	xi
Lista de abreviaturas	xiii
Lista de símbolos	xiv
Lista de figuras.....	xv
Lista de tabelas.....	xviii
Sumário	xix

CAPÍTULO 1

1. Introdução	1
1.1. Motivação.....	2
1.2. Objetivos	3
1.3. Fundamentação teórica.....	3
1.3.1. Ultrassom	4
1.3.2. Movimento induzido pela ação magnética	5
1.3.3. Geração de ondas sísmicas a partir de força magnética.....	6
1.4. Organização do trabalho.....	8

CAPÍTULO 2

2. Plataforma de aquisição da técnica VMA.....	11
2.1. Diagrama do sistema VMA.....	11
2.2. Interfaces de pesquisa em ultrassom (URI).....	11
2.2.1. Sonix RP, Ultrasonix	12
2.3. Feixe acústico e resolução temporal.....	14
2.4. Modos de excitação magnética	16
2.4.1. Comunicação IVI-COM.....	18
2.5. Desenvolvimento da plataforma de aquisição.....	18
2.5.1. Classes desenvolvidas para virtualização	19
2.5.2. Qt 4.8.4.....	20
2.6. Interface gráfica de aquisição.....	22
2.6.1. Procedimento de uso para aquisição VMA.....	22

CAPÍTULO 3

3. Plataforma de pós-processamento.....	25
3.1. Mapas de RF e modo B	25
3.2. Conversão para <i>scanner</i> convexo (<i>Scan conversion</i>).....	27

3.3.	Mapas de deslocamento	28
3.3.1.	Estimativa de atraso temporal	28
3.3.2.	Algoritmo de processamento	29
3.4.	Estimativas de velocidade e atenuação de ondas sísmicas.....	31
3.4.1.	Algoritmo de suavização.....	31
3.4.2.	Velocidade de grupo e atenuação (<i>time-to-peak</i>).....	32
3.4.3.	Velocidade de grupo (correlação cruzada)	33
3.4.4.	Velocidade de fase	33
3.5.	Interface gráfica de pós-processamento (VMA-P).....	35
4.	Avaliação por simulação de ondas sísmicas	39

CAPÍTULO 5

5.	Avaliação por experimentos	51
5.1.	Arranjos experimentais	51
5.1.1.	Caracterização da força magnética a partir de medidas de campo magnético	52
5.2.	Objetos simuladores de tecidos biológicos.	56
5.2.1.	Gelatina bovina com partículas de ferro.....	56
5.2.2.	Copolímero de cadeia saturada (parafina).	56
5.3.	Quantificação de micro deslocamentos em fantasmas e <i>in vivo</i>	57
5.3.1.	Em fantasmas	57
5.3.2.	<i>In vivo</i>	58
5.4.	Dispersão de ondas sísmicas em fantasmas.....	60
5.4.1.	Avaliação de fantoma de gelatina com inclusão de esfera de ferrita.	61
5.4.2.	Avaliação de fantoma de gelatina com nano partículas homogêneo.	63
5.4.3.	Fantasmas de copolímeros de cadeia saturada	67

CAPÍTULO 6

6.	Considerações finais	72
6.1.	Conclusões	72
6.2.	Trabalhos futuros.....	75
Apêndice A – Diagramas de classes da plataforma de aquisição		79
A.1.	Classe Hardware	79
A.2.	Classe Controls	80
A.3.	Classe Sequences	81
A.4.	Classe Funcgen	83
Apêndice B – Protocolos magneto-acústicos.....		85
Apêndice C – Interface gráfica de usuário da plataforma de aquisição (VMA-A)		87

Apêndice D – Interface gráfica de usuário da plataforma de processamento e análise (VMA-P).....	89
D.1. Modo RF/B	90
D.2. Mapas de deslocamento ou velocidade	91
D.2.2. Análise de tempo computacional	92
D.3. Análise de traço sísmico	95

1. INTRODUÇÃO

A caracterização de tecidos moles por meio de medidas de propriedades mecânicas é de grande importância no diagnóstico clínico, pois são capazes de identificar e avaliar doenças como câncer e fibrose hepática. Muitos grupos de pesquisa vêm investigando estas propriedades usando o ultrassom pulso-eco para detectar deslocamentos mecânicos das estruturas internas dos tecidos induzidos pela ação de forças externas de contato (pistão) ou de não-contato (Elastografia por transiente (TE), Força de Radiação Acústica (ARFI), Força de Lorentz e indução magnética (MAT-MI)), [1]–[4]. Recentemente o uso de marcadores magnéticos em escala micrométrica e nanométrica vêm se expandindo em várias modalidades de imagem (e.g. Ressonância Magnética Nuclear e Tomografia Computadorizada por Raios-X), [5]. Estas partículas possuem alta susceptibilidade magnética e são inertes ao organismo humano, porém devido a seu tamanho o ultrassom em Modo B não é capaz de visualizá-las.

Uma nova técnica de imagem denominada de Magneto-Acustografia ou Vibro-Magneto-Acustografia (VMA) consiste em detectar com ultrassom deslocamentos mecânicos, induzidos remotamente através da ação de uma força magnética, em meios materiais com partículas magnéticas, [6]. Esta técnica vem sendo utilizada para localização de regiões que contém uma determinada concentração de partículas, visto que o deslocamento induzido é da ordem de micrômetros, tornando-as agentes de contraste ultrassônicos, [7]. Em alguns casos, ao final do movimento forçado, ocorre o surgimento de ondas sísmicas, que se propagam com amplitude suficiente para serem detectadas por ultrassom, [8].

Na última década alguns equipamentos comerciais de ultrassom passaram a disponibilizar acesso aos mapas de ecos (mapas de RF) por meio de interfaces de coleta de dados utilizados para formação dos modos de imagem clássicos (i.e. Modo B, Doppler). Este acesso a dados não formatados (*.raw) permite que sejam desenvolvidos métodos de processamento específicos para detecção de deslocamentos até a ordem de micrômetros. Alguns equipamentos permitem o controle total do hardware através de kits de desenvolvimento de software (SDK), que propiciam o pleno desenvolvimento de novas modalidades de imagem, agregando vantagens desde formação do feixe acústico até a fase de pós-processamento, [9]–[11].

Neste contexto, constatamos que os estudos publicados sobre VMA não mostram implementações deste sistema em modernos equipamentos comerciais visando estudos das propriedades mecânicas de tecidos moles. Esta carência de uma interface que controle a combinação das técnicas ultrassônica e magnéticas sintetizando-a em uma plataforma operacional de fácil utilização promove o presente estudo.

Este trabalho, teve como principal foco a implementação do sistema VMA compatível com ultrassom comercial visando obter uma interface gráfica dedicada e, em conjunto, um protocolo de aquisição que permita caracterização mecânica de objetos simuladores de tecidos biológicos. Dessa forma, possibilitando, em longo prazo, o uso da técnica VMA em testes clínicos.

O trabalho foi realizado no grupo GIIMUS (Grupo de Inovação em Instrumentação Médica e Ultrassom, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, Brasil) e dá continuidade ao desenvolvimento da tecnologia magneto-acústica que o grupo trabalha há alguns anos e que gerou, dentre outros trabalhos, a patente do transdutor magneto-acústico para medidas susceptométricas e acústicas, [12]

1.1. Motivação

Embora explorada para localização de partículas, [5], [13], a avaliação da técnica VMA para caracterização de materiais reológicos em ensaios não destrutivos é um importante avanço na aplicação de agentes de contraste magnéticos em conjunto com técnica magnética-ultrassônica para medidas quantitativas.

A motivação principal deste trabalho foi criar um sistema VMA de fácil utilização, implementado utilizando um equipamento de ultrassom comercial, que possa fornecer estimativas quantitativas de parâmetros mecânicos de materiais reológicos de maneira a propiciar uso clínico de técnica VMA.

A metodologia aplicada a sistemas VMA foi recriada em forma de uma abstração de alto nível, sincronizando o gerador de funções, bobina e ultrassom comercial acoplado a diferentes tipos de transdutores multi elementos (e.g. convexo e linear) por meio de um software com interface gráfica de usuário (GUI). Essa interface é executada diretamente do equipamento de ultrassom diagnóstico. Também foi desenvolvida uma plataforma de processamento e análise dos dados do transiente da força e da propagação de ondas sísmicas provenientes da excitação magnética.

Este sistema foi idealizado para reduzir o tempo de coleta, facilitando a mudança de parâmetros de aquisição por meio de protocolos. Ainda, após aquisição, o pós-processamento dos dados é feito de maneira eficiente utilizando a interface MATLAB® de programação paralela, otimizando o tempo de obtenção de mapas quantitativos de deslocamento. Por fim, analisou-se a ação da força magnética e propagação de ondas sísmicas estimando parâmetros mecânicos *in vitro*. Dessa forma, o sistema visou propiciar a avaliação da técnica VMA para, posteriormente, propor a utilização dessa modalidade de imagem médica no auxílio à identificação de doenças relacionadas à reologia *in vivo*.

1.2. Objetivos

Este projeto visou o desenvolvimento da instrumentação de sistemas VMA, por meio de softwares de automação e processamento, utilizando um equipamento comercial de diagnóstico por ultrassom. Posteriormente, explorou-se a técnica *in vitro* para gerar um protocolo que facilite a sua utilização em ensaios clínicos *in vivo* na obtenção de propriedades mecânicas das estruturas internas de um meio fluido com partículas magnéticas.

1.3. Fundamentação teórica

As imagens em Modo B formadas com ultrassom (US) são a representação da amplitude dos mapas de ecos ultrassônicos que se propagam em um determinado meio material. Essas imagens retratam, em termos, mudanças nas propriedades mecânicas do meio, essencialmente a impedância mecânica que está intrinsecamente relacionada à velocidade de propagação do US (c) e à densidade (ρ) do meio. As imagens dependem tanto dos aspectos geométricos quanto de outras características mecânicas, que neste caso são negligenciadas durante o processo de formação da imagem Modo B.

Atualmente são encontrados, comercialmente, equipamentos de US denominados de interfaces de pesquisa em ultrassom (URI). Estas plataformas flexíveis permitem que sejam feitas modificações no processo de formação do feixe acústico para formação de imagens em modo radiofrequência (RF). O modo RF consiste no nível mais baixo do processo para formação de imagens.

Diversas informações são extraídas a partir dos mapas de RF, porém para que isto seja possível empregamos técnicas de processamento para transformar os mapas de RF em outros mapas, por exemplo, o mapa de deslocamento que é obtido correlacionando sucessivos mapas de RF para estimar deslocamentos associados a uma perturbação externa dinâmica.

Porém este capítulo introdutório visa descrever apenas aspectos físicos relacionados à ação da força magnética externa, os micros deslocamentos provocados pelo transiente da força, que são mensuráveis por ultrassom e, após o transiente, o comportamento mecânico de ondas sísmicas relacionando o seu movimento com as propriedades mecânicas do meio material.

1.3.1. Ultrassom

Definimos como ultrassom ondas mecânicas de compressão longitudinais (ondas P) que se propagam em um meio material com frequência acima de 20 kHz. Na água ($\rho_{ag} = 1000 \text{ kg.m}^{-3}$) à temperatura ambiente (24°C) sua velocidade de propagação é $c_{ag} = 1500 \text{ m.s}^{-1}$, [14].

Durante a propagação podem ocorrer vários fenômenos físicos das interações com o alvo (i.e. reflexão, refração, absorção, espalhamento e etc.). Estes fenômenos também estão relacionados às características dos ecos provenientes do alvo, que são processados para formação das imagens.

A grandeza física que sintetiza a perda de amplitude da onda ultrassônica por espalhamento e/ou absorção é o coeficiente de atenuação total (α), que pode ser expresso em Neper.m⁻¹. De maneira generalizada expressamos a amplitude do sinal do ultrassom $A(z)$ inicialmente A_0 que percorreu uma distância z pela equação (1).

$$A(z) = A_0 \exp(-\alpha z) \tag{1}$$

Em tecidos biológicos uma aproximação para o coeficiente de atenuação é dependente da frequência da onda mecânica (f) e temperatura, $\alpha = \alpha_0 \cdot f^n$, onde α_0 é o fator de atenuação e n o fator de frequência, [14].

1.3.2. Movimento induzido pela ação magnética

A força magnética age sobre um dado volume (V) em que as partículas são descritas como dipolos magnéticos imersos em um meio diamagnético. A concentração de partículas é suficiente para que o meio seja considerado linear em termos da susceptibilidade magnética (χ) e permeabilidade magnética do vácuo (μ_0). Neste caso a força magnética $\vec{F}$ é proporcional ao campo magnético e ao gradiente de campo magnético conforme a relação matemática:

$$\vec{F} \propto \frac{\chi}{\mu_0} (\vec{B} \cdot \vec{\nabla}) \vec{B} \quad (2)$$

Se o campo magnético é um ciclo senoidal com frequência monocromática, ω , na direção axial z conforme equacionamos em (3), utilizando a identidade do cálculo vetorial $\vec{\nabla}(\vec{B} \cdot \vec{B}) = 2[(\vec{B} \cdot \vec{\nabla}) \vec{B}] + 2[\vec{B} \times (\vec{\nabla} \times \vec{B})]$ na relação (2), escrevemos a força magnética que age na direção axial z em um volume (V) com partículas magnéticas, (4).

$$\vec{B} = B_z(z) \sin(\omega t) \hat{z} \quad (3)$$

$$F_{B_z} = \frac{\chi V}{2\mu_0} [1 - \cos(2\omega t)] B_z(z) \frac{\partial B_z(z)}{\partial z} \quad (4)$$

Observamos que a força magnética age causando movimentos oscilatórios e a intensidade dos movimentos é diretamente proporcional ao gradiente axial do campo magnético e ao próprio campo magnético.

A partir da ação da força magnética Oh *et al* [6] avaliaram que a força total agindo sobre as partículas é obtida adicionando os termos relacionados à força de restauração elástica $-kz$ e a força de arrasto viscoso $-b \frac{\partial z}{\partial t}$.

$$F_z = \frac{\chi V}{2\mu_0} [1 - \cos(2\omega t)] B_z(z) \frac{\partial B_z(z)}{\partial z} - kz - b \frac{\partial z}{\partial t} \quad (5)$$

Em (5) k e b são, respectivamente a constante elástica do meio e a constante de arrasto, [6]. Desta forma, o movimento das partículas magnéticas de característica ferromagnética tem duas vezes a frequência do campo magnético aplicado $\vec{B}$.

1.3.3. Geração de ondas sísmicas a partir de força magnética

Pavan *et al* [15] observaram que após a aplicação da força magnética são geradas ondas sísmicas em um meio material onde há concentração de partículas magnéticas. O ponto onde ocorre a formação das ondas é denominado epicentro. Deste ponto ocorre a propagação de ondas de cisalhamento transversais (ondas S), [8].

Assumindo que o meio é linear, isotrópico e incompressível a função de Green (G_{zz}^0), descreve uma boa aproximação para o deslocamento induzido por uma força pontual ao longo do eixo axial em função do tempo e do espaço. Considera-se G_{zz}^0 a soma das componentes de cisalhamento G_{zz}^S e longitudinal G_{zz}^P .

$$G_{zz}^0 = G_{zz}^S + G_{zz}^P \quad (6)$$

Algumas considerações e aproximações foram incluídas por Catheline *et al* [16] para obter uma solução analítica de primeira ordem do movimento induzido nas estruturas do meio durante a propagação das ondas S. Simplificadamente a solução é obtida diferenciando a função de Green no tempo $\frac{\partial G_{zz}^0}{\partial t}$ e, em seguida, operando a convolução com a força de excitação oscilatória de frequência ω , $\frac{\partial G_{zz}^0}{\partial t} * \sin(\omega t)$. Assim o traço da onda sísmica é dado pela equação (7):

$$s(t) = \frac{c_p}{2\pi\mu z^2 \gamma^2} \{ \omega t_p \cos \omega(t - t_p) - 2\gamma \sin \omega(t - t_s) + \frac{2\gamma}{\omega t_s} [\cos \omega(t - t_s) - \cos \omega(t - t_p)] \} \quad (7)$$

Em que, t_p, c_p, t_s e c_s são o tempo de chegada da onda P, velocidade de propagação da onda P, tempo de chegada da onda S e velocidade de propagação da onda S, respectivamente e $\gamma = \frac{c_p}{c_s}$. Nesta solução observamos que para altas frequências a onda P sobressai em relação à onda S, para frequências baixas um misto de onda P e S são observados e para uma banda intermediária, de alguns Hertz, há predominância da onda S.

Bercoff et al [17] utilizaram as velocidades das ondas P e S, c_p e c_s respectivamente, geradas pela ação de uma força externa para obter a resistência de um meio material à compressão (λ) e ao cisalhamento (μ), ambos expressos em Pa pelas equações

(8) e

(9), [2].

$$c_s = \left(\frac{\mu}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

$$c_p = \left(\frac{\lambda + 2\mu}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

Em tecidos moles $\mu \ll \lambda$ (i.e. $\frac{\lambda}{\mu} \approx 10^5$) consequentemente $c_p \gg c_s$ assim ondas P são muito velozes ($c_p = 1500 \text{ m.s}^{-1}$) em relação às ondas S que se propagam com velocidades de poucos m.s^{-1} , portanto separadas quase instantaneamente.

As relações acima desconsideram a viscosidade do meio material, posteriormente Catheline *et al* [18] testaram modelos reológicos apropriados para descrição de efeitos da viscosidade fazendo medidas de velocidade e atenuação de ondas de cisalhamento. Os autores observaram que o modelo de Voigt era o mais adequado para avaliação de simuladores de tecidos moles. Este modelo relaciona a frequência (ω_s), atenuação (α_s) e velocidade (c_s) das ondas de cisalhamento com o módulo de cisalhamento elástico (μ_1) e viscoso (μ_2) do meio visco-elástico.

$$c_s = \left(\frac{2(\mu_1^2 + \omega_s^2 \mu_2^2)}{\rho(\mu_1 + (\mu_1^2 + \omega_s^2 \mu_2^2)^{\frac{1}{2}})} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

$$\alpha_s = \left(\frac{\rho \omega^2 \left((\mu_1^2 + \omega_s^2 \mu_2^2)^{\frac{1}{2}} - \mu_1 \right)}{2(\mu_1^2 + \omega_s^2 \mu_2^2)} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

Utilizando o modelo de Voigt, que é visto como o modelo que melhor se adequa a modelagem de tecidos biológicos, Zhao *et al* [19] resolveram o par de equações (10) e (11) para obter uma aproximação na obtenção de μ_1 e μ_2 , fazendo uso da atenuação e velocidade da onda sísmica.

$$\mu_1 = \rho c_s^2 \omega_s^2 \frac{(\omega_s^2 - \alpha_s^2 c_s^2)}{(\omega_s^2 + \alpha_s^2 c_s^2)^2} \quad (12)$$

$$\mu_2 = \frac{2\rho \alpha_s c_s^2 \omega_s^2}{(\omega_s^2 + \alpha_s^2 c_s^2)^2} \quad (13)$$

Portanto, durante o transiente os movimentos induzidos pela ação de uma força magneto motriz dinâmica têm duas vezes a frequência da força. Após o transiente há formação de ondas sísmicas, ondas P e ondas S, que são separadas instantaneamente devido à diferença de velocidade entre si. A estimativa de parâmetros do movimento das ondas S está relacionada com as características mecânicas do meio e são descritos por um modelo reológico, que neste caso é o de Voigt, equações (12) e (13).

1.4. Organização do trabalho

Este trabalho está dividido em capítulos, nos quais se buscou mostrar o desenvolvimento das plataformas para a técnica VMA relacionado aos aspectos físicos abordados nesse Capítulo introdutório.

No capítulo 2 são abordados os sistemas VMA existentes e se descreve uma plataforma de pesquisa em ultrassom, as técnicas de excitação magnética e medidas ultrassônicas implementadas em uma plataforma completa de aquisição

No capítulo 3 é apresentada uma plataforma de processamento e análise baseado nas técnicas de processamento do sinal ultrassônico tanto para modo B quanto para mapas de deslocamento; também são apresentados os métodos de estimação de parâmetros visco-elásticos a partir de medidas de parâmetros de ondas de cisalhamento.

No capítulo 4, é descrita a aplicação dos métodos de análise em uma simulação de onda sísmica no verificar a qualidade dos algoritmos de análise implementados.

No capítulo 5 são apresentadas algumas das aplicações das plataformas de aquisição, processamento e análise em experimentos em fantomas e *in vivo* para medidas quantitativas movimento induzido por ação de força magnética e medidas *in vitro* para caracterização viscoelástica de fantomas.

No capítulo 6 discutem-se as principais aplicações dos métodos implementados, assim como as suas limitações e a continuidade do desenvolvimento para futuras aplicações das plataformas desenvolvidas neste trabalho.

CAPÍTULO 2

2. PLATAFORMA DE AQUISIÇÃO DA TÉCNICA VMA

2.1. Diagrama do sistema VMA

Os sistemas de excitação e aquisição da técnica VMA consistem, de maneira geral, em uma bobina de indução magnética energizada por gerador de função e amplificador para gerar uma tensão oscilatória amplificada. A bobina gera um campo magnético que interage com as partículas magnéticas presentes no meio gerando uma força magnética. A resposta mecânica induzida na amostra, devido a essa força magnética, é capturada utilizando um equipamento de ultrassom pulso-eco.

Com o objetivo de automatizar o sistema propusemos uma montagem composta pela interface de pesquisa em ultrassom (URI), transdutor ultrassônico, gerador de função, amplificador de potência, bobina e, em alguns casos, concentrador de campo magnético no interior da bobina (Figura 1), em que o URI é responsável pelo controle sincronizado de excitação magnética e detecção acústica.

Figura 1: Diagrama esquemático do sistema de VMA controlado somente pelo URI.

2.2. Interfaces de pesquisa em ultrassom (URI)

Para desenvolvimento da plataforma de aquisição utilizamos um moderno equipamento de ultrassom de hardware avançado composto por um conjunto de placas,

que possuem *Field Programmable Gate Array* (FPGA) e *Digital Signal Processor* (DSP), acopladas em uma arquitetura padrão computador pessoal *personal computer* (PC). Esta plataforma foi programada utilizando o kit de desenvolvimento de software (SDK) com o qual programamos em alto nível para controlar desde a formação do feixe acústico, tanto para transmissão quanto para recepção, até a aquisição de dados com alta frequência de amostragem e alta taxa de quadros ou *frame rate* (*fps*), em modo RF ou em diferentes etapas de processamento do sinal adquirido pelo transdutor ultrassônico.

A arquitetura padrão PC permitiu que fosse desenvolvida uma plataforma de aquisição completa, que além de controlar o URI, pode fazer uso de protocolos de comunicação (i.e. USB, TCP/IP) para controlar ou transferir informação para quaisquer outros dispositivos eletrônicos para pós-processamento.

2.2.1. Sonix RP, Ultrasonix

O Sonix RP, Ultrasonix foi o URI utilizado neste estudo. Ele possui especificações técnicas adequadas (Tabela 1) ao desenvolvimento de novas técnicas, neste caso, a VMA. O modo comercial deste URI é um pacote de software compilado, disponibilizado para compra pelo fabricante, que permite modos operacionais de acesso à informação em baixo nível das imagens ultrassônicas adquiridas em um exame, [9].

Tabela 1: Especificações técnicas do URI Sonix RP, Ultrasonix.

Especificação	
Modelo	Sonix RP
Transdutores	128 Elementos (Linear/Convexo) 64 Elementos (Phased)
Canais (TX)	128
Canais (RX)	32
Frequência de amostragem máx.	40 MHz
ADC	10-bit
Sistema operacional	Windows OEM 32-bits

Além de agregar custo financeiro o pacote de software de pesquisa é restrito, não permitiu controle total dos parâmetros de baixo nível. Portanto foi utilizado o conjunto de

bibliotecas dinâmicas do SDK 5.7.4 para programar de maneira dedicada o feixe acústico sincronizado com excitação magnética, que propiciou sua utilização específica para a técnica VMA ou outras técnicas compatíveis com o sistema da Figura 1, por exemplo, um excitador mecânico no lugar da bobina.

O Texo™ é a biblioteca mais importante para este desenvolvimento e permite o controle de todas as funções de baixo nível de um URI. O Impero™ é a ferramenta de controle do console, controla os botões e controles do URI. O Amplio™ é a ferramenta que auxilia no processamento da imagem ultrassônica. Em síntese as 3 bibliotecas permitem realizar todas as tarefas relacionadas ao desenvolvimento de uma aplicação dedicada a ultrassom que roda na plataforma Sonix RP (Figura 2).

Figura 2: Diagrama de utilização do SDK 5.7.4 Ultrasonix e cada uma das especificidades das bibliotecas Texo™, Impero™ e Amplio™.

Todas as ferramentas são escritas em C/C++ e são utilizadas como bibliotecas dinâmicas, dessa forma são utilizadas em conjunto para abranger todas as tarefas necessárias para uma aquisição utilizando o URI.

Os transdutores acoplados ao URI são compostos por um número fixo de elementos piezoelétricos arranjados de maneira linear ou convexa, ambos em forma de *array*, espaçados entre si (*pitch*). Os dois modelos utilizados foram o transdutor micro convexo EC9-5/10 e o transdutor linear L14-5/38 (Tabela 2).

Tabela 2: Especificações dos transdutores utilizados acoplados ao Sonix RP

	Micro convexo	Linear
Modelo	EC9-5/10	L14-5/38
Elementos	128 Elementos	128 Elementos

Largura de Banda	9-5 MHz	14-5 MHz
Profundidade	30 mm até 120 mm	20 mm até 90 mm
Raio	10 mm	-
Pitch	0,21 mm	0,30 mm
Abertura	148 graus	-

2.3. Feixe acústico e resolução temporal

Com o Texo™ controlamos o feixe acústico dos transdutores utilizados, que possuíam 128 elementos. O número de elementos coincide com o número de canais de transmissão (TX) do Sonix RP, por isso, foi possível emitir um feixe acústico com 1 até todos os elementos do transdutor. O tempo entre cada emissão acústica é denominado de frequência de repetição de pulso (PRF). A recepção (RX) é feita por 32 canais, limitando o número de elementos recebidos por emissão.

Uma aquisição pulso-eco consiste em emitir uma onda ultrassônica, em seguida, esperar os tempos: De chegada da onda até a profundidade escolhida Δt_1 e retorno para que a onda chegue até o transdutor Δt_2 , o intervalo de tempo total do pulso-eco é $\Delta t = \Delta t_1 + \Delta t_2$. Na Figura 3 é ilustrado como uma aquisição em modo pulso-eco das n linhas do mapa de RF é realizada (e.g. 128). Neste exemplo o transdutor à esquerda, em modo TX, emite um feixe acústico com todos os elementos. Na recepção o processo de formação da n ésima linha é realizado a partir de um elemento dito central somados os n elementos usados no feixe de recepção, [20], o que implica em uma emissão para formar uma linha do mapa.

Figura 3: Processo de formação de um frame composto por 128 linhas de RF. A esquerda (TX) a emissão com todos os elementos do transdutor. A direita (RX) a formação das linhas de RF de forma sequencial, neste caso ocorre uma emissão para cada linha formada na recepção.

Este processo para formação do mapa é repetido até que todas as linhas sejam adquiridas formando, ao final, um *frame*. O inverso do período de formação do frame é denominado de *frame rate* (*fps*). A alta resolução temporal é importante para o VMA, pois o movimento possui frequências da ordem de centenas de Hertz. Uma maneira de aumentar o *fps* é a técnica de divisão em subsetores de alta resolução temporal. A técnica consiste em aumentar a resolução temporal do feixe criando K subsetores com um número reduzido de linhas de RF ($n < 128$). O número de subsetores necessários para obtermos todo o campo de visão do transdutor é dada pela relação $K = \frac{128}{n}$, [21].

Para pulso-eco uma aproximação do valor do fps_{sub} de cada subsetor criado é estimado pela relação cinemática da propagação da onda ultrassônica e número de linhas de RF adquiridas por subsetor, Equação (15). Os n passos necessários para aquisição de um subsetor é semelhante ao processo da Figura 3, deslocando-se n elementos à direita até que todos os subsetores K sejam adquiridos.

$$fps = \frac{1}{\Delta t} = \frac{c_{ag}}{2r} \quad (14)$$

$$fps_{sub} = \frac{fps}{n} \quad (15)$$

Sendo r a profundidade da aquisição. Na Figura 4 é mostrado os valores *fps* obtidos para diferentes profundidades utilizando o Sonix RP acoplado ao transdutor L14-5/38.

Figura 4: Avaliação do valor do fps para diferentes profundidades utilizando o feixe acústico sequencial em relação ao número de elementos ativados.

Observamos que para profundidades até 90 mm podemos utilizar 4 linhas de RF, ou seja, 4 elementos por subsetor para obter pelo menos 2 kHz que, segundo o critério de Nyquist, é suficiente para capturar movimentos de até 1 kHz. Para 32 elementos, observa-se que o *fps* cai consideravelmente. Isto ocorre devido ao número de canais da Sonix RP para recepção ser 32. De maneira geral utilizamos $K > 4$ para transdutores de 128 elementos.

2.4. Modos de excitação magnética

Para gerar a força magnética, utilizamos uma bobina descrita na Tabela 3, que foi energizada por um gerador de função (Agilent, 33522A) e um amplificador de potência (Ciclotron, 20000 Ω 2 H) para gerar corrente.

Tabela 3: Características da bobina usada para gerar o campo magnético externo.

Diâmetro externo (mm)	Diâmetro interno (mm)	Número de espiras	AWG
90,0	45,0	413	18

Foram avaliadas duas possibilidades de excitar o meio: contínua e pulsada. Nesse caso, através da própria interface do protocolo de VMA, o gerador de função pode ser configurado com uma função de onda em forma de pulso ou sinal contínuo na forma

senoidal e com amplitude, frequência e número de ciclos definidos de acordo com o protocolo experimental. No modo contínuo a bobina fica ligada continuamente durante a aquisição acústica, que pode ocorrer de forma assíncrona.

Na Figura 5a é mostrado o perfil esperado da força magnética (F_B) a partir de um potencial de entrada (V_{in}). Nesta simulação F_B , equação (4), responde com o dobro da frequência de um potencial senoidal gerado. A frequência de excitação foi de 100 Hz (Figura 5b), com frequência de amostragem de 2000 Hz.

Figura 5: (a) Simulação do potencial senoidal com frequência de 100 Hz e a resposta da força magnética esperada e (b) o espectro de potência desses sinais.

A excitação magnética pulsada é feita usando um número de ciclos finitos e de forma síncrona a medida ultrassônica pulso-eco.

Ambos os modos contínuos (assíncrono) e pulsados (síncrono) foram utilizados com o método da divisão por subsetores. A excitação magnética ocorre no começo da aquisição de cada subsetor. O perfil de um pulso do sinal senoidal (azul), bem como, da força magnética (vermelho), com um ciclo e frequência de 100 Hz, é mostrado na Figura 6a e o espectro pode ser observado Figura 6b.

Figura 6: (a) Simulação do potencial de um ciclo senoidal com frequência de 100 Hz e (b) a resposta magnética esperada para o modo pulsado.

2.4.1. Comunicação IVI-COM

A configuração dos modos de excitação magnética foi feita utilizando um moderno protocolo de comunicação denominado de IVI-COM. Algumas vantagens do IVI-COM são alto desempenho e flexibilidade no desenvolvimento. Assim o protocolo IVI-COM permite que um instrumento eletrônico seja generalizado virtualmente por meio de bibliotecas dinâmicas padronizadas de controle e automação escritas em C/C++. Existe uma vasta gama de equipamentos eletrônicos compatíveis como, por exemplo, geradores de funções e amplificadores. Novamente o custo financeiro é reduzido devido à biblioteca ser distribuída para uso dinâmico e, mais importante, a biblioteca é padronizada podendo a classe ser reutilizada para equipamentos diferentes.

2.5. Desenvolvimento da plataforma de aquisição

O desenvolvimento foi idealizado por meio de uma abstração em alto nível, que virtualiza todas as tarefas de baixo nível (URI e eletrônicos) em classes. As tarefas realizadas pelo sistema VMA são abstraídas utilizando o paradigma de programação orientado a objeto e escritas em linguagem C/C++ e Qt com o ambiente integrado de desenvolvimento Visual Studio Express 2010, Microsoft®. Dessa forma reduziu-se custo e obteve-se alto desempenho computacional viabilizando uma plataforma de controle e aquisição do sistema VMA que é executada diretamente do URI.

Para o desenvolvimento do *software*, utilizou-se o conceito de *framework*. Este conceito consiste de uma abstração, que une vários códigos desenvolvidos como projetos diferentes e escritos de forma generalizada para receber um conjunto de parâmetros determinantes nas aquisições da técnica VMA. Desta forma foi possível mudar as configurações em tempo real do sistema VMA.

A estrutura básica do *software* foi modelada dividindo as tarefas do URI e as tarefas do sistema eletrônico de excitação magnética. As classes escritas foram então instanciadas em um programa que possui interface gráfica de usuário (GUI) para receber o conjunto de parâmetros. Este *software* permitiu rápida configuração dos sistemas VMA para formação de protocolos de aquisição magneto-acústicos, propiciando mapas de RF com alta resolução temporal e espacial e foi denominado de plataforma de aquisição VMA-A.

2.5.1. Classes desenvolvidas para virtualização

No digrama da Figura 7 é mostrado o esquemático do desenvolvimento do VMA-A (nível mais alto), as classes mais importantes (nível intermediário) e a sua função na plataforma no nível mais baixo. A ordem cronológica da instanciação das classes, mostradas no nível intermediário, é obtida lendo-o no diagrama da esquerda para direita.

As classes têm denominações que remetem a sua funcionalidade dentro da plataforma. A classe *Hardware* foi criada para executar a tarefa de virtualização do URI, garantindo seu funcionamento, a conexão com os transdutores e uma função tipo *callback* que permitiu o controle dos *frames* que chegam ao URI. A classe *Controls* foi desenvolvida para controlar todos os parâmetros que normalmente são configurados manualmente por usuários. A classe *Sequences* foi o construtor de feixe acústico de alta resolução temporal. A classe *Funcgen* foi o construtor de excitação magnética que controla a geração da força magnética.

Figura 7: Diagrama de desenvolvimento do VMA-A [topo (3º nível)], as classes principais que foram implementadas (2º nível) e as funções descritas sucintamente (1º nível).

Utilizando estas classes foi possível automatizar totalmente a tarefa de configuração e aquisição dos dados da técnica VMA. O conjunto de configurações utilizadas no sistema constituem os protocolos que foram utilizados para aquisição dos mapas de RF de alta definição para pós-processamento. O desenvolvimento destas classes está melhor explicado por meio de diagramas de modelagem no apêndice A.

2.5.2. Qt 4.8.4

A interface gráfica de usuário (GUI) do VMA-A foi escrita em Qt versão 4.8.4 (Digia). O Qt é um framework de programação multi-plataforma que, após compilado, roda em diversos sistemas operacionais (e.g. Windows®) e, é escrito em C/C++. O uso do Qt se integra perfeitamente com as classes desenvolvidas no paradigma de orientação a objetos e, também possui mecanismos já implementados, que aumentam as possibilidades de interação do usuário. Portanto uso do Qt para virtualização de sistemas VMA foi de baixo custo financeiro e suficiente para todas as tarefas que foram propostas neste estudo.

O fato do SDK e do IVI-COM já fazerem uso de bibliotecas dinâmicas facilitou a construção de interfaces gráficas no ambiente dinâmico do Qt, portanto as classes escritas em C/C++ são também objetos do Qt (QObject).

Alguns mecanismos do Qt são extremamente úteis no desenvolvimento de interfaces gráficas. O QObject é o mecanismo nativo do Qt. O uso de *signals* e *slots*

permite que eventos de classes do Qt se comuniquem com outros métodos de outras classes sem que estejam em um contexto de herança.

Um exemplo para introduzir o conceito de *signals* e *slots* é considerarmos um espaço orientado a objetos onde existem 2 objetos distintos. O objeto 1 possui apenas o sinal Verde e o Objeto 2 possui apenas o slot Colorir. Consideremos ainda que estes objetos neste espaço podem trocar mensagens a princípio sem restrições. Em seguida, usando um método de conexão do Qt, criamos um *link* da característica do primeiro objeto de emitir um sinal chamado Verde com o *slot* Colorir do segundo objeto.

Durante a execução no momento em que o Objeto 1 emitir o sinal Verde o Objeto 2 entrará com o *slot* Colorir. Dessa forma é possível trazer atributos do Objeto 1 na assinatura do sinal Verde para o Objeto 2 via *slot* Colorir conforme o código escrito:

```
QObject::connect(Obj1, SIGNAL(Verde(* void)), Obj2, SLOT(Colorir(* void)));
```

O Qt ainda possui alguns mecanismos que foram de extrema importância para este desenvolvimento como QImage e QThread.

A classe QImage fornece uma representação de imagem com um motor gráfico nativo do Qt (Figura 8), ou seja, independente de hardware. Essa classe permite acesso direto aos dados de pixel.

Figura 8: Representação de uma imagem utilizando a classe QImage.

Um ponteiro para o buffer de memória, por exemplo, é suficiente para criar uma imagem ou é possível operar coerção explícita para colocar um valor de pixel na imagem, por exemplo, no código:

```
QImage img(3,3, RGB32); img.setPixel((double) 0xff7aa327);
```

Os *threads* são entendidos como processos paralelos que, quando executados, não concorrem com a execução do programa principal (*main thread*). O uso de *threads* através da classe QThread possibilitou a visualização de imagens em modo B em tempo real na tela do VMA-A.

As imagens são mostradas antes ou depois das aquisições utilizando a classe QThread em conjunto com a classe QImage, que constroem, diretamente do buffer do Sonix RP, imagens em modo B utilizando mecanismos da classe Hardware.

2.6. Interface gráfica de aquisição

As bibliotecas do Qt permitem que qualquer código escrito, depois de compilado, possa ser executado em diversos sistemas operacionais. O Qt se integrou perfeitamente com as classes desenvolvidas no paradigma de orientação a objetos. Além disso, possui mecanismos que aumentam as possibilidades de interação do usuário, portanto uso do Qt foi essencial para nossa abstração, não agregou nenhum custo financeiro e foi suficiente para todas as tarefas que foram propostas neste estudo.

Outro ponto importante foi o fato do SDK Ultrasonix e do protocolo IVI-COM já fazerem uso de bibliotecas dinâmicas, o que facilitou a construção de interfaces gráficas no ambiente dinâmico do Qt apenas incluindo, nas classes do VMA-A em C/C++, os métodos do Qt.

A interface gráfica de usuário (Figura 9) permitiu que o usuário configurasse todos os parâmetros de uma aquisição da técnica VMA que utiliza o sistema semelhante ao da Figura 1. Os vários testes realizados utilizando a GUI serviram para definição dos protocolos de aquisições.

2.6.1. Procedimento de uso para aquisição VMA

Nesta seção, está descrito de forma sucinta o procedimento de uma aquisição utilizando o VMA-A. Esta é realizada seguindo 4 passos:

- Passo 1: Conectar o URI, neste caso o Sonix RP (clicando no balão 1).
- Passo 2: Configurar os controles com os parâmetros da imagem (clicando no balão 2).

- Passo 3: Na guia VMA, configurar os subsetores de alta resolução temporal e depois o modo de excitação magnética (clicando no botão 3).
- Passo 4: Deixar o VMA framework realizar todas as tarefas previamente configuradas e salvar os mapas de RF da aquisição no disco (clicando no botão 4).

Os passos 1, 2, 3 e 4 são indicados pelos círculos vermelhos da Figura 9. Para cada passo uma nova janela emerge (diálogo) requerendo do usuário uma configuração de parâmetros.

Figura 9: Interface gráfica de usuário do VMA Framework de aquisição.

A interface gráfica do VMA-A (Apêndice C – Interface gráfica de usuário da plataforma de aquisição (VMA-A)) possibilita visualização em Modo B, e sugere, a partir da configuração do *frame rate* e da profundidade, a configuração do subsetor que pode ser utilizado na aquisição dos mapas de RF. O VMA-A possibilitou que fossem feitas

várias modificações nas configurações dos parâmetros acústicos e magnéticos rapidamente.

CAPÍTULO 3

3. PLATAFORMA DE PÓS-PROCESSAMENTO

O desenvolvimento da plataforma de aquisição objetivou, principalmente, fornecer dados experimentais e informações padronizadas, para que fossem utilizadas durante o pós-processamento. O pós-processamento consistiu na obtenção dos mapas de deslocamento das estruturas internas do alvo.

No Cap. 1 abordamos os aspectos físicos da técnica VMA, neste capítulo abordamos os métodos de processamento por *speckle tracking*. Estes métodos buscam obter o atraso temporal entre sucessivas linhas de ecos ultrassônicos em modo RF de uma aquisição acústica. Para a técnica de VMA, trata-se do movimento mecânico proveniente da interação da força magnética que surge entre a magnetização das partículas ferromagnéticas presentes na amostra e próprio campo magnético de excitação externo.

Neste capítulo mostramos o método implementado em MATLAB® utilizando um computador padrão *personal computer* (PC) com uma unidade de processamento gráfico (GPU) que suportava computação paralela.

3.1. Mapas de RF e modo B

Consideremos uma aquisição com transdutor linear onde os mapas de RF são adquiridos em coordenadas retangulares (m, n) ao longo do tempo (t). Neste caso denotamos a imagem como:

$$RF(\text{profundidade}, \text{elemento do transdutor}, \text{frame}) \equiv RF(m, n, t = t_0)$$

Na

Figura 10a observamos a representação da imagem em modo RF e na

Figura 10b a imagem em modo B de uma amostra de parafina utilizada para ilustrar o processamento de imagem. O modo B é obtido a partir do mapa de RF pelo módulo da transformação de Hilbert ($\mathcal{H}$) ao longo da profundidade e, em seguida, tomando o logaritmo decimal para melhor ajuste de brilho (B) e contraste (C):

$$B(m, n, t = t_0) = \log_{10} (c + b | \mathcal{H}\{RF(m, n, t = t_0)\} |)$$

Sendo c o contraste e b o brilho para melhor ajuste do range dinâmico.

Figura 10: Representação do (a) mapa de RF e (b) modo B obtido em uma amostra de parafina

As matrizes mostradas em elemento do transdutor (n) e amostra da profundidade (m) são representações de uma aquisição pulso-eco na profundidade (r), em que o valor máximo de m (M) está relacionado com o período de aquisição Δt [Equação (14)](15) e a frequência de amostragem do URI (fs), $M = \Delta t fs$.

A frequência espacial de amostragem axial (fs_z) é o inverso da distância física entre cada pixel do mapa de RF formado. Desta forma $fs_z = \frac{M}{r}$. Por exemplo, para uma aquisição com os parâmetros escolhidos: $c_{ag} = 1500 \text{ m.s}^{-1}$, $r = 85,0 \text{ mm}$ e frequência de amostragem $fs = 40 \text{ MHz}$ obtemos $M = 4416$ e a frequência de amostragem espacial ao longo do eixo axial de 52 px.mm^{-1} .

O valor máximo de n (N) está relacionado com o campo de visão do transdutor (FOV). Dependendo da complexidade da formação do feixe acústico, a frequência de amostragem lateral, fs_x , pode ser variável, mas no caso mais simples, o FOV de um transdutor linear é determinado pela distância entre o primeiro e último elemento ativo do array, $fs_x = \frac{(N-1)}{FOV}$. Neste caso, para o transdutor L14-5/38, a frequência de amostragem espacial ao longo do eixo lateral é de 3 px.mm^{-1} .

As frequências espaciais fs_z e fs_x são utilizadas para obter, posteriormente, os eixos axial e lateral, respectivamente.

3.2. Conversão para *scanner* convexo (*Scan conversion*)

No caso do uso de transdutores com lentes esféricas, os dados de RF são obtidos em coordenadas polares [22], ou seja:

$$B(\text{raio}, \text{ângulo de abertura}, \text{frames}) \equiv B(r, \theta, t = t_0)$$

Sendo r o raio e θ o ângulo do feixe em relação ao eixo principal do transdutor.

A transformação geométrica para coordenadas cartesianas $B(m, n, t = t_0)$ foi feita utilizando as relações matemáticas de mudança de coordenadas (16). Utilizando os valores fornecidos pela Tabela 2 podemos calcular o valor do ângulo θ em distância angular (e.g. EC9-5/10 de abertura máxima 74°). Em termos de distância física a frequência de amostragem espacial do eixo r é numericamente igual a f_{s_z} e a frequência de amostragem angular é $f_{s_\theta} = \frac{N-1}{148^\circ}$.

$$\begin{cases} m = r \cos(\theta) \\ n = r \sin(\theta) \end{cases}$$

(16)

Figura 11: (a) Mapa de RF obtido com um transdutor EC9-5/10 e (b) mapa de RF após processo de conversão para coordenadas cartesianas.

Os vetores m e n são obtidos calculando os valores de $r = \sqrt{m^2 + n^2}$ e o valor de $\theta = \tan^{-1}\left(\frac{m}{n}\right)$.

3.3. Mapas de deslocamento

3.3.1. Estimativa de atraso temporal

A maneira utilizada para obter o atraso temporal proposta por Zahiri-Azar e Salcudean é baseada no teorema da correlação cruzada, [23]. Na forma complexa este teorema diz que para dois sinais s_1 e s_2 amostrados no tempo com frequência de amostragem (fs), a correlação cruzada (R_{12}) terá a mesma frequência de amostragem, se calcularmos a transformada inversa de Fourier ($\mathcal{F}^{-1}$) do produto das transformadas de Fourier ($\mathcal{F}$) de s_1 e s_2^* (“*”, complexo conjugado).

A correlação cruzada normalizada (R_{12}^N) consiste em dividir R_{12} pela energia de cada sinal para que o valor máximo de R_{12}^N seja igual ao valor unitário. Considerando que os sinais s_1 e s_2 sejam janelados por uma janela (w) de tamanho fixo, a correlação cruzada normalizada das janelas dos sinais s_1 e s_2 é representada pela seguinte expressão:

$$R_{12}^N = \frac{\mathcal{F}^{-1}\{\mathcal{F}\{s_1 \cdot w\} \mathcal{F}\{s_2 \cdot w\}^*\}}{\sqrt{(s_1 \cdot w)^2 (s_2 \cdot w)^2}} \quad (17)$$

Em que $\mathcal{F}^{-1}$ e $\mathcal{F}$ são a transformada inversa e direta de Fourier.

O atraso temporal entre os dois sinais corresponde à diferença entre a posição do valor máximo (n_0) de R_{12}^N e a posição do valor máximo de referência (n_{ref}), que usualmente é obtido da autocorrelação R_{11}^N (valor de referência).

Na prática, o Sonix RP tem uma máxima taxa de amostragem $fs = 40 \text{ MHz}$ e considerando a velocidade do ultrassom $c_{ag} = 1540 \text{ m.s}^{-1}$ o menor deslocamento ao longo do eixo axial que poderia ser detectado é de $19,25 \mu\text{m}$. Porém, Viola e Walker [24] explicaram detalhadamente a importância de corrigir a posição do pico de máxima correlação por meio de interpolação, pois dessa forma foi possível observar deslocamentos de até $0,1 \mu\text{m}$, que é o nível do ruído. Eles avaliaram que a maneira mais eficiente computacionalmente é a interpolação polinomial de ordem 2, que pode ser deduzida a partir de polinômios de Lagrange.

Assim a partir da posição de pico máximo n_0 são colhidas as posições anterior e posterior. Com estes três pontos obtém-se a estimativa do desvio da posição do pico (δ):

$$\delta = \frac{R_{12}(n_{-1}) - R_{12}(n_1)}{2(R_{12}(n_{-1}) - 2R_{12}(n_0) + R_{12}(n_1))} \quad (18)$$

O algoritmo implementado para obtenção dos mapas de deslocamento foi baseado no algoritmo de correlação cruzada, com ajuste de pico de máxima correlação por interpolação polinomial de ordem 2.

3.3.2. Algoritmo de processamento

O processamento consistiu em correlacionar sucessivamente os mapas de RF. O tipo de mapas obtidos por meio deste processo é diferenciado pela forma como foram correlacionados. Somente duas formas, ilustradas na Figura 12e Figura 12b, foram implementadas.

Figura 12: (a) Todos os frames subsequentes são correlacionados com o primeiro para obtenção do mapa de deslocamento e (b) os frames são correlacionados em pares de maneira subsequente para obtenção do mapa de velocidade.

Na Figura 12a estamos utilizando um mapa de RF de referência fixo, ou seja, utilizando o frame $t = t_{ref}$ todos os mapas subsequentes são correlacionados com t_{ref} para obtenção do movimento (u) em metros.

$$u = \frac{\delta_{t,t_{ref}}}{2fs} \times c_{ag} \quad (19)$$

Outra forma é tomar mapas de RF dois a dois conforme ilustrado na Figura 12b, onde a cada correlação muda-se a referência para o frame de maior índice, por exemplo, se tomarmos o $t = 1$ e $t + 1 = 2$ a próxima correlação seria $t = 2$ e $t + 1 = 3$, assim sucessivamente, desta forma obtemos uma taxa de deslocamento ao longo do tempo, ou seja, a velocidade (v) em metros por segundo, para isso multiplicamos pela distância temporal entre cada frame, fps .

$$v = \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\delta_{t,t+1}}{2f_s} \times c_{ag} \times fps \quad (20)$$

Ambos os processos ilustrados na Figura 12a e Figura 12b são obtidos processando as linhas axiais do mapa de RF de uma aquisição semelhante à

Figura 10 (i.e., $r = 85 \text{ mm}$ e $M = 4416$) duas a duas, por exemplo:

$$\delta(m, n = 64, t_{21}) = \delta_{21} \{ RF_2(m, n = 64, t = 2), RF_1(m, n = 64, t_{ref} = 1) \}$$

As linhas são segmentadas com janelas retangulares ($w = 1,0 \text{ mm}$), que durante o processo são sobrepostas em 50% (Apêndice D – Interface gráfica de usuário da plataforma de processamento e análise (VMA-P)). Desta forma obtivemos, utilizando as equações (17) e (18), a linha central do mapa de deslocamento com $f_{s_z} \approx 2.0 \text{ px.mm}^{-1}$ (Figura 13).

Figura 13: Processo de formação do mapa de deslocamento a partir de um mapa de RF. Escolhendo o elemento central ($n = 64$), correlacionamos dois frames sucessivos ($t = 1$ e $t = 2$) com janelas de tamanho fixo ($w = 1,0 \text{ mm}$) e 50% de sobreposição para obter o desvio (δ).

Neste processamento utilizamos sempre janelas (w) unidimensionais de tamanho fixo para correlação e as janelas foram sobrepostas no intuito de aumentar a frequência de amostragem axial do mapa de deslocamento. Este processamento é repetido para todas as linhas de RF do mapa (e.g. 128) para obtermos todo o campo de visão do transdutor utilizado. Os mapas de deslocamento ainda são filtrados utilizando mediana para remoção de picos de não correlação (*spikes*), os tamanhos dos *kernels* deste filtro são escolhidos proporcionalmente aos valores de f_{s_z} e f_{s_x} do mapa de deslocamento, [23].

Quando foi possível observar ondas sísmicas extraímos estimativas dos parâmetros que as caracterizam: Velocidade de grupo, velocidade de fase e atenuação. Estes parâmetros foram obtidos da análise dos mapas de deslocamento.

3.4. Estimativas de velocidade e atenuação de ondas sísmicas

Os métodos utilizados para as estimativas foram descritos por Palmieri *et al* [25] para estimativas de velocidade de grupo e, melhor abordados por Amador *et al* [26] nos casos da velocidade de grupo, atenuação e velocidade de fase.

3.4.1. Algoritmo de suavização

O traço da onda sísmica é a amplitude da onda sísmica amostrada no tempo. A partir deste sinal a informação da velocidade e da atenuação da onda sísmica é extraída. Para que o ruído de alta frequência fosse removido sem remover nenhuma componente de frequência decorrente da aplicação de filtros foi desenvolvido um algoritmo de suavização espacial que coleta do mapa de deslocamento o traço da onda sísmica $s(r, t)$, em uma determinada profundidade (r). Este algoritmo consiste no uso de um conjunto de regiões de interesse (ROI), de área (A), dispostas em várias posições crescentes ao longo do eixo axial do mapa de deslocamento.

A distância entre a primeira e última posição determinam uma trajetória (Δr). O traço sísmico suavizado é obtido tomando a média ($\bar{u}$) dos deslocamentos ou ($\bar{v}$) das velocidades dentro da ROI de área $A = RX$, sendo R o tamanho axial e X o tamanho lateral da ROI.

Figura 14: Extração do traço sísmico ao longo da profundidade r de um mapa de deslocamento.

Repetimos o processo para todos os frames em cada posição r (Figura 14). Dessa forma, o traço sísmico possui amostragem igual ao fps . Em seguida, interpolado por uma filtragem passa baixa para obter uma amostragem de 50 kHz. Assim, condicionamos o traço sísmico para a análise reduzindo as ambiguidades do *time-to-peak*, que é um método baseado na amplitude, que é classicamente utilizado para obtenção de velocidade e atenuação de ondas sísmicas ou outros métodos de processamento, [25].

3.4.2. Velocidade de grupo e atenuação (*time-to-peak*)

O algoritmo *time-to-peak* consiste em obter a relação espaço-tempo do pico (ou vale) do traço da onda sísmica (onda S) para obter uma estimativa de velocidade e o decaimento da amplitude do pico (ou vale) é utilizada para obter uma estimativa de atenuação [25]. Baseado no algoritmo de *time-to-peak* a estimativa da velocidade de grupo (c_g) e da atenuação (α_s) são obtidos através do traço sísmico suavizado. Para isto, a posição (r), o intervalo de tempo até o pico (t) e o deslocamento (u) [ou velocidade (v)] do valor máximo (pico) ou valor mínimo (vale) da onda em duas posições são substituídos na Equação (21) e Equação (22), esta equação pode ser obtida tomando o logaritmo natural da Equação (11) e isolando α .

$$c_g = \frac{r_1 - r_2}{t_1 - t_2} \quad (21)$$

$$\alpha = -\frac{\ln\left(\frac{\bar{u}_{r_1}}{\bar{u}_{r_2}}\right)}{r_1 - r_2} \quad (22)$$

Quando a onda S é do tipo cilíndrico há atenuação é composta de perdas viscosas e geométricas. As perdas geométricas podem ser corrigidas multiplicando-se o sinal da onda sísmica por $\sqrt{r}$ [26]. Assim no intuito de obter apenas a atenuação relacionada a perda viscosa multiplicamos os valores do deslocamento da onda S por $\sqrt{r}$. Utilizando ajuste exponencial ($e^{-\alpha r}$) e o ajuste linear ($r = c_g t$) são obtidos os valores de α e c_g , respectivamente.

3.4.3. Velocidade de grupo (correlação cruzada)

Outra forma de obter uma estimativa da velocidade de grupo foi utilizar o algoritmo de correlação da seção (3.3.2) adaptado para obtermos a diferença temporal entre os traços sísmicos (*lag*). O primeiro traço sísmico é usado como referência e os traços subsequentes são correlacionados para estimar a diferença temporal, em seguida, uma regressão linear das posições (r) da ROI e do atraso calculado é suficiente para estimar a velocidade de grupo, [27].

3.4.4. Velocidade de fase

Para estimativas de velocidade de fase foi realizada uma análise do espectro do traço sísmico suavizado na forma complexa (traço analítico), [28]. O traço analítico é obtido utilizando a transformada de Hilbert que, expressa na forma complexa, temos:

$$\mathcal{H}\{s(t)\} = s(t) + j s_q(t) \quad (23)$$

Sendo $s(t)$ o traço real, $s_q(t)$ a quadratura e j a raiz quadrada de -1. A informação da fase pode ser extraída da forma complexa (23) por $\phi = \tan^{-1}\left(\frac{s_q}{s}\right)$.

A fase ϕ do traço analítico é confinada no intervalo $[-2\pi, 2\pi]$, portanto para a estimativa da velocidade de fase (c_f) transformamos a fase em uma função contínua (*unwrap*) para todas as posições (r), ou seja, ao longo da trajetória. Quando o número de posições é igual a 2 a estimativa é obtida substituindo os valores na Equação (24), que possui uma dependência na frequência da onda sísmica (ω_s), que a princípio deve ser igual a duas vezes a frequência de excitação magnética (2ω). A velocidade de fase pode ser estimada utilizando a equação:

$$c_f = \omega_s \left(\frac{\phi_1 - \phi_2}{r_1 - r_2} \right)^{-1} \quad (24)$$

Para obter a frequência do traço sísmico fizemos uma análise espectral para avaliar as componentes da onda sísmica em termos da frequência, [29], similar a Amador *et al*, que utilizaram o espectro de ondas sísmicas ($S(\omega) = \mathcal{F}\{s(t)\}$) para obter a frequência de pico (ω_p) e frequência de centro de gravidade (ω_{cg}), conforme a Equação (25).

$$\omega_{cg} = \frac{\sum \omega S(\omega)^2}{\sum S(\omega)^2} \quad (25)$$

A frequência de centro de gravidade é a frequência central de um grupo de ondas com diferentes frequências, que viaja com velocidade de grupo c_g . Para espectros com grande largura de banda o traço sísmico precisa ser filtrado para a frequência de interesse, por exemplo, a frequência de centro de gravidade. Amador *et al* [29] utilizaram o filtro de Kalman, este filtro faz a extração da velocidade de fase cada componente de frequência presente no espectro da onda sísmica. Em nossa abordagem utilizamos o filtro gaussiano, $H(\omega, \omega_{cg})$, [28], para escolher a frequência de interesse. O espectro filtrado $S_f(\omega)$ é dado pelo produto:

$$S_f(\omega) = S(\omega) \cdot H(\omega, \omega_{cg})$$

$$S_f(\omega) = S(\omega).e^{-\left[\frac{(\omega-\omega_{cg})}{Bw}\right]^2} \quad (26)$$

Sendo BW a largura da banda do filtro gaussiano aplicado. A transformada inversa de Fourier, remonta o traço sísmico filtrado, ou seja, $s_f(t) = \mathcal{F}^{-1}\{S_f(\omega)\}$. Para um número maior de traços sísmicos a mudança de fase ao longo da profundidade é ajustada linearmente para obtermos a velocidade de fase.

A avaliação do ajuste para velocidade de fase, velocidade de grupo e atenuação é feita pelo valor de R^2 , em que os ajustes com valores de R-quadrado menores que 90% são descartados.

3.5. Interface gráfica de pós-processamento (VMA-P)

A etapa de pós-processamento da técnica de VMA é custosa computacionalmente, portanto foi desenvolvido um framework em MATLAB® para agregar o condicionamento e processamento dos mapas de RF para obtenção de mapas de deslocamento e velocidade em uma única interface gráfica de usuário, que também é utilizada para análise de traços sísmicos.

Na Figura 15 é mostrada a plataforma de pós-processamento (VMA-P), que como a plataforma de aquisição, possui interface gráfica de usuário. A GUI permite que os dados adquiridos com a interface VMA-A sejam carregados através do protocolo de rede TCP/IP e, em seguida, sejam processados utilizando todos os métodos discutidos na seção 3.3 e análises da seção 3.4. No Apêndice D – Interface gráfica de usuário da plataforma de processamento e análise (VMA-P) descrevemos em detalhes o uso da plataforma VMA-P.

Figura 15: Interface gráfica de usuário da plataforma de pós-processamento da técnica VMA.

Nos capítulos a seguir é abordado o uso das plataformas desenvolvidas até o presente momento. No Cap. 4 mostramos a validação dos algoritmos descritos neste capítulo para estimativas de parâmetros de ondas sísmicas utilizando uma simulação

gerada a partir da equação (7) e, no Cap. 5, o uso completo das plataformas desenvolvidas em experimentos reais. Estas plataformas de aquisição e processamento já estão sendo usadas por outros projetos do grupo GIIMUS que fazem uso da técnica de VMA e de medidas elastográficas por ultrassom, proporcionando assim maior agilidade e qualidade nas investigações científicas do grupo.

CAPÍTULO 4

4. AVALIAÇÃO POR SIMULAÇÃO DE ONDAS SÍSMICAS

Os resultados obtidos por Catheline *et al* [16] representam o movimento induzido pela ação de uma força externa oscilatória pontual em um meio material homogêneo e isotrópico. Assim simulamos vetores de tempo e espaço para gerar um mapa de deslocamento (Figura 16a) que contém o traço sísmico obtido da equação (7).

O *grid* da simulação foi definido para obtermos $f_{s_x} = 3,4 \text{ px.mm}^{-1}$, $f_{s_z} = 3,5 \text{ px.mm}^{-1}$ e $f_{ps} = 2000 \text{ Hz}$. A frequência de excitação de $f = 100 \text{ Hz}$ e a velocidade do ultrassom $c_{ag} = 1500 \text{ m.s}^{-1}$. Além disso, a densidade do meio foi equivalente ao da água ($\rho = 1000 \text{ kg.m}^{-3}$) e módulo elástico foi de $\mu = \mu_1 = 25 \text{ kPa}$.

Utilizando a transformada de Hilbert obtemos o mapa de fase da simulação. Observamos em ambos os mapas, que a janela temporal (linha preta) do ciclo senoidal é coincidente com a mudança de fase, para uma frequência monocromática neste caso 100 Hz (Figura 16b).

Figura 16: (a) Mapa de deslocamento simulado utilizando $f = 100 \text{ Hz}$, $\mu_1 = 25 \text{ kPa}$ e $\rho = 1000 \text{ kg.m}^{-3}$ e (b) mapa de fase.

Na

Figura 17 é apresentada a propagação da onda sísmica simulada no espaço em instantes de tempo diferentes (10,0 ms, 12,0 ms e 15,0 ms). Como era esperado, observamos que a onda sísmica se propaga com uma velocidade constante Equação

(8) e, perdendo amplitude ao longo da profundidade, que foi programada para ser da ordem de $40,0 \text{ Neper.m}^{-1}$.

Figura 17: Propagação da onda sísmica plana simulada vista no espaço nos instantes de tempo (a) 10 ms, (b) 12 ms e (c) 15 ms.

Estes mapas foram utilizados para testar os métodos de estimar a velocidade e a atenuação (seção 3.4). Assim, foi escolhida uma trajetória de 30 mm (5 ROI distantes 6 mm) com área igual a $1,0 \times 1,0 \text{ mm}^2$.

Os pontos de máximo e mínimo do método *time-to-peak* e a janela de correlação são mostrados na Figura 18a, que mostra os traços sísmicos (1 por ROI) filtrados para a frequência de excitação (f) e os seus respectivos espectros (Figura 18b) indicando a frequência de pico (f_p) e a frequência do centro de gravidade (f_{cg}).

Figura 18: (a) Traço suavizado da onda sísmica simulada filtrada na frequência de excitação e (b) o espectro de magnitude.

Os parâmetros obtidos utilizando os diferentes métodos de estimativa são mostrados na Figura 19a-c, que mostra as posições r_{pos} em função do atraso, em ms , de

um máximo (ou mínimo) ou correlação cruzada, e sua regressão linear com R^2 superior a 90%. O valor correspondente do eixo axial é a posição durante trajetória da onda sísmica de onde são obtidos os valores da fase do traço sísmico. Observamos que há uma perfeita concordância com os valores esperados de velocidade da onda sísmica para as condições simuladas.

Para diferentes valores de módulo elástico foi calculada a velocidade da onda sísmica (

Tabela 4). Com o algoritmo de suavização estimou-se os parâmetros velocidade de grupo no ponto máximo do pico (c_{gmax}) e mínimo do vale (c_{gmin}) utilizando *time-to-peak* (

Tabela 4a-b), velocidade de grupo utilizando correlação cruzada (c_{gxc}) (

Tabela 4c), velocidade de fase (c_f) (

Tabela 4d) e atenuação da onda sísmica (α_s) (

Tabela 4e).

Quando a velocidade da onda sísmica é maior ocorre um aumento no erro da estimativa das velocidades de grupo para todos os métodos. A estimativa da velocidade de fase para um meio puramente elástico deve ser igual à velocidade de grupo, [29], o que foi observado com erro de no máximo 1,0%.

Embora o decaimento da onda sísmica seja simulado, o algoritmo foi capaz de obter valores numéricos para diferentes valores de módulo elástico, considerando que o decaimento simulado seja suficiente para observar pelo menos um ciclo de excitação. O uso do parâmetro R^2 para avaliar a simulação é irrelevante, pois como era esperado em todos os casos o valor obtido foi igual a 0,99 ou 1,00.

Com a simulação foi possível avaliar o algoritmo de estimativa de velocidade, que foi desenvolvido no intuito de automatizar a caracterização dos simuladores de tecidos biológicos (*phantoms*). Os bons resultados obtidos com essa simulação (ver

Tabela 4) nos deu maior segurança para a análise dos testes em fantomas que são mostrados no Cap. 5.

(a)

(b)

(c)

(d)

(e)

Figura 19: Estimativas de parâmetros da onda sísmica simulada. Velocidade de grupo (a) pico, (b) vale e (c) correlação cruzada. Velocidade de fase (d) e atenuação (e).

Tabela 4: Parâmetros relacionados com as características mecânicas do meio estimados em uma trajetória de 30 mm ao longo do eixo axial. Tanto nos ajustes exponenciais quanto nos lineares o valor de R-quadrado foi igual a 1.

μ_1 (kPa)	c_s (m.s ⁻¹)	(a) c_{gmax} (m.s ⁻¹)	(b) c_{gmin} (m.s ⁻¹)	(c) c_{gxc} (m.s ⁻¹)	(d) c_f (m.s ⁻¹)	(e) α (Neper.m ⁻¹)
5	2,23	2,24 ± 0,01	2,24 ± 0,01	2,24 ± 0,01	2,26 ± 0,01	41,94 ± 0,08
10	3,16	3,16 ± 0,06	3,16 ± 0,06	3,18 ± 0,01	3,19 ± 0,01	41,25 ± 0,07
15	3,87	3,91 ± 0,09	3,91 ± 0,09	3,89 ± 0,02	3,91 ± 0,01	42,49 ± 0,08
20	4,47	4,48 ± 0,14	4,48 ± 0,14	4,51 ± 0,05	4,53 ± 0,01	43,79 ± 0,08
25	5,00	5,08 ± 0,15	5,08 ± 0,15	5,07 ± 0,15	5,10 ± 0,01	44,36 ± 0,08
60	7,74	8,72 ± 0,50	8,72 ± 0,50	8,60 ± 0,44	8,83 ± 0,01	47,00 ± 0,09

5. AVALIAÇÃO POR EXPERIMENTOS

Com o intuito de avaliar as plataformas e definir os protocolos de aquisição e processamento e análises foram realizados diversos experimentos, para a técnica VMA. Esses experimentos foram realizados em fantasmas *e in vivo*, utilizando diferentes arranjos de excitação magnética e medidas ultrassônicas, conforme descrito a seguir.

Nas medidas foram utilizados fantasmas (simuladores) à base de gelatina animal ou de copolímeros de cadeia saturada (parafina gel).

5.1. Arranjos experimentais

Nos estudos *in vivo* utilizou-se um transdutor endocavitário (EC9-5/10) acoplado no interior de uma bobina de excitação. (Figura 20a). Neste sistema o campo magnético gerado é não homogêneo e, para frequência de excitação de 35 Hz, possui um gradiente axial de aproximadamente $0,2 \text{ T.m}^{-1}$ a 20 mm da bobina de excitação, [30].

Nas medidas em fantasmas, o transdutor ultrassônico foi posicionado paralelamente e perpendicularmente à direção do campo e magnetização, conforme está ilustrado na Figura 20b e Figura 20c. No centro da bobina de excitação magnética foi acoplado um núcleo de ferrite como concentrador de campo magnético para ampliar a concentração de linhas de campo em uma pequena região de interesse e, conseqüentemente, aumentar o gradiente de campo magnético ao longo do eixo axial ($\frac{\partial B_z}{\partial z}$). Com o aumento do gradiente e do próprio campo magnético em uma pequena região, tem-se um aumento da intensidade da força magnética gerada (Equação (4)).

(a)

(b)

(c)

Figura 20: (a) Sistema VMA com transdutor endocavitário (EC9-5/10) fixado no centro da bobina de magnetização. (b) bobina com concentrador de campo e um transdutor ultrassônico (L14-5/38) posicionado paralelamente e (c) perpendicular à direção do campo magnético axial.

O sistema da Figura 20b-c permite que o transdutor ultrassônico seja posicionado em diferentes regiões de interesse.

5.1.1. Caracterização da força magnética a partir de medidas de campo magnético

A bobina utilizada nos teste *in vivo*, com o transdutor ultrassônico posicionado no centro foi caracterizado por Bruno *et al*, [30]. O perfil do campo magnético axial da bobina com o concentrador de fluxo foi avaliado para uma faixa de frequência entre 50 e 250 Hz a uma distancia de 1 mm da extremidade do concentrador de fluxo.

As bobinas foram energizadas usando um gerador de função (Agilent, 33522A) e um amplificador de potência (Ciclotron, 20000 Ω 2 H). Na Figura 21 é ilustrada a tensão de saída em função da frequência do sinal configurado no gerador para a condição de um campo magnético fixo de 300 mT em uma região a 1,0 mm da extremidade do concentrador de campo magnético. O ganho do amplificador de áudio foi mantido fixo em 90 dB.

Utilizando o transdutor magnético calibrado em Tesla (TMAG-1T, Globalmag) levantamos a curva de calibração em termos da frequência. A curva foi levantada aumentando a amplitude até que o valor de 300 mT fosse lido no sensor. Na Figura 21 observamos que o sistema VMA mostrado na Figura 20b, responde linearmente para a faixa de frequência de 50 a 250 Hz.

Figura 21: Curva de calibração da bobina de excitação para obter um valor de 300 mT em uma região próxima da bobina.

Observamos na Figura 22a-b o perfil do campo magnético medido (azul) e, calculamos o perfil da força magnética (verde) utilizando a equação (4). A seta indica um transiente em resposta do amplificador no início e uma distorção em termos da amplitude no final do sinal. Este meio ciclo não possui amplitude nem frequência determinada pela entrada (1,45 Vpp @ 100 Hz).

Devido as regiões de transiente apenas o segundo pico do ciclo da força carrega as características de frequência do sinal de entrada (Figura 22a)

Figura 22: A resposta do amplificador ao transiente para (a) 1 ciclo e (b) 3 ciclos. Observa-se um pico indesejado no começo (seta) e a metade final do último ciclo do *burst* de entrada é deformada.

Ainda observamos no espectro, que a força responsável por induzir o movimento no meio possui uma banda de resposta larga (Figura 23), mesmo sendo à entrada do amplificador um sinal senoidal de frequência monocromática, f . Devido à distorção causada pelo amplificador de potência, tendo a bobina como carga, o processo de filtragem (seção 3.4) se faz necessário quando na análise houver dependência na frequência.

Figura 23: Espectro de magnitude do perfil da força magnética para (a) 1 ciclo e (b) 3 ciclos.

Foram feitas medidas de campo magnético a partir de uma posição próxima ao concentrador de campo ao longo de 5,0 x 15,0 mm e, em seguida, foi calculado o gradiente de campo magnético para uma faixa de frequência de 50 até 150 Hz.

Na Figura 24 observa-se que para $f = 100 \text{ Hz}$ em um instante de 10,0 ms ocorre o vale (mínimo) do ciclo de 100 Hz. Neste instante observou-se que a intensidade da

força magnética é limitada na região próxima ao concentrador de campo magnético (Figura 24), pois a intensidade da força é proporcional ao produto do campo magnético pelo gradiente axial (Figura 24).

Figura 24: Campo magnético e gradiente calculado em uma região de 5,0 x 15,0 mm para os instantes (a) 10,0 ms e (b) 20,0 ms.

A análise dos gráficos indica que a região de 5,0 x 5,0 mm, próxima ao concentrador é a melhor região para avaliar o máximo deslocamento mecânico do meio material, pois a força magnética de maior intensidade está confinada nessa região.

Porém esta região deve ser excluída para processamento e análise de movimentos de ondas sísmicas. Esta abordagem é similar na técnica ARFI, [3], na qual há uma região de excitação (ROE), que é excluída para obtenção de velocidade e atenuação. A Figura 25a-b mostra o perfil da força magnética ao longo do eixo axial calculado a partir das medidas de campo magnético e do gradiente axial nos instantes 10,0 ms e 20,0 ms, respectivamente.

Figura 25: Perfil da força magnética ponderada na direção axial nos instantes de tempo (a) 10,0 ms e (b) 20,0 ms para um 1 ciclo com frequência de 100 Hz.

5.2. Objetos simuladores de tecidos biológicos.

5.2.1. Gelatina bovina com partículas de ferro.

O procedimento de preparo da base consistiu em misturar gelatina (e.g. 4%, 6% ou 10%) com água ($\rho = 1000 \text{ kg.m}^{-3}$) e aquecer até obter uma mistura homogênea. Após resfriamento até aproximadamente 40°C foram adicionadas nanopartículas de óxido de ferro (Fe_3O_4) fabricada por Nanostructured & Amorphous Materials, Inc com 98% de pureza e partículas com tamanhos entre 20 nm e 30 nm determinando um caráter homogêneo do fantoma ou foi adicionada uma esfera de ferrite que não se misturava com o fantoma.

Os dois modelos foram construídos com uma pequena quantidade de formol, que foi adicionada à mistura para aumentar a durabilidade do fantoma. A mistura foi então colocada lentamente dentro do porta amostras de formato cúbico ($75,0 \times 75,0 \times 75,0 \text{ mm}$). No caso do fantoma com mistura de partículas magnéticas o porta amostra foi fixado em um sistema rotacional (3,0 RPM) e resfriado durante 24h em temperatura de aproximadamente 5°C , para o fantoma com uma única esfera o resfriamento em temperatura ambiente foi suficiente, [31].

5.2.2. Copolímero de cadeia saturada (parafina).

Os mesmos fantasmas descritos acima foram construídos substituindo a base de gelatina por parafina Gel cristalizada ($\rho = 850 \text{ kg.m}^{-3}$), que foi derretida e, em seguida, misturada com pó de vidro (espalhador). Após resfriamento a mistura atingiu a temperatura de 60 °C.

5.3. Quantificação de micro deslocamentos em fantasmas e *in vivo*

5.3.1. Em fantasmas

Por meio da interface VMA-A, o sistema de excitação, que utiliza o transdutor híbrido (Figura 20a), foi programado com uma tensão alternada senoidal com amplitude pico-a-pico $V_{in} = 1.5 V_{pp}$ e frequência $f = 35 \text{ Hz}$. A medida com o ultrassom pulso-eco foi configurado para uma amostragem $f_{ps} = 2500 \text{ Hz}$ para uma profundidade $r = 40,0 \text{ mm}$.

Após aquisição, os mapas de RF foram processados em mapas de velocidade utilizando a interface VMA-P com janelas de 2,0 mm e 50% de sobreposição.

Observamos na Figura 26a uma imagem modo B do fantoma de parafina Gel com uma inclusão esférica de ferrita de 5,0 mm de diâmetro (seta). A taxa de deslocamento induzido no alvo foi quantificada escolhendo-se, a partir do mapa de velocidade (Figura 26b), uma região de interesse (paralelograma vermelho). Na Figura 27a observamos a velocidade do movimento induzido dentro da ROI (Figura 26b) e na Figura 27b o espectro.

Figura 26: (a) Modo B do experimento utilizando o fantoma de gelatina com esfera de ferrita de 7 mm e (b) mapa de velocidade obtido no instante 22,5 ms.

Figura 27: (a) Deslocamento induzido ao longo do tempo e (b) espectro do deslocamento.

Embora o mapa da Figura 26b esteja apresentando um alto nível de ruído (por exemplo, posição axial 30,0 mm e lateral -20,0 mm), os resultados da análise do movimento em mapas de velocidade foram condizentes com o descrito pela [Equação (4)], pois possuía frequência de 70 Hz, assim, as plataformas propiciaram valores quantitativos de velocidade do movimento induzido nas estruturas do meio.

5.3.2. *In vivo*

A mesma configuração foi utilizada na plataforma de aquisição e processamento em conjunto ao trabalho de doutorado do grupo GIIMUS (Bruno, A.C.), [32], que foi autorizado pelo comitê de ética da USP-RP (10.1.451.53.5), para trabalhar com roedores (Figura 28).

Figura 28: Mensuração do deslocamento induzido pelo material magnético no estômago de roedores.

O experimento consistiu em utilizar o protocolo de VMA para estimar quantitativamente o deslocamento induzido de partículas ferromagnéticas sob a ação de uma força magnética externa, após a administração por gavagem, que consiste em um método de introdução de alimentos líquidos no estômago através de um tubo pela boca. Foram administrados 4,0 ml de uma mistura de partículas de ferrita (37 e 70nm; TH 50, Thornton Eletrônica, Vinhedo, SP, Brasil) misturado com iogurte de chocolate (Chandelle, Nestle SA, Vevey, Suíça) a uma concentração de 10% em massa no estômago do roedor (*Wistar*) com 0,5 kg de massa.

O roedor esteve em jejum de 12 horas com acesso a água e passou por um processo de tricotomia, esteve vivo durante todo o experimento, apenas foi administrada uma pequena quantidade de sedativo. O ensaio durou aproximadamente 15 minutos e foi conduzido utilizando o sistema de excitação e aquisição apresentado na Figura 20a, em que o transdutor endocavitário foi posicionado no interior da bobina, posteriormente o roedor foi entregue vivo ao biotério.

O campo magnético oscilatório ($f = 35 \text{ Hz}$) aplicado na região do estômago do rato foi de 7 mT em 50 mm de profundidade, [33]. Os mapas de ecos foram adquiridos com uma taxa de 2500 Hz para uma profundidade de $r = 40 \text{ mm}$, contendo a região do estômago do roedor. A imagem modo B, o mapa de velocidade, o perfil ondulatório da região do estômago e o seu espectro estão apresentados na Figura 29a-d.

Figura 29: (a) Modo B e (b) mapa de velocidade no instante 23,20 ms. (c) Análise do deslocamento do estomago do roedor e (d) espectro.

Assim, adotando o mesmo procedimento do experimento em fantasmas, foi possível obter valores quantitativos do movimento induzido *in vivo*, que possuía frequência de 70 Hz. Portanto os testes das plataformas VMA-A e VMA-P para localização e caracterização do movimento induzido por meio de estimativas quantitativas de velocidade no estomago do roedor (seta, Figura 29a-b) foi satisfatório propiciando uma ferramenta refinada de aquisição e processamento para experimentos de localização de partículas magnéticas.

5.4. Propagação de ondas sísmicas em fantasmas.

Observamos nos experimentos anteriores como o movimento de partículas ou inclusões metálicas determinam o movimento das estruturas internas do meio. A seguir mostramos o uso do VMA-A e VMA-P para obter parâmetros viscoelásticos analisando ondas sísmicas.

5.4.1. Avaliação de fantoma de gelatina com inclusão de esfera de ferrita.

Neste experimento (Figura 30a) foi utilizado um fantoma de dimensões $50,0 \times 50,0 \times 10,0 \text{ mm}$ à base de gelatina (4%), que continha uma inclusão ferromagnética esférica sólida de diâmetro $7,0 \text{ mm}$, posicionada a $40,0 \text{ mm}$ de profundidade em relação à face do transdutor ultrassônico (Figura 30a-b). O protocolo de aquisição e excitação foi o pulsado com duração de $50,0 \text{ ms}$, com a bobina e o transdutor ultrassônico posicionados perpendicularmente de acordo com a Figura 30a e configurados com os seguintes parâmetros: pulso de excitação com 1 ciclo de frequência $f = 100 \text{ Hz}$ para obter 300 mT (Figura 21 e Figura 22) e pulso-eco com resolução temporal $f_{ps} = 2000 \text{ Hz}$ e profundidade $r = 50,0 \text{ mm}$ (Figura 4).

Na Figura 30b observamos um artefato evidente semelhante a uma linha pontilhada na profundidade de 30 mm , isto ocorre devido ao método de formação de feixe acústico por divisão de subsetores, devido à reverberação da interface do fantoma com o aparato de apoio do fantoma.

Figura 30: (a) Sistema VMA com transdutor ultrassônico posicionado em direção perpendicular à direção da força de excitação e (b) modo B.

Processando os mapas de RF com janelas de $1,0 \text{ mm}$ e 70% de sobreposição foi possível observar uma onda sísmica, que se propagava em direção ao transdutor com amplitude de $2 \text{ }\mu\text{m}$ pico-a-pico.

Na Figura 31A é apresentado o gráfico do traço sísmico ao longo do tempo para a posição lateral $1,0 \text{ mm}$. No instante $10,0 \text{ ms}$ há ocorrência de um máximo de aproximadamente $1 \text{ }\mu\text{m}$ e, em seguida, há um mínimo de $-1,0 \text{ }\mu\text{m}$. Embora a amplitude

máxima pico-a-pico seja de apenas 2,0 μm , foi possível observar a propagação da onda sísmica com amplitude negativa gerada pelo movimento da esfera (Figura 31b-d). A linha pontilhada na Figura 31a indica o momento da reflexão da onda sísmica na face do transdutor, ou seja, posição axial 0,0 mm.

Figura 31: (a) Gráfico do deslocamento da onda sísmica gerada a partir do movimento de uma esfera de metal localizada a uma profundidade de 50,0 mm e mapa de deslocamento nos instantes de tempo: (b) 20,0 ms, (c) 21,5 ms e (d) 23,0 ms.

Analisando o espectro da onda sísmica formada obtemos a frequência de centro de gravidade de $f_{cg} = 64 \text{ Hz}$. Utilizando esta frequência, obtemos a atenuação, velocidade de grupo e velocidade de fase (Tabela 5). Durante a análise da onda sísmica observamos a velocidade de grupo (Tabela 5a-c) maior que a velocidade de fase medida no instante 23,0 ms (Tabela 5d). Estes resultados foram obtidos a partir da posição axial 30,0 mm e escolhendo uma trajetória de 4,5 mm com ROI de área 3,5 x 1,0 mm.

Tabela 5: Parâmetros relacionados com as características mecânicas do meio estimados em uma trajetória de 4,50 mm ao longo do eixo axial.

(a) $c_{gmax} (m.s^{-1})$	(b) $c_{gmin} (m.s^{-1})$	(c) $c_{gxc} (m.s^{-1})$	(d) $c_f (m.s^{-1})$	(e) $\alpha_s (Neper.m^{-1})$
$2,03 \pm 0,86$	$2,15 \pm 0,77$	$2,17 \pm 0,89$	$1,85 \pm 0,13$	$121,10 \pm 0,96$

Utilizando o valor médio das estimativas de velocidade de grupo na equação o

(8) $\mu = 3,7 \pm 0,8$ kPa e os valores obtidos de velocidade de fase e a atenuação nas equações (12) e (13), obtemos $\mu_1 = 1,9 \pm 0,7$ kPa e $\mu_2 = 2,2 \pm 0,4$ Pa.s.

5.4.2. Avaliação de fantoma de gelatina com nano partículas homogêneo.

Foi utilizado um fantoma à base de gelatina (10%) com nano partículas (6%) homogeneamente distribuídas e formatado em um volume cúbico de 75,0 x 75,0 x 75,0 mm. A validação do sistema foi realizada usando o sistema da Figura 20b com o transdutor ultrassônico posicionado axialmente à direção da ação da força magnética. O sistema foi configurado com o protocolo VMA em modo pulsado: 1 ciclo, $f = 100$ Hz, $f_{ps} = 2000$ Hz, durante 50,0 ms para uma profundidade de 70,0 mm.

Os gráficos de deslocamento e fase mostrados na Figura 31a-b mostram o pico de máximo deslocamento no instante de 10,0 ms. Observamos a propagação de uma onda cilíndrica com velocidade constante e a perda da amplitude ao longo do espaço (Figura 32a-c), com amplitude máxima em torno de 30,0 μm .

Figura 32: Janela de 25 ms da aquisição (a) mapa de deslocamento obtido para 1 ciclo com frequência de excitação de $f = 100$ Hz e (b) mapa de fase.

A partir dos resultados da caracterização da força (Figura 24b e Figura 24d) determinamos a região de excitação (ROE) como sendo a região compreendida entre ponto inicial de excitação e uma linha distante 10,0 mm (Figura 33). A região da ROE é excluída nas estimativas de velocidade e atenuação, para este tipo de fantoma.

Figura 33: Propagação de onda sísmica obtida experimentalmente nos instantes (a) 10 ms, (b) 12 ms e (c) 15 ms.

Utilizando estes mapas como base e aplicando o mesmo procedimento descrito no Cap. 4, obtivemos os parâmetros que caracterizam a onda sísmica. Escolhemos a janela temporal compreendida entre o instante 8 ms e 18 ms (Figura 34a) e, obtivemos as estimativas de velocidade de grupo e atenuação a partir dos gráficos das Figura 34b-d, utilizando o método *time-to-peak* a partir da profundidade axial 60,0 mm por uma trajetória de 8,75 mm. A partir das curvas mostradas na Figura 35, estimou-se a velocidade de grupo utilizando o método de correlação cruzada.

Figura 34: (a) Traço sísmico obtido de posições diferentes e a janela de análise entre 8,0 a 18,0 ms (pontilhada). (b) Ajuste exponencial da amplitude ao longo da trajetória. Ajustes linear para: os pontos de (c) máximos e (d) mínimos, respectivamente.

O espectro para a análise das velocidades de grupo é largo (aproximadamente 200 Hz) (Figura 35b). Para um tempo ($t = 12,5 \text{ ms}$), escolhido observando empiricamente o momento em que a onda sísmica leva para se propagar até a profundidade ($r = 51,25 \text{ mm}$), obteve-se a mudança de fase ao longo da profundidade ($\frac{\Delta\phi}{\Delta r}$), a partir do mapa de fase (Figura 32b) filtrado para a frequência de centro de gravidade. A partir da regressão linear estimamos a velocidade de fase para um traço sísmico com $f_{cg} = 182 \text{ Hz}$ (Figura 36a-b).

Figura 35: (a) Estimativa de velocidade de grupo utilizando o correlação cruzada de traços sísmicos e (b) espectro da janela temporal.

Figura 36: (a) Velocidade de fase obtida no instante 12,50 ms do mapa de fase e (b) Espectro da onda sísmica filtrado obtida no intervalo de 8,0 a 18,0 ms para estimativas de frequência de pico e frequência de centro de massa.

A partir da utilização do protocolo de VMA-P para análise da onda sísmica neste experimento foi possível calcular a velocidade de grupo, velocidade de fase e a atenuação. Desta forma a caracterização deste tipo de amostra com distribuição homogênea das partículas magnéticas pôde ser feita em aproximadamente 2 minutos. Os valores desses parâmetros da onda sísmica estão mostrados na Tabela 6 e foram obtidos escolhendo uma trajetória de 8,75 mm com ROI de área 2,5 x 1,0 mm.

Tabela 6: Parâmetros da onda sísmica. (a-c) Velocidade de grupo, (d) velocidade de fase e (e) atenuação obtidas em uma trajetória de 8,75 mm ao longo do eixo axial, com valores R^2 maiores que 90%.

(a) $c_{gmax} (m.s^{-1})$	(b) $c_{gmin} (m.s^{-1})$	(c) $c_{gxc} (m.s^{-1})$	(d) $c_f (m.s^{-1})$	(e) $\alpha (Neper.m^{-1})$
$7,64 \pm 2,45$	$7,11 \pm 1,38$	$7,47 \pm 1,78$	$7,36 \pm 0,10$	$31,39 \pm 0,43$

A amplitude da onda sísmica em torno de $30,0 \mu m$ é suficiente para aplicação do algoritmo de *time-to-peak* implementado na plataforma VMA-P. Os parâmetros estimados a partir da plataforma VMA tornam a caracterização visco-elástica do material, equivalente a este tipo de fantoma, imediata. Substituindo estes parâmetros nas equações

(8), (12) e (13) obtivemos $\mu = 58,3 \pm 18,7$ kPa, $\mu_1 = 47,9 \pm 1,16$ kPa e $\mu_2 = 2,40 \pm 0,07$ Pa.s.

5.4.3. Fantomas de copolímeros de cadeia saturada

Este experimento teve como objetivo, observar a passagem da onda sísmica em uma região não homogênea. Para isto, foi utilizado um fantoma à base de parafina gel, com uma inclusão também de parafina gel mais rígida, com 10,0 mm de diâmetro e posicionada em 30,0 mm de profundidade e uma segunda inclusão magnética de 7,0 mm de diâmetro posicionado a 50,0 mm da superfície de contato do transdutor ultrassônico. Este fantoma foi formatado em um paralelepípedo de dimensões (85 x 85 x 40 mm). Nesse caso, a inclusão magnética fornecerá o impulso mecânico quando sob a ação de um pulso magnético externo (Figura 37a).

Figura 37: (a) Sistema VMA com transdutor ultrassônico posicionado em direção perpendicular à direção da força de excitação e (b) modo B de um fantoma com inclusão de maior rigidez em relação à base (seta branca) e uma esfera de metal (seta vermelha).

Neste caso buscou-se avaliar a possibilidade de obtermos valores de velocidade de ondas sísmicas em um meio não homogêneo. Na Figura 38 observamos claramente 3 regiões especificadas com linhas pontilhadas, ordenadas de forma crescente a partir do ponto onde se encontra a esfera de metal: A região 1 de base, que inicia após a inclusão de ferrita compreendida entre os 35,0 e 45,0 mm, depois a região 2 da inclusão rígida entre 22,0 e 35,0 mm e, por fim, uma região 3 de base da face do transdutor em 0,0 mm até a inclusão em 22,0 mm (Figura 38a-b).

Figura 38: Avaliação de movimento induzido por esfera de metal a partir do (a) mapa de deslocamento obtido para 1 ciclo com frequência de excitação de $f = 100$ Hz e (b) mapa de fase.

As estimativas foram realizadas definindo a trajetória de tamanho 5,0 mm e área da ROI de 2,5 x 1,0 mm. A análise do espectro do traço sísmico da região 1 obtivemos $f_{cg} = 70 \text{ Hz}$ e os parâmetros foram estimados no instante 25,0 ms.

A região 2 foi analisada a partir do instante 25,0 ms até o instante 25,5 ms. Observando a Figura 38 percebe-se que dentro da inclusão rígida a onda sísmica se propaga com velocidade superior à encontrada na região 1 e 3, além disso, foi observado que o espectro da onda sísmica também muda entre essas regiões. O valor da frequência de centro de gravidade obtido essa região 2 foi $f_{cg} = 50 \text{ Hz}$ e os parâmetros para esta região foram calculados no instante 25,5 ms.

Tabela 7: Parâmetros da onda sísmica da região 1, 2 e 3. (a-c) Velocidade de grupo, (d) velocidade de fase e (e) atenuação obtidas em trajetória de 5,00 mm ao longo do eixo axial, com valores de R^2 maiores que 90%.

Região	(a) $c_{gmax} (\text{m.s}^{-1})$	(b) $c_{gmin} (\text{m.s}^{-1})$	(c) $c_{gxc} (\text{m.s}^{-1})$	(d) $c_f (\text{m.s}^{-1})$	(e) $\alpha (\text{Neper.m}^{-1})$
1	$3,52 \pm 0,54$	$4,53 \pm 1,07$	$3,92 \pm 0,47$	$4,16 \pm 0,10$	$91,52 \pm 0,33$
2	$21,00 \pm 8,00$	$22,00 \pm 9,00$	$24,00 \pm 8,0$	$23,99 \pm 0,08$	$12,48 \pm 0,33$
3	$1,98 \pm 0,57$	$2,02 \pm 1,01$	$1,95 \pm 0,81$	$1,89 \pm 0,10$	$90,46 \pm 0,07$

O espectro da onda sísmica que entra na região 3 mantém a frequência de centro de gravidade da região 2, assim explicamos o motivo dos valores das velocidades para esta região serem menores. A velocidade de fase nas regiões 1, 2 e 3 foram calculadas após 25,0 ms, 25,5 ms e 32,0 ms, respectivamente. O módulo de cisalhamento μ foi obtido utilizando a equação (8) e aplicando-se o modelo de Voigt para as 3 regiões do fantoma obteve-se os parâmetros visco-elásticos μ_1 e μ_2 sintetizados na Tabela 8.

Conforme esperado e de acordo com o mapa de fase (Figura 38b) as regiões 1 e 3 apresentaram os parâmetros visco-elásticos equivalentes e menor que a da região da inclusão.

Tabela 8: Caracterização visco-elástica de fantoma heterogêneo em termos do modulo elástico e viscoso.

Região	μ (kPa)	μ_1 (kPa)	μ_2 (Pa.s)
1	$14,7 \pm 3,5$	$1,2 \pm 0,31$	$4,55 \pm 1,52$
2	$489,6 \pm 122,0$	$12,3 \pm 3,0$	$35,15 \pm 2,05$
3	$3,0 \pm 0,5$	$1,3 \pm 0,6$	$3,31 \pm 0,61$

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1. Conclusões

Nesse trabalho apresentou-se de forma detalhada as fases de construção de um protocolo de VMA implantado em uma máquina de ultrassom clínico de diagnóstico por imagem, que consistiram na construção e implementação de plataformas de aquisição, processamento e análise de dados. Esta ferramenta permite a medida, de forma quantitativa, do movimento das estruturas internas de tecidos moles marcados com material magnético, induzido por ação de força magnética externa, bem como, a caracterização dos seus parâmetros visco-elásticos. Os resultados dos testes pilotos apresentados nesse trabalho confirma o potencial da técnica bem como a eficiência dessa plataforma para a análise de materiais reológicos.

Esse protocolo de VMA, facilmente configurável e automatizado está permitindo que os projetos do grupo GIIMUS nessa área de atuação possam ser executados com maior flexibilidade, maior eficiência e menor tempo. O paradigma orientado a objeto parte da premissa de participação coletiva e reaproveitamento do código, porém a VMA-A desenvolvida em C++/Qt não obteve participação coletiva no seu desenvolvimento.

A criação de uma plataforma em MATLAB® rodando em um robusto PC (i7 @ 2.80 GHz, 12 GB DDR3, GeForce 660 Ti) externo permitiu uma maior interação no desenvolvimento da plataforma, inclusive o uso de modernas técnicas de processamento utilizando programação paralela disponibilizada pela fabricante do MATLAB®. A Figura 39 mostra o diagrama de funcionalidades obtido da aquisição utilizando o VMA-A (azul) e processamento utilizando o VMA-P (verde).

Figura 39: Diagrama do desenvolvimento do projeto em termos da funcionalidade implementada para aquisição (azul) e processamento (verde).

A construção das plataformas de VMA-A e VMA-P consistiu a principal etapa desse trabalho. No entanto, os vários estudos pilotos realizados permitiram uma caracterização abrangente dessa plataforma operacional de caracterização visco-elástica, que foi flexível para estudos *in vivo* e *in vitro*. Considerando ainda diferentes configurações de amostras com propriedades mecânicas equivalentes aos dos tecidos biológicos.

O protocolo de quantificação idealizado para estimativas de movimento induzido e de velocidade e atenuação de ondas sísmicas da técnica VMA foi estipulado da seguinte forma:

- Feixe acústico pulso-eco com onda plana com frequência entre 5,0 e 10,0 MHz com $\text{fps} = 2000 \text{ Hz}$ e frequência de amostragem de 40 MHz.
- Excitação magnética de pelo menos 300 mT de campo à distância menor que 1 mm da bobina. Burst de 1 a 5 ciclos de excitação senoidal com frequência monocromática (f) variando entre 50 e 125 Hz.
- Tempo de aquisição variando de 50 a 200 ms (tamanho do pacote de dados de 3 a 12 MBytes).

Por fim, o protocolo de processamento utiliza os dados provenientes da aquisição, que foram estruturados em forma de cabeçalho (Figura 40) e transferidos via rede TCP/IP

para uma plataforma de processamento escrita em MATLAB que roda em qualquer computador padrão PC.

Figura 40: Cabeçalho da plataforma de aquisição transferido para a plataforma de processamento via rede.

O movimento oscilatório induzido está numa faixa dinâmica de $50 < f < 150$ Hz e, para este caso, o melhor ajuste de parâmetros para obter mapas com deslocamentos menores que $50,0 \mu\text{m}$ foi utilizar janelas de $1,0 \text{ mm}$ sobrepostas em 70% . Desta forma obtemos $fs_z = 3,40 \text{ px.mm}^{-1}$ e mantemos $fs_x = 3,34 \text{ px.mm}^{-1}$, que estão dentro dos limites de resolução espacial conforme proposto por Righetti *et al* [34]–[36], assim o protocolo de processamento para produção de mapas de deslocamento e velocidade consistiu em especificar os parâmetros de correlação e filtros, de forma que:

- Janela ótima é $1,0 \text{ mm}$ podendo variar entre $1,0$ e $3,0 \text{ mm}$, que ainda são sobrepostas em 70% .
- O numero de pontos ótimo na FFT é de 512 , podendo ser aumentado caso a frequência de amostragem seja superior a 40 MHz , o que pode ser obtido por interpolação.

A análise de atenuação e de ondas sísmicas é variável, pois depende muito do experimento, mas foi observado que não há necessidade de fazer aquisições longas com mais de 5 ciclos, pois o traço sísmico observado possui um espectro banda larga. A partir desta onda sísmica, podemos extrair toda a informação dependente da frequência. Os métodos implementados são sensíveis a 1 ou 2 ciclos de excitação no máximo para obtenção dos parâmetros de caracterização visco elástica.

6.2. Trabalhos futuros

- Estudos de parâmetros visco-elásticos *in vitro* e *in vivo* utilizando essa plataforma de VMA desenvolvida nesse trabalho;
- Implementação de novos métodos de análise dedicados a arranjos experimentais a serem construídos em projetos futuros envolvendo a técnica de VMA.
- Implementação deste protocolo VMA em outras plataformas de ultrassom com hardware mais robusto.

REFERÊNCIAS

- [1] J. Ophir, S. K. Alam, B. Garra, F. Kallel, E. Konofagou, T. Krouskop, e T. Varghese, “Elastography: ultrasonic estimation and imaging of the elastic properties of tissues”, in *In Proc. Instn. Mech. Engrs., Part H: Journal of Engineering in Medicine*, 1999, p. 203–233.
- [2] J. Bercoff, S. Chaffai, M. Tanter, L. Sandrin, S. Catheline, M. Fink, J. L. Gennisson, e M. Meunier, “In vivo breast tumor detection using transient elastography”, *Ultrasound Med. Biol.*, vol. 29, nº 10, p. 1387–1396, out. 2003.
- [3] K. Nightingale, “Acoustic Radiation Force Impulse (ARFI) Imaging: a Review”, *Curr. Med. Imaging Rev.*, vol. 7, nº 4, p. 328–339, nov. 2011.
- [4] P. Grasland-Mongrain, S. Catheline, R. Souchon, F. Cartellier, A. Zorgani, S. Montalescot, J.-Y. Chapelon, e C. Lafon, “Imaging of shear waves induced by Lorentz force in soft solids”, in *Ultrasonics Symposium (IUS), 2013 IEEE International*, 2013, p. 1158–1161.
- [5] L. Li, W. Jiang, K. Luo, H. Song, F. Lan, Y. Wu, e Z. Gu, “Superparamagnetic Iron Oxide Nanoparticles as MRI contrast agents for Non-invasive Stem Cell Labeling and Tracking”, *Theranostics*, vol. 3, nº 8, p. 595–615, jul. 2013.
- [6] J. Oh, M. D. Feldman, J. Kim, C. Condit, S. Emelianov, e T. E. Milner, “Detection of magnetic nanoparticles in tissue using magneto-motive ultrasound”, *Nanotechnology*, vol. 17, nº 16, p. 4183, ago. 2006.
- [7] M. Mehrmohammadi, K. Y. Yoon, M. Qu, K. P. Johnston, e S. Y. Emelianov, “Enhanced pulsed magneto-motive ultrasound imaging using superparamagnetic nanoclusters”, *Nanotechnology*, vol. 22, nº 4, p. 045502, jan. 2011.
- [8] I. Z. Nenadic, M. W. Urban, H. Zhao, W. Sanchez, P. E. Morgan, J. E. Greenleaf, e S. Chen, “Application of Attenuation Measuring Ultrasound Shearwave Elastography in 8 Post-Transplant Liver Patients”, in *Ultrasonics Symposium (IUS), 2014 IEEE International*, 2014.
- [9] T. Wilson, J. Zagzebski, T. Varghese, Q. Chen, e M. Rao, “The Ultrasonix 500RP: a commercial ultrasound research interface”, *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, vol. 53, nº 10, p. 1772–1782, out. 2006.
- [10] M. C. Hemmsen, S. I. Nikolov, M. M. Pedersen, M. J. Pihl, M. S. Enevoldsen, J. M. Hansen, e J. A. Jensen, “Implementation of a versatile research data acquisition system using a commercially available medical ultrasound scanner”, *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, vol. 59, nº 7, p. 1487–1499, jul. 2012.
- [11] J. A. Jensen, H. Holten-Lund, R. T. Nilsson, M. Hansen, U. D. Larsen, R. P. Domsten, B. G. Tomov, M. B. Stuart, S. I. Nikolov, M. J. Pihl, Y. Du, J. H. Rasmussen, e M. F. Rasmussen, “SARUS: A synthetic aperture real-time ultrasound system”, *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, vol. 60, nº 9, p. 1838–1852, 2013.
- [12] A. C. Bruno, “Transdutor híbrido para medidas susceptométricas e ultrassônicas simultaneamente”, Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, 2010.
- [13] M. Mehrmohammadi, T.-H. Shin, M. Qu, P. Kruizinga, R. L. Truby, J.-H. Lee, J. Cheon, e S. Y. Emelianov, “In vivo pulsed magneto-motive ultrasound imaging using high-performance magnetoactive contrast nanoagents”, *Nanoscale*, set. 2013.
- [14] Richard S. C. Cobbold, *Foundations of Biomedical Ultrasound*. Oxford University Press, 2006.

- [15] T. Z. Pavan, D. R. T. Sampaio, A. A. O. Carneiro, e D. T. Covas, "Ultrasound-based transient elastography using a magnetic excitation", in *Ultrasonics Symposium (IUS), 2012 IEEE International*, 2012, p. 1846–1849.
- [16] S. Catheline, F. Wu, e M. Fink, "A solution to diffraction biases in sonoelasticity: The acoustic impulse technique", *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 105, n° 5, p. 2941–2950, maio 1999.
- [17] J. Bercoff, M. Tanter, M. Muller, e M. Fink, "The role of viscosity in the impulse diffraction field of elastic waves induced by the acoustic radiation force", *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, vol. 51, n° 11, p. 1523–1536, nov. 2004.
- [18] S. Catheline, J.-L. Gennisson, G. Delon, M. Fink, R. Sinkus, S. Abouelkaram, e J. Culioli, "Measurement of viscoelastic properties of homogeneous soft solid using transient elastography: An inverse problem approach", *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 116, n° 6, p. 3734, 2004.
- [19] H. Zhao, M. Urban, J. Greenleaf, e S. Chen, "Elasticity and viscosity estimation from shear wave velocity and attenuation: A simulation study", in *2010 IEEE Ultrasonics Symposium (IUS)*, 2010, p. 1604–1607.
- [20] J. Kortbek, J. A. Jensen, e K. L. Gammelmark, "Synthetic Aperture Sequential Beamforming", in *IEEE Ultrasonics Symposium, 2008. IUS 2008*, 2008, p. 966–969.
- [21] R. Zahir Azar, A. Baghani, S. E. Salcudean, e R. Rohling, "2-D high-frame-rate dynamic elastography using delay compensated and angularly compounded motion vectors: preliminary results", *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, vol. 57, n° 11, p. 2421–2436, nov. 2010.
- [22] S. Sikdar, R. Managuli, T. Mitake, T. Hayashi, e Y. Kim, "Programmable ultrasound scan conversion on a media-processor-based system", 2001, vol. 4319, p. 699–711.
- [23] R. Zahir-Azar e S. E. Salcudean, "Motion Estimation in Ultrasound Images Using Time Domain Cross Correlation With Prior Estimates", *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, vol. 53, n° 10, p. 1990–2000, 2006.
- [24] F. Viola e W. F. Walker, "A spline-based algorithm for continuous time-delay estimation using sampled data", *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, vol. 52, n° 1, p. 80–93, jan. 2005.
- [25] M. L. Palmeri, M. H. Wang, J. J. Dahl, K. D. Frinkley, e K. R. Nightingale, "Quantifying hepatic shear modulus in vivo using acoustic radiation force", *Ultrasound Med. Biol.*, vol. 34, n° 4, p. 546–558, abr. 2008.
- [26] M. W. Urban e J. F. Greenleaf, "A Kramers-Kronig-based quality factor for shear wave propagation in soft tissue", *Phys. Med. Biol.*, vol. 54, n° 19, p. 5919–5933, out. 2009.
- [27] W. F. Walker e G. E. Trahey, "A fundamental limit on delay estimation using partially correlated speckle signals", *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, vol. 42, n° 2, p. 301–308, mar. 1995.
- [28] S. Parolai, "Determination of dispersive phase velocities by complex seismic trace analysis of surface waves (CASW)", *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, vol. 29, n° 3, p. 517–524, mar. 2009.
- [29] C. Amador, M. W. Urban, S. Chen, Q. Chen, K.-N. An, e J. F. Greenleaf, "Shear elastic modulus estimation from indentation and SDUV on gelatin phantoms", *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, vol. 58, n° 6, p. 1706–1714, jun. 2011.
- [30] A. C. Bruno, O. Baffa, e A. O. Carneiro, "Hybrid system for magnetic and acoustic measurement", *Conf. Proc. Annu. Int. Conf. IEEE Eng. Med. Biol. Soc. IEEE Eng. Med. Biol. Soc. Conf.*, vol. 2009, p. 761–764, 2009.

- [31] T. W. J. Almeida, D. R. T. Sampaio, T. Z. Pavan, e A. A. O. Carneiro, “Medidas quantitativas de viscosidade e elasticidade utilizando a técnica de vibromagnetoacustografia”, *Congr. Bras. FÍSICA MÉDICA 18 SIMPÓSIO INSTRUMENTAÇÃO E IMAGENS MÉDICAS 6 Congr. FÍSICA Apl. Med.* 9, ago. 2013.
- [32] A. Colello Bruno, O. Baffa Filho, A. A. Oliveira Carneiro, e R. B. de Oliveira, “Stomach emptying evaluation by ultrasound and susceptometric measurements with a hybrid transducer”, in *Ultrasonics Symposium (IUS), 2014 IEEE International*, 2014, p. 1869–1872.
- [33] A. Colello Bruno, T. Z. Pavan, O. Baffa, e A. A. Oliveira Carneiro, “A hybrid transducer to magnetically and ultrasonically evaluate magnetic fluids”, *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, vol. 60, nº 9, p. 2004–2012, 2013.
- [34] R. Righetti, J. Ophir, e P. Ktonas, “Axial resolution in elastography”, *Ultrasound Med. Biol.*, vol. 28, nº 1, p. 101–113, jan. 2002.
- [35] R. Righetti, S. Srinivasan, e J. Ophir, “Lateral resolution in elastography”, *Ultrasound Med. Biol.*, vol. 29, nº 5, p. 695–704, maio 2003.
- [36] L. P. Neves, “Otimização do algoritmo de block matching aplicado a estudos elastográficos”, text, Universidade de São Paulo, 2007.
- [37] M. Tanabe, T. Yamamura, K. Okubo, e N. Tagaw, “Tissue Harmonic Imaging with Coded Excitation”, in *Ultrasound Imaging*, M. Tanabe, Org. InTech, 2011.
- [38] U. Techavipoo e T. Varghese, “Improvements in elastographic contrast-to-noise ratio using spatial-angular compounding”, *Ultrasound Med. Biol.*, vol. 31, nº 4, p. 529–536, abr. 2005.
- [39] M. Rao, Q. Chen, H. Shi, e T. Varghese, “Spatial-angular compounding for elastography using beam steering on linear array transducers”, *Med. Phys.*, vol. 33, nº 3, p. 618–626, mar. 2006.

APÊNDICE A – DIAGRAMAS DE CLASSES DA PLATAFORMA DE AQUISIÇÃO

A.1. CLASSE HARDWARE

Com versão de setembro/2014 da classe *Hardware* gerencia-se o buffer utilizando o mecanismo de sinais e entradas do Qt. Dessa forma facilitou-se a maneira de obter o exato momento em que um frame chega ao URI Sonix RP por meio da função *callback*.

O uso do Texo™ requer cuidados para não danificar o Sonix RP. A função da classe *Hardware* conecta de maneira segura o URI e o mantém ligado ou desligado conforme a demanda do usuário.

Esta classe carrega o firmware do Sonix RP e deixa o buffer pronto para uma aquisição. O diagrama UML mostra os métodos de conexão, configuração inicial e o método estático que prepara o buffer do URI.

	Hardware
Atributos	<pre>Q_OBJECT private: texo *tex; bool stateSystem; int frameId; int framesLimit;</pre>
Métodos	<pre>public: hardware(); hardware(int power, double gain, bool state); ~hardware(); bool connectSystem(bool); bool disconnectSystem(bool); void setupSystem(int power, double gain); bool getStateSystem(); int getFrameId(); void setFramesLimit(int max); private: void newBuffer(); static bool newFrame(void * obj, unsigned char * data, int frameId);</pre>
Sinais/Entradas	<pre>public slots: void emitFrame(int id); void emitFrameAddr(unsigned char * data); signals: void frame(const int &); void frameAddr(unsigned char *);</pre>

Diagrama de classe *Hardware*.

A implementação de sinais/entradas nesta classe permitiu o monitoramento em tempo real dos frames recebidos pelo Sonix RP, fazendo uso desse mecanismo associado ao uso de threads pudemos, de maneira simples, obter imagens em tempo real da aquisição, portanto não foi mais necessário utilizar o software comercial da Sonix RP para visualização da imagem, por exemplo, modo B.

A.2. CLASSE CONTROLS

A classe Controls de setembro/2014 é associada ao controle de sincronização. Esta classe foi desenvolvida para ajustar parâmetros como intensidade da força acústica, controle de ganho temporal (TGC), profundidade de aquisição, etc.

A sincronização foi implementada de forma a permitir acesso de outras classes, por exemplo, a classe Funcgen - diagrama na seção A.4 - permitindo sincronizar a emissão acústica com a excitação magnética.

A função de trigger também pode ser implementada manualmente, podendo esta ser utilizada e configurada por linha, frame ou conjunto de frames.

	Controls
Atributos	<pre> public: hardware * ctrl; private: bool stateSystem; float gain; int power; int depth; bool stateProbe; int probe; int probeFreq; int probeSize; bool stateTrigger; int triggerIn; int triggerOut; double prf; </pre>
Métodos	<pre> public: controls(); controls(hardware * hard, int power, double gain ,int depth); ~controls(); void setPower(int); int getPower(); void setGain(float); float getGain(); void setDepth(int); int getDepth(); bool setProbe(int); int getProbe(); int getProbeFreq(); </pre>

	<pre> int getProbeSize(); void ProbeOn(); void ProbeOff(); bool setTrigger(int in, int out); int getTriggerIn(); int getTriggerOut(); void setPRF(double); double getPRF(); </pre>
Sinais/Entradas	

Diagrama da classe Controls.

A.3. CLASSE SEQUENCES

Conforme descrito na metodologia, um frame da técnica VMA é o mapa de RF adquirido com alta resolução temporal, posteriormente concatenado para alta resolução espacial. Ou seja, definidos os parâmetros pela classe Controls, a construção do feixe acústico foi definida utilizando a classe Sequences.

A sequência criada por esta classe é sempre uma variação do algoritmo de formação de feixe acústico, os elementos são ativados de maneira sequencial por subsetor e as linhas de RF do subsetor são adquiridas. A classe foi desenvolvida como um construtor de sequencias e os métodos utilizados para a definição do tipo de sequencia são mostrados no diagrama da classe.

Sequences	
Atributos	<pre> private: texto *seq; // State bool stateSeq; int linesize; //size in bytes of add line int soundSpeed; //soundspeed propagation in medium textoTransmitParams tx; char shape[96]; int txaperture; int txangle; int txfocus; int txfrequency; textoReceiveParams rx; int rxaperture; int rxangle; int rxMaxApDepth; int rxChannelMask; int rxLineDuration; int rxdataType; </pre>
Métodos	<pre> public: sequences(); ~sequences(); </pre>

	<pre> int getLinesize(); void setShapeArray(char *); string getShapeArray(); void setSoundSpeed(int); int getSoundSpeed(); void setAperture(char,int); int getAperture(char); void setAngle(char,int); int getAngle(char); void setFocus(int); int getFocus(); void setMaxApDepth(int); int getMaxApDepth(); void setChannelMask(int); int getChannelMask(); void setLineDuration(int); int getLineDuration(); void setDataTypes(int dataType); int getDataType(); void setTxFreqDefault(); void setTxFreq(float freq); int getTxFreq(); </pre>
Sinais/Entradas	

Diagrama da classe Sequences reduzido a métodos de definição de sequencia.

Após configuradas as definições tradicionais de formação de feixe acústico, foram definidos os parâmetros do subsector. Em seguida, as sequencias são definitivamente enviadas para o URI com os métodos: previewFrameSequence, normalFrameSequence, highFrameSequence ou larissaFrameSequence.

	Sequences
Atributos	<pre> private: //BlockSet int mw; //max num probe elements int w; //block width int a; //number of acquisitions int n; //number of blocks int ei; // 1st element to transduce int ef; // last </pre>
Métodos	<pre> public: // Blockset void setupBlockParms(); void setBlockEi(int); int getBlockEi(); void setBlockEf(int); int getBlockEf(); void setBlockA(int); int getBlockA(); void setBlockN(int); int getBlockN(); void setBlockW(int); int getBlockW(); </pre>

	<pre> int getBlockMW(); float calcEquation(int speed, int depth, int width, float factor); void beginSeq(); void endSeq(); bool statusSequence(); void previewFrameSequence(int depth); void normalFrameSequence(int depth); void highFrameSequence(int depth); void larissaFrameSequence(int depth, int * ensemble); int getColFrames(); int getFrames(); double getFrameSize(); double getFrameRate(); bool saveAquisition(QString,unsigned char *,int,int,int,int); bool saveAquiredData(QString path, QString filename, int * header, int * mheader); </pre>
Sinais/Entradas	

Diagrama da classe Sequences reduzido aos métodos de configuração de subsetores.

Todos os métodos foram desenvolvidos para serem utilizados de maneira exclusiva, não executada ao mesmo tempo, apenas executada sequencialmente. Por exemplo, uma visualização previa seguida de uma aquisição de alta resolução.

Atualmente esta classe está muito extensa e uma possível modificação ou criação de uma nova classe está sendo avaliada para uma futura implementação da plataforma.

A.4. CLASSE FUNCGEN

A classe Funcgen foi desenvolvida como modulo virtual de excitação magnética. O método de excitação explicado na metodologia foi executado utilizando está classe. Os métodos dessa classe têm como finalidade inicializar os outros equipamentos eletrônicos associados ao URI e configurar a sequencia de excitação magnética em sincronia com a aquisição acústica.

O método de trigger foi implementado de forma a funcionar em conjunto com a classe Controls. O controle dos canais de saída do gerador de função também é feito por essa classe, assim como toda a configuração do *preset* magnético.

Funcgen	
Atributos	<pre> private: // preset uFgenPreset ePreset[N_PRESET]; int fgenActualPreset; // func generator </pre>

	Iag3352xPtr fgen; Iag3352xChannelPtr chan1,chan2; BSTR fgenAddress;
Métodos	public: fg33522a(Qobject *parent); ~fg33522a(); void conectar(); void desconectar(); void executar(); bool init(); bool outputOn(Iag3352xChannelPtr channel); bool outputOff(Iag3352xChannelPtr channel); bool triggerSend(Iag3352xChannelPtr channel); bool loadPreset(int presetNum, Iag3352xChannelPtr channel); void setActualPreset(int presetNum); void setFgenPreset(int presetNum, int * parms, float * fparms); void setDefaultPresets(); Iag3352xChannelPtr getChannel(int channel);
Sinais/Slots	

Diagrama da classe Funcgen.

APÊNDICE B – PROTOCOLOS MAGNETO-ACÚSTICOS

Todos os protocolos definidos podem ser configurados utilizando a plataforma de aquisição. Neste apêndice sintetizamos os resultados em forma de tabelas para facilitar sua posterior utilização. Os dois primeiros protocolos discutidos referem-se a aquisições onde as partículas magnéticas estão localizadas em uma determinada profundidade, podendo ser utilizado para avaliação de máximos deslocamentos em meio alvo com inclusões de partículas magnéticas, esferas maciças de magnetos ou para verificação de existência dos mesmos *in vivo*.

As tabelas B1 e B2 sintetizam os resultados obtidos destes testes com estes tipos de protocolos que usam o sistema com o transdutor híbrido.

Tabela B1: Parâmetros acústicos do protocolo para deslocamento induzido e presença de partículas magnéticas.

Acústico	
Profundidade (r)	40,0 ~ 90,0 mm
Foco (f)	40,0 ~ 90,0 mm
Duração por subsetor (τ_{acq})	200,0 ~ 400,0 ms
Frequência do transdutor (f_{us})	7,0 MHz
Frequência de amostragem (fs)	40,0 MHz
Frame rate (f_{ps})	2500 kHz
Subsetor (n)	8 elementos
Bytes por subsetor	12 ~ 24 Mbytes

Tabela B2: Parâmetros magnéticos do preset para descolamento induzido e presença de partículas magnéticas.

Magnético	
Forma de onda	Senoidal
Frequência de excitação (FE)	35 Hz
Amplitude (A)	1,5 Volts
Ciclos	∞
Ganho	90 dB

O *preset* para observação de propagação de ondas sísmicas possuem parâmetros otimizados para este tipo de aquisição. Ressaltamos o foco no infinito que é uma maneira de criar um feixe acústico de onda plana e frequência de excitação magnética variável. Em síntese os parâmetros são mostrados na tabela B3 e B4.

Tabela B3: Parâmetros acústicos do protocolo para observação de ondas sísmicas.

Acústico	
Profundidade (r)	40,0 ~ 85,0 mm
Foco (f)	∞
Duração por subsetor (τ_{acq})	50,0 ~ 200,0 ms
Frequência do transdutor (f_{us})	9,5 MHz
Frequência de amostragem (f_s)	40 MHz
Frame rate (f_{ps})	2000 kHz
Subsetor (n)	4 elementos
Bytes por subsetor	3 ~ 12 Mbytes

Tabela B4: Parâmetros magnéticos do preset para observação de ondas sísmicas.

Magnético	
Forma	Senoidal
Frequência de excitação (FE)	50, 75, 100, 125 Hz
Amplitude	Curva de calibração (figura 21)
Ciclos	1, 2, 3, 4 e 5
Ganho	90 dB

APÊNDICE C – INTERFACE GRÁFICA DE USUÁRIO DA PLATAFORMA DE AQUISIÇÃO (VMA-A)

A VMA-A é responsável pela configuração na formação de feixes acústicos. Neste trabalho exploramos de forma significativa a resolução temporal do feixe (fps). O fps na ordem de 2000 Hz foi suficiente para a técnica VMA. A configuração dos parâmetros do feixe acústico se deu pelo uso de diálogos do VMA-A.

Podemos observar na Figura C1a o dialogo de configuração de feixe de transmissão. Este diálogo solicita ao usuário a configuração do feixe de transmissão com parâmetros como a frequência central do transdutor ultrassônico, e o foco de transmissão, feixe codificado (*Shape*), [37] e *steering* (*Angle*), [38], [39], [21]. Na Figura C1b é mostrado o dialogo de configuração de feixe de recepção com os parâmetros como a mascara para omitir elementos durante a aquisição, numero de canais de recepção, *steering* e profundidade máxima da aquisição.

Figura C1: Diálogos de formação de feixe acústico (a) transmissão e (b) recepção.

Embora alguns desses parâmetros não tenham sido utilizados neste trabalho é evidente o potencial da plataforma, que ainda pode ser explorada em outros trabalhos.

Os diálogos de formação de protocolos são mostrados na Figura C2a-b. Os modos de excitação magnética foram definidos em conjunto com os modos de aquisição acústica. Os modos de aquisição utilizados neste trabalho podem ser encontrados na aba Função→Preset (Figura C2a).

(a)

(b)

Figura C2: Diálogos de configuração de (a) do protocolo de aquisição magneto-acústicos e (b) alta resolução temporal.

Desta forma permitimos aos usuários definições de protocolos variados por meio de parâmetros de controle e modos de excitação arbitrários. Em complemento aos parâmetros de formação de feixe na Figura C2b é mostrado o dialogo de configuração do tamanho do setor de alta resolução temporal e um gráfico semelhante ao da Figura 4, que é utilizado para determinar o tamanho do setor desejado.

APÊNDICE D – INTERFACE GRÁFICA DE USUÁRIO DA PLATAFORMA DE PROCESSAMENTO E ANÁLISE (VMA-P)

A plataforma de processamento e análise (VMA-P) foi desenvolvida em MATLAB®, devido ao alto custo computacional da biblioteca Amplio™, que foi, a princípio, utilizada para fazer processamento dos mapas de RF adquiridos com VMA-A diretamente do URI.

Assim utilizando o MATLAB®, todo o desenvolvimento foi realizado em um PC de configuração i7 @ 2.80 GHz, 12 GB DDR3 e GeForce 660 Ti.

O VMA-P foi desenvolvido com mesmo conceito de *framework* do VMA-A, desta forma a abstração do software representada em forma de diagrama na Figura D1, mostra o esquemático do desenvolvimento do VMA-P (nível mais alto), as abstrações que compõe o software (nível intermediário) e a função desta na plataforma no nível mais baixo.

Figura D1: Diagrama de desenvolvimento do VMA-P [topo (3º nível)], as abstrações principais (2 nível) e as funções (1 nível).

Assim a abstração em 3 etapas realiza todas as tarefas de caracterização de meio mecânicos a partir de uma configuração do operador.

D.1. MODO RF/B

No nível mais à esquerda (Modo RF ou B) fizemos a implementação de um organizador dos dados adquiridos, que ao receber um pacote de dados mostra a imagem em modo B da aquisição em RF (Figura D2).

Figura D2: Entrada e condicionamento de dados RF para definição de área de processamento, aplicação de filtros de RF e formação de imagem em modo B.

Assim, os dados provenientes da aquisição (VMA-A) vêm estruturados do URI por protocolo TCP/IP e, são mantidos no disco rígido. Neste nível é possível selecionar a região de processamento, filtrar os mapas de RF usando filtro gaussiano que, neste caso, é

conhecido como filtro de banda e interpolar o mapa de RF e, se necessário, correção de imagem para scanner convexo.

D.2. MAPAS DE DESLOCAMENTO OU VELOCIDADE

No nível central os dados provenientes do nível mais a esquerda são processados em mapas de deslocamento ou velocidade, permitindo que sejam determinados parâmetros de processamento e filtros para melhor visualização e, caso seja necessário, novamente conversão para transdutor convexo.

Figura D3: Processamento de mapas de RF em mapas de deslocamento ou velocidade a partir de configuração de parâmetros pelo usuário.

D.2.2. Análise de tempo computacional

Nesta fase implementamos com o auxílio do *parallel computing toolbox*, Mathworks, os códigos de processamento para rodar utilizando a placa de aceleração gráfica (GPU). Alguns levantamentos de tempo computacional foram realizados para avaliar o desempenho do GPU com a plataforma VMA-P. Basicamente para este processamento o tempo gasto é determinado pelo tamanho do sinal a ser processado. Portanto quanto maior a janela e maior a sobreposição gastamos mais tempo para processar.

Da forma complexa da correlação cruzada, podemos determinar o número de frequências da transformada de Fourier (FFT), assim determinamos o tamanho final do sinal de correlação (XC_{win}) amostrado no tempo e, neste caso, em todas as aquisições com o VMA-A os dados em formato RF são amostrados em 40 MHz, que é o limite do Sonix RP.

Estamos interessados em avaliar a qualidade do mapa de deslocamento e o custo computacional, então fizemos uso de dois parâmetros relevantes a razão sinal ruído (SNR) e a razão contraste ruído (CNR). De uma avaliação de micro deslocamento *in vivo* marcamos duas regiões, a região vermelha marca a posição do sinal o qual estamos interessados e a região preta marca o fundo da imagem.

Figura D4: Mapa de velocidade marcado com regiões de interesse para análise de SNR e CNR. O quadrado vermelho marca o sinal enquanto o quadrado preto marca o fundo da imagem.

O cálculo dos valores de SNR e CNR são definidos pelas relações estatísticas de cada uma das regiões escolhidas como mostram as equações (D1) e (D2).

$$SNR = \frac{média}{desvio} \quad (D1)$$

$$CNR = \frac{2(média_{sinal} - média_{fundo})^2}{desvio_{sinal}^2 + desvio_{fundo}^2} \quad (D2)$$

Os testes foram realizados variando os tamanhos de janela, as sobreposições e os tamanhos de janela de correlação. A resolução do mapa de deslocamento é importante para a estimativa de parâmetros de ondas sísmicas, portanto mostramos os valores obtidos de SNR e CNR ponderados pela frequência de amostragem axial ou radial (AR), em unidade de $mm.px^{-1}$, dos mapas obtidos.

Já sabemos previamente que quanto maior o número de frequências na FFT mais definição temos no ajuste do pico máximo para estimativa de deslocamento, porém isso aumenta o tempo computacional.

Na Figura D5 observamos que os valores de SNR e CNR para uma janela de correlação maior que 256 são constantes. Partindo deste valor foram realizados testes de tempo de processamento.

Figura D5: Valores normalizados de SNR e CNR ponderados pela frequência de amostragem axial de janelas de tamanho igual a 1,0, 2,0 e 3,0 mm. (a) e (b) mostram os resultados de SNR (c) e (d) os valores de CNR para diferentes valores percentuais de sobreposição.

Na Figura D6 é apresentado os tempos de processamento para diferentes janelas obtidos do processamento de 50 ms de aquisição a um frame rate de 2000 Hz utilizando o CPU (Intel i7@2.80 GHz, 12 GB RAM DDR3) e GPU (GeForce GTX 660 Ti@0.941 GHz, 2 GB DDR4).

Figura D6: (a) Tempos para o CPU. (b) Tempos para o GPU.

Para aquisições de 50 ms consideramos o *tradeoff* entre o tempo de computação e a resolução do mapa obtido e determinamos os melhores parâmetros de processamento como 1.0 mm de janela, 70% de sobreposição e 512 pontos de janela de correlação para processar todos os mapas de RF de tamanho 38 x 70 mm² em menos de 1 minuto.

Mostra-se que aumentar o tamanho da janela de correlação aumenta também o ganho temporal de processamento relativo ao uso do GPU. No entanto, nesse trabalho,

este ganho só seria preciso se tivéssemos adquirido dados com maior frequência de amostragem (i.e. >40 MHz) ou interpolássemos os mapas de RF ao longo da profundidade.

D.3. ANÁLISE DE TRAÇO SÍSMICO

O nível mais à direita foi implementado para fazer análises de ondas sísmicas a partir de mapas de deslocamento ou velocidade. A segmentação é feita por meio de janelas de tempo e regiões de interesse no espaço. Os algoritmos de *time-to-peak*, correlação cruzada, velocidade de fase são configurados a partir de parâmetros na tela. Em seguida, são calculados os coeficientes de elasticidade de viscoelasticidade do alvo.

Figura D7: Análise de traço sísmico usando a plataforma VMA-P