



CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES ACÚSTICAS DE NOVOS  
MATERIAIS VISANDO A CONFECÇÃO DE *PHANTOMS* ULTRASSÔNICOS

Luís Eduardo Maggi

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Biomédica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia Biomédica.

Orientador(es): Wagner Coelho de  
Albuquerque Pereira  
Marco Antônio von Krüger

Rio de Janeiro  
Fevereiro de 2011

CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES ACÚSTICAS DE NOVOS  
MATERIAIS VISANDO A CONFECÇÃO DE *PHANTOMS* ULTRASSÔNICOS

Luís Eduardo Maggi

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ  
COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE)  
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS  
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR  
EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA BIOMÉDICA.

Examinada por:

---

Prof. Wagner Coelho de Albuquerque Pereira, D.Sc.

---

Prof. Marco Antônio von Krüger, Ph.D.

---

Prof. Roberto Macoto Ichinose, D.Sc.

---

Dr. Andre Victor Alvarenga, D.Sc.

---

Prof. Fernando Reizzel Pereira, D.Sc.

---

Prof. Carlos Alther Negreira Casares, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

FEVEREIRO DE 2011

Maggi, Luís Eduardo

Caracterização das propriedades acústicas de novos materiais visando a confecção de *phantoms* ultrassônicos/  
Luís Eduardo Maggi – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2011.

XIX, 117 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Wagner Coelho de Albuquerque Pereira

Marco Antônio von Krüger

Tese (doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Biomédica, 2011.

Referências Bibliográficas: p. 114-117.

1. *Phantoms*. 2. Atenuação. 3. Velocidade longitudinal. I. Pereira, Wagner Coelho de Albuquerque, *et al.*. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Biomédica. III. Título

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

CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES ACÚSTICAS DE NOVOS  
MATERIAIS VISANDO A CONFECÇÃO DE *PHANTOMS* ULTRASSÔNICOS

Luís Eduardo Maggi

Fevereiro/2011

Orientadores: Wagner Coelho de Albuquerque Pereira

Marco Antônio von Krüger

Programa: Engenharia Biomédica

*Phantoms* ultrassônicos são utilizados para mimetizar propriedades acústicas de tecidos biológicos. Vários elementos têm sido usados para fabricar *phantoms*, tais como Agar, gel de álcool polivinílico (PVA) e o gel de poliacrilamida (APA) e que, embora úteis, são instáveis temporalmente. Este trabalho visa caracterizar as propriedades acústicas (velocidade longitudinal, atenuação) de materiais a base de silicone e PVCP, visando à confecção de *phantoms* ultrassônicos que apresentem maior estabilidade ao longo do tempo e resistência ao ataque de agentes microbianos. Pretende-se também, estudar a expressão da incerteza das técnicas de medição dos parâmetros acústicos. Receitas foram testadas com vários materiais adicionados a uma matriz de silicone ou o poli(cloreto de vinila) plastificado (PVCP). A velocidade longitudinal e o coeficiente de atenuação (parâmetros acústicos comuns na caracterização de tecidos) foram estimados, assim como suas incertezas associadas, a partir de dois experimentos básicos: com transdutores em contacto direto e distantes do *phantom*. O primeiro apresentou menor incerteza para a velocidade e o segundo para atenuação. O *phantom* à base de silicone apresentou propriedades similares à gordura e a mistura de PVCP similar ao músculo e tecido biológico médio.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

CHARACTERIZATION OF ACOUSTIC PROPERTIES OF NEW MATERIALS  
INTENDED TO MANUFACTURE ULTRASSONIC PHANTOMS

Luís Eduardo Maggi

February/2010

Advisors: Wagner Coelho de Albuquerque Pereira

Marco Antônio von Krüger

Department: Biomedical Engineering

Ultrasound (US) *phantoms* are used to mimic acoustic properties of human tissue. Several materials have been used to build them: Agar, polyvinyl alcohol gel (PVA) and polyacrylamide gel (PAA). These materials have properties similar to tissues, but are unstable over time. This work intends to characterize the thermo-acoustic properties (longitudinal velocity, attenuation, specific heat and thermal conductivity) of new materials to fabricate ultrasonic phantoms with more time stability and resistance to microorganism agent. Several materials were mixed to a silicone or PVC substrate. The longitudinal velocity and the attenuation coefficient, (common parameters to characterize biological tissues) were estimated with their respective uncertainties, by two basic experiments (with the transducers in direct contact and distant from *phantom*). The first one has shown less uncertainty for velocity and the second one for attenuation measurements. The silicone-based *phantom* is intended to mimic fat and the PVC mixture the muscular and average soft tissues.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b>	<b>4</b>
2.1	GERAIS	4
2.2	ESPECÍFICOS	4
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>5</b>
<b>4</b>	<b>POLÍMEROS</b>	<b>22</b>
4.1	INTRODUÇÃO	22
4.2	SILICONE	24
4.3	PVC e PVCP	26
<b>5</b>	<b>CONFECCÃO DE <i>PHANTOMS</i> POLIMÉRICOS</b>	<b>29</b>
5.1	<i>PHANTOM</i> À BASE DE SILICONE	29
5.2	<i>PHANTOM</i> À BASE DE PVCP	32
<b>6</b>	<b>TÉCNICAS DE AQUISIÇÃO DE SINAIS PARA MEDIÇÃO</b>	<b>35</b>
6.1	PULSO/ECO AFASTADO	36
6.2	PULSO/ECO TOCANDO	38
6.3	TRANSMISSÃO/RECEPÇÃO TOCANDO E AFASTADO	40
<b>7</b>	<b>CÁLCULO DAS PROPRIEDADES</b>	<b>43</b>
7.1	VELOCIDADE LONGITUDINAL	44
7.2	INCERTEZA DA MEDIÇÃO DA VELOCIDADE	45
7.3	IMPEDÂNCIA ACÚSTICA	48
7.4	ATENUAÇÃO E COEFICIENTE DE ATENUAÇÃO	49
7.5	INCERTEZA DA MEDIÇÃO DA ATENUAÇÃO	52
7.6	CALOR ESPECÍFICO	54
7.7	CONDUTIVIDADE TÉRMICA	56

<b>8 SOFTWARE DE AQUISIÇÃO E CÁLCULO DOS PARÂMETROS ACÚSTICOS</b>	<b>58</b>
<b>9 RESULTADOS E DISCUSSÕES SOBRE AS TÉCNICAS DE MEDIÇÃO DA VELOCIDADE E DA ATENUAÇÃO</b>	<b>63</b>
9.1 VELOCIDADE	63
9.2 DISCUSSÃO: TÉCNICAS DE MEDIÇÃO DA VELOCIDADE	67
9.3 ATENUAÇÃO	69
9.4 DISCUSSÃO: TÉCNICAS DE MEDIÇÃO DA ATENUAÇÃO	75
<b>10 RESULTADOS E DISCUSSÕES SOBRE AS PROPRIEDADES ACÚSTICAS DOS PHANTOMS</b>	<b>76</b>
10.1 INTRODUÇÃO	76
10.2 PHANTOMS A BASE DE SILICONE	78
Silicone Puro	79
Silicone + Fluido de Silicone	81
Silicone + Vaselina	84
Silicone + Glicerina	86
10.3 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DOS PHANTOMS DE SILICONE	90
10.4 PHANTOMS A BASE DE PVCP	91
PVCP puro	93
PVCP + Vaselina 5%	96
PVCP Reciclado	97
PVCP + PVC 9%	98
PVCP + glicerina 10%	100
PVCP puro confeccionado pela técnica MAVK	101
10.5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DOS PHANTOMS DE PVCP	105
<b>11 RESULTADOS E DISCUSSÕES SOBRE PROPRIEDADES TÉRMICAS DOS PHANTOMS</b>	<b>106</b>
<b>12 DISCUSSÃO GERAL</b>	<b>108</b>
<b>13 CONCLUSÕES</b>	<b>111</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>114</b>

## DEDICATÓRIA

Dedico essa tese a meu pai, **Genesio Osmani Maggi** por me ensinar o verdadeiro valor do trabalho e do esforço, à minha mãe, **Dinarci Maria de Souza Maggi**, que como professora, soube me mostrar o valor da educação. Dedico também aos meus irmãos, **Genesio Osmani Maggi Filho** e **Priscila de Souza Maggi**, por estarem sempre presentes na minha vida, mesmo nas maiores distâncias. E é claro que não poderia faltar, à minha amada esposa, **Kelly Cristina de Faria Xavier Maggi**, por toda sua compreensão e paciência.



## AGRADECIMENTOS

Agradeço a toda minha família, aos meus pais Genesio Osmani Maggi e Dinarci Maria de Souza Maggi, pela compreensão e carinho, aos meus irmãos, Priscila de Souza Maggi e Genesio Osmani Maggi Filho, pelo companheirismo e pela ajuda no dia-a-dia.

Deixo também toda minha eterna gratidão aos professores e amigos (Wagner Coelho de Albuquerque Pereira, Marco Antônio von Krugüer e Roberto Macoto Ichinose) pelas suas orientações e conselhos, não só para confecção desta tese, mas também para o grande desafio que é a vida. Aos meus amigos e companheiros de sempre (André Victor Alvarenga, Thais Omena, Rejane, Priscila, Isabela, Vinicius, Rodrigo Leite, Ângelo, Daniel, Rodrigo Felix, Cristiane Evelise, Monique, Lorena, Jaqueline, Abílio, Guillermo, Cesar, Aldo, Kelly Zoli). Só conseguia deixar Goiânia, porque sabia que quando chegasse ao Rio de Janeiro, também encontraria uma família.

Agradeço também aos companheiros de luta; Eglacy, Meire Ribeiro, Marlene, Kleber, Wanderley, Nilton, Plínio, Lana e Valcemia por todo apoio que me deram. Sei que um dos meus inúmeros defeitos é a memória, peço então desculpas e compreensão a aqueles cujo nome, eu não pude referenciar, mas que sabem que estarão para sempre no meu coração.

Agradeço a todo pessoal do Programa de Engenharia Biomédica da COPPE/UFRJ pelos grandes serviços prestados, e ao CNPq e Faperj, pelo apoio financeiro, e espero retribuir ao meu país pela oportunidade que me deram.

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Apresentação da tela do software, com a simulação de quatro camadas de tecidos com UST a 1 MHz e 3 W/cm <sup>2</sup> , durante 180 segundos. A linha superior de gráficos apresenta as curvas de queda da intensidade ao longo de cada camada. Os gráficos intermediários representam a quantidade de energia que reside em cada centímetro de tecido de 0,0 a 4.7 W/cm <sup>2</sup> em cada camada, devido à absorção do ultrassom. A última linha de gráficos mostra a distribuição da temperatura gerada devido à absorção da energia que ficou depositada em cada camada em função do tempo de acordo com a modelagem matemática simplificada.....	3
Figura 2. Coeficiente de atenuação em função da frequência de <i>Phantoms</i> de mistura gelatina/água/álcool a 25°C em diferentes proporções de concentração de grafite (A= 0,049 g/cm <sup>3</sup> , B = 0,073 g/cm <sup>3</sup> , C = 0,097 g/cm <sup>3</sup> , D = 0,124 g/cm <sup>3</sup> , E= 0,142 g/cm <sup>3</sup> e F = 0,187 g/cm <sup>3</sup> ) [3].	6
Figura 3. Variação da temperatura em função do tempo ao longo do eixo do feixe do ultrassom focalizado a 6,5, 9,0 e 11,0 cm de profundidade no <i>phantom</i> . O modelo teórico é representado pelas linhas sólidas e o modelo experimental pelos círculos. [18].....	9
Figura 4. Efeito da temperatura na velocidade de propagação (superior) e no coeficiente de atenuação (inferior) dos cinco TMMs. [6] .....	13
Figura 5. (Superior) Variação do coeficiente de atenuação do <i>phantom</i> 10% PVAC em função da frequência ao longo dos ciclos de processo de congelamento/descongelamento. (Inferior) Variação da velocidade de propagação da onda no <i>phantom</i> em função da frequência ao longo dos ciclos de processo de congelamento/descongelamento. ....	16
Figura 6. <i>Phantom</i> gel de Poliacrilamida contendo 30% de clara de ovo submetido à HIFU por 2,5, 15 e 30 segundos. A imagem circular acima, mostra a visão superior das lesões (extraído de Tekegami <i>et al.</i> , 2004) [31]. ....	18
Figura 7. Variação da velocidade de propagação do ultrassom (esquerda) e do coeficiente de atenuação (direita) em função da concentração de cobre. (extraído de Marsili <i>et al.</i> , 2004). ....	20
Figura 8. A) Esquema de cadeia polimérica linear, B) Cadeia polimérica ramificada e C) Cadeia polimérica reticulada.....	23
Figura 9. Molécula de silicone mostrando porção inorgânica e orgânica.....	25
Figura 10. Monômero Cloreto de Vinila e PVC.....	26
Figura 11. (a) Molde para confecção de <i>phantoms</i> . (b) <i>Phantom</i> a base de PVCP com deformação na face superior. ....	33
Figura 12. Diagrama da ramificação das diferentes técnicas testadas.....	35
Figura 13 – Técnica pulso/eco. A) Com <i>phantom</i> (Sinal do <i>phantom</i> – Sp), B) Sem o <i>phantom</i> (Sinal de referência- Sr).....	36
Figura 14. Esquema do método pulso/eco TOCANDO usando o <i>phantom</i> fino e <i>phantom</i> grosso, ou o <i>phantom</i> AB.....	39
Figura 15. Técnica Transmissão/Recepção TOCANDO e AFASTADO.....	40
Figura 16. Montagem experimental Transmissão/recepção com trilhos cruzados. A) Técnica TOCANDO e B) Técnica AFASTADO.....	41
Figura 17. Gráfico da medição da atenuação do silicone RT601 segundo Zell <i>et al.</i> (2007). O círculo chama a atenção para a alta incerteza do valor da atenuação a 4 MHz. ....	43
Figura 18. Curva de regressão potencial (linha de tendência) da atenuação do <i>phantom</i> de silicone puro em função da frequência. O coeficiente de atenuação $A = 1,10 \text{ dB.cm}^{-1}.\text{MHz}^{-1}$ pode ser visto no canto superior esquerdo da figura. ....	51

Figura 19 - Aba FFT do programa AcousticTrans (Labview 2009). No gráfico à esquerda estão os sinais de referência (branco) e do <i>phantom</i> (amarelo). A direita superior, os respectivos módulos das FFTs dos sinais (ordenada arbitrariamente), com o trecho correspondente a -3 dB destacado. ....	59
Figura 20. Tela RMS do software AcousticTrans (Labview 2009). Na parte superior estão os gráficos dos sinais de referência (esquerda) e do <i>phantom</i> (direita). Setas azuis indicam os valores de velocidade determinados usando-se as técnicas <i>PeakDetect</i> e <i>Cross Correlation</i> .....	60
Figura 21. Tela RMS do software AcousticTrans (Labview 2009). Observar cursores livres ativados (CURSOR ON indicado pela seta vermelha) e os cursores marcando o início (vermelho) e final (rosa) do trecho do sinal a ser processado para o cálculo do valor RMS. ....	61
Figura 22. Tela Ua do software AcousticTrans mostrando os valores encontrados para se expressar a incerteza da atenuação.....	62
Figura 23. Fotografia de <i>Phantom 31</i> com suas arestas e dimensões em cm. ....	63
Figura 24. Influência do número de ciclos no espectro de potência. A) Sinais com 05 ciclos, B) sinais com 10 ciclos e C) sinais com 20 ciclos. ....	73
Figura 25. Comportamento térmico da atenuação do <i>phantom</i> nos primeiros 30 minutos após mergulhado no meio (água) com menor temperatura a 19°C.....	74
Figura 26. Organização estrutural dos resultados das propriedades acústicas dos phantoms a base de silicone e PVCP. ....	77
Figura 27. Fotos de <i>phantoms</i> : A- Silicone puro; B, C e D Silicone com 4%, 23% e 40% de fluido de silicone respectivamente, E - Silicone com 23% de vaselina e F - Silicone com 40% de glicerina. ....	79
Figura 28. Atenuação do <i>Phantom 11</i> a 1 MHz por FFT ao longo do tempo. ....	80
Figura 29. Velocidade longitudinal do <i>Phantom 11</i> a 1 MHz por detecção de picos (PD) e Correlação Cruzada (Cross) ao longo do tempo.....	80
Figura 30. Gráfico da atenuação a 1MHz do silicone puro e misturado com óleo de silicone a 4%, 23% e 40% ao longo do tempo. ....	81
Figura 31. Gráfico da atenuação a 1 MHz (FFT e RMS) em função da concentração de fluido de silicone (silicone puro e misturado com óleo de silicone a 4%, 23% e 40%) no dia 16/11/2009.....	82
Figura 32. Coeficiente de atenuação dos phantom ph15 e ph31 a 1 MHz por FFT e RMS. ....	83
Figura 33. Gráfico da velocidade dos <i>Phantoms RTV615</i> puro e com 23% de fluido de silicone pela técnica <i>peak detected</i> (PD) e correlação cruzada (Cross) ao longo do tempo. ....	84
Figura 34. Gráfico da atenuação do <i>phantom Ph12</i> (RTV615+vaselina 23%) em comparação com o Ph11(puro) a 1 MHz ao longo do tempo mensurado.....	85
Figura 35. Gráfico da variação da velocidade longitudinal dos <i>phantoms Ph11</i> (RTV615 puro) e Ph12 (RTV615 + 23% vaselina) ao longo do tempo.....	86
Figura 36. Gráfico da variação da velocidade do <i>phantom ph20</i> (RTV615 + glicerina 33%) e ph11(RTV615) em função do tempo. ....	87
Figura 37. Gráfico da variação da atenuação a 1 MHz do <i>phantom ph20</i> (RTV615 + glicerina 33%) e ph11(RTV615) em função do tempo. ....	87
Figura 38. Gráfico da variação do coeficiente de atenuação em função da frequência do silicone RTV615 puro e misturado com diferentes produtos em determinadas proporções e	

suas respectivas regressões potenciais, No canto superior esquerdo encontram-se os valores $\alpha_0$ e $n$ dos ajustes das equações potenciais (do tipo $Ax^n$ , com $A$ constante). .....	88
Figura 39. Gráfico da variação da velocidade em função da frequência do silicone RTV615 puro e misturado com diferentes produtos em determinadas proporções. ....	89
Figura 40. Fotos de <i>phantoms</i> : A) PVCP puro, B) PVCP + vaselina (5%), C) PVCP reciclado, D) PVCP + PVC (9%), E) PVCP+ glicerina (10%) e F) PVCP pela técnica MAVK. ....	92
Figura 41. Gráfico da variação da atenuação a 1 MHz do <i>phantom</i> ph26 (PVCP puro) em função do tempo pela técnica transmissão/recepção TOCANDO. ....	93
Figura 42. Variação da velocidade longitudinal do <i>phantom</i> de PVCP puro a 1 MHz ao longo do tempo. ....	94
Figura 43. Gráfico da variação do coeficiente de atenuação do <i>phantom</i> de PVCP puro em função da temperatura. ....	95
Figura 44. Gráfico da variação da velocidade do <i>phantom</i> de PVCP puro em função da temperatura. ....	95
Figura 45. Gráfico da variação da atenuação a 1 MHz em função do tempo dos <i>phantom</i> de PVCP + 5% de vaselina comparado com o PVCP puro. ....	96
Figura 46. Gráfico da variação da velocidade a 1MHz em função do tempo dos <i>phantom</i> de PVCP + 5% de vaselina comparado com o PVCP puro ....	96
Figura 47. Gráfico da variação da velocidade longitudinal do <i>phantom</i> de PVCP + 9% de PVC (Ph29) ao longo do tempo comparado com o <i>phantom</i> de PVCP puro por PD. ....	99
Figura 48. Gráfico do comportamento do valor da atenuação em função do tempo após a inserção do <i>phantom</i> de PVCP que estava em temperatura ambiente (25° C) no tanque acústico com água a uma temperatura um inferior (19°C). ....	102
Figura 49. Gráfico do comportamento da velocidade do <i>phantom</i> PVCP puro confeccionado pela técnica MAVK ao longo do tempo assim que é introduzido na água para acomodação térmica medidos pela técnica Transmissão/recepção AFASTADO Peak Detected. ....	103
Figura 50. Gráfico da variação do coeficiente de atenuação em função da frequência do PVCP puro, reciclado e misturado com diferentes produtos em determinadas proporções e suas respectivas regressões potenciais (do tipo $Ax^n$ , com $A$ constante). ....	104
Figura 51. Gráfico da velocidade em função da frequência do PVCP puro, reciclado e misturado com diferentes produtos em determinadas proporções. ....	104
Figura 52. Gráfico da variação do calor específico do PVCP em função da temperatura, utilizando DSC como técnica de medição. ....	107

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1. Faixa de valores das propriedades acústicas e térmicas ideais para a produção de um <i>phantom</i> acústico [6, 10].	2
Tabela 2. Propriedades acústicas e térmicas dos tecidos [11, 12]	2
Tabela 3. Valores das propriedades físicas acústicas dos <i>Phantoms</i> tecido-equivalentes.	7
Tabela 4. Coeficiente de atenuação do material mimetizante em três frequências (incerteza de $\pm 0,05 \text{ dB.cm}^{-1}$ ).	8
Tabela 5. Propriedades ultrassônicas e térmicas do material mimetizante a $22^\circ\text{C}$ .	8
Tabela 6. Comparação das características do osso real e mimetizado [21].	10
Tabela 7. Coeficiente de atenuação, velocidade de propagação dos materiais mimetizantes de tecido. [26]	12
Tabela 8. Propriedades acústicas e elásticas (média $\pm$ desvio-padrão) do PAA sob a forma de gel (ou PAA-gel) para várias concentrações de acrilamida à $25^\circ\text{C}$ [28].	14
Tabela 9. Condutividade térmica $k$ e calor específico $c$ (média $\pm$ desvio-padrão) do PAA-gel para diferentes concentrações de acrilamida.	15
Tabela 10. Propriedades acústicas do gel Poliacrilamida com várias concentrações de clara de ovo [31].	17
Tabela 11. Variação do coeficiente de atenuação em função da concentração de grafite na solução.	19
Tabela 12 – Lista de <i>phantoms</i> à base de silicone, puros ou misturado com substâncias (concentrações) e suas respectivas nomenclaturas adotadas. Os <i>phantoms</i> em negrito foram os selecionados para estudo continuado.	30
Tabela 13 - Processo de determinação da concentração de vaselina no silicone.	31
Tabela 14. Parâmetros utilizados no sistema de excitação do transdutor com a placa MATEC TB1000.	37
Tabela 15. Médias da atenuação pela técnica Transmissão/Recepção TOCANDO do <i>Phantom</i> 11 de silicone puro do dia 09 de novembro de 2009.	51
Tabela 16. Resultados da análise estatística Teste $t$ para duas amostras presumindo variâncias diferentes das medições da velocidade longitudinal pelas técnicas pulso/eco AFASTADO e TOCANDO.	64
Tabela 17. Valor esperado e a incerteza expandida (U) da velocidade de propagação do ultrassom ao longo das arestas A e B do <i>phantom</i> a 1 MHz, 2,25 MHz e 5 MHz.	65
Tabela 18. Valores da incerteza padrão ( $u_i$ ), coeficiente de sensibilidade (c.s.) e a contribuição da incerteza-padrão (C.I.) da velocidade de propagação de uma onda ultrassônica (1 MHz) no <i>phantom</i> (Aresta A), técnica TOCANDO. Cálculo da incerteza expandida (U).	65
Tabela 19. Teste de Dunn aplicado à população da velocidade, com as técnicas AFASTADO e TOCANDO. Rejeita (1) ou não (0) a hipótese nula. $\alpha = 0,0033$ .	66
Tabela 20. Resultados da atenuação do <i>Phantom</i> 31 (silicone + óleo de silicone 40%) pela técnica pulso/eco AFASTADO.	69
Tabela 21. Resultados dos valores de atenuação ( $\text{dB.cm}^{-1}$ ) de 10 testes com <i>Phantom</i> 31 de silicone RTV615 + óleo de silicone 40% a 1 MHz pela técnica pulso/eco TOCANDO.	70

Tabela 22. Resultados da atenuação do <i>Phantom</i> 31 (silicone + óleo de silicone 40%) pela técnica transmissão/recepção TOCANDO, AFASTADO APARENTE e AFASTADO REAL a 1 MHz. ....	71
Tabela 23. Análise da repetitividade entre dois experimentos pela técnica transmissão/recepção AFASTADO APARENTE com 10 ciclos.....	72
Tabela 24. Análise da influencia do número de ciclos na incerteza das medições pela técnica transmissão/recepção AFASTADO APARENTE.....	72
Tabela 25. Teste- <i>F</i> : duas amostras comparando atenuação FFT e RMS usando 20 ciclos pela técnica transmissão/recepção AFASTADO APARENTE.....	74
Tabela 26 - Composições e Espessuras dos <i>Phantoms</i> Analisados. ....	78
Tabela 27. Composições e espessuras dos <i>Phantoms</i> a base de PVCP. ....	91
Tabela 28. Valores referentes à atenuação (FFT e RMS) a 1 MHz, 20 ciclos, do <i>phantom</i> de PVCP puro medidos de acordo com a técnica de transmissão/recepção pelos métodos TOCANDO, AFASTADO APARENTE e AFASTADO REAL. ....	94
Tabela 29. Tabela dos valores medidos de atenuação e velocidade do <i>phantom</i> de PVCP reciclado (ph28) pela técnica Transmissão/Recepção TOCANDO. ....	97
Tabela 30. Valores das propriedades acústicas (atenuação e velocidade) do <i>phantom</i> Ph29 (PVCP + PVC 9%) medidas ao longo do tempo. ....	98
Tabela 31. Valores das propriedades acústicas (atenuação e velocidade) do <i>phantom</i> Ph30 (PVCP + glicerina 10%).....	100
Tabela 32. Valores das propriedades acústicas (atenuação e velocidade) do <i>phantom</i> ph32 (PVCP confeccionado pela técnica MAVK) medidos pelas três diferentes técnicas Transmissão/recepção TOCANDO, AFASTADO APARENTE e AFASTADO REAL.....	101
Tabela 33. Propriedades térmicas do RTV615 de acordo com o documento de descrição técnica fornecida pelo fabricante, do PVCP medidos por DSC e dos tecidos biológicos.....	106
Tabela 35. Propriedades acústicas e térmicas dos tecidos e dos <i>phantoms</i> .....	110

## LISTA DE SIMBOLOS E SIGLAS

$A$	Amplitude no meio (Sinal, RMS ou FFT)
AIUM	<i>American Institute of Ultrasound in Medicine</i>
$A_w$ ou $A_o$	Amplitude na água (Sinal, RMS ou FFT)
BHT	Bioheat transfer
BUA	<i>Broadband ultrasonic attenuation</i>
C.V.	Coefficiente de variação
$C_p$	Capacidade térmica específica
$c_{pa}$	Calor específico do phantom
$c_{ps}$	Calor específico do material de referência
Cross	Correlação cruzada
DOP	Ftalato de di-2 etilhexila
DSC	<i>Differential scanning calorimetry</i>
EDTA	Ácido etilenodiamino tetra-acético
HIFU	<i>High Intensity of Focused Ultrasound</i>
IMA	Instituto de Macromoléculas
$k$	Condutividade térmica
$m_a$	Massa do material de referência
MRC	Material de Referência Certificado
$m_s$	Massas do phantom
$n$	Grau de linearidade
NCRP	<i>National Council on Radiation Protection and Measurements</i>
NEMA	<i>National electrical manufacturers association</i>
PAA	Poliacrilamida
PD	<i>Peak detected</i> ou Detector de picos
$P_o$	Potência inicial
PU	Poliuretano
PVA-C	Polivinílalcool-Criogel
PVC	Policloreto de vinila
PVCP	Policloreto de vinila palstificado (plastisol)
$Q$	Quantidade de calor
$R$	Coefficiente de reflexão
RTV	<i>Room temperature vulcanization</i>
$S$	Área
$S_p$	Sinal do phantom
$S_r$	Sinal de referência
$T$	Temperatura
TMM	<i>Tissues mimicking material</i>

$t_{pha}$	Tempo do pico do sinal do phantom
$t_{ref}$	Tempo do pico do sinal de referência
U	Incerteza
$v$	Velocidade do som
VPO	Velocidade de propagação da onda
$v_w$ ou $v_{ref}$	Velocidade do som na água
X	Constante de difusividade térmica
$x$ ou $d$ ou $D$	Distância percorrida pela onda na amostra ( <i>phantom</i> )
Z	Impedância acústica
$\Delta t$	Intervalo de tempo
$\Delta x$	Diferença entre os lados D e d do phantom
$\alpha$	Coefficiente de Atenuação
$\rho$	Densidade
$\sigma$ ou D.P.	Desvio padrão



## LISTA DE PUBLICAÇÕES E PREMIAÇÕES

### ARTIGOS COMPLETOS PUBLICADOS EM PERIÓDICOS

1. Figueiredo; Costa-Félix; Alvarenga; MAGGI, L. E.; Romeiro. **Estudo de fatores que influenciam o cálculo de incerteza da medição de atenuação em líquidos**. Produto & Produção, v. 11, p. 55-66, 2010.
2. MAGGI, L. E.; PEREIRA, Wagner Coelho de Albuquerque; OMENA, Thaís Pionório; KRÜGER, Marco Antônio von. **Software didático para modelagem do padrão de aquecimento dos tecidos irradiados por ultra-som fisioterapêutico**. Revista Brasileira de Fisioterapia (Online), v. 12, p. 204-214, 2008.

### TRABALHOS COMPLETOS PUBLICADOS EM ANAIS DE CONGRESSOS

1. MAGGI, L. E.; COSTA JUNIOR, J. F.; CORTELA, G.; PEREIRA, Wagner Coelho de Albuquerque; KRÜGER, Marco Antonio von. **Análise de Duas Técnicas de Medição de Velocidade Longitudinal em Phantoms Acústicos**. In: XXII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA BIOMÉDICA, 2010, Tiradentes/MG. XXII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA BIOMÉDICA, 2010.
2. MAGGI, L. E.; Monteiro, E.E. C.; KRÜGER, Marco Antônio von; PEREIRA, Wagner Coelho de Albuquerque. **Development of Silicone-Based Materials for Ultrasound Biological Phantoms**. In: IEEE-2009 International Ultrasonics Symposium, 2009, Rome - ITALY. Proceeding of the IEEE- 2009 International Ultrasonics Symposium. Rome : IEEE, 2009, 2009. v. 1. p. 1962-1965.
3. P. S. Bunn; COSTA, R. M.; MAGGI, L. E.; KRÜGER, Marco Antônio von; PEREIRA, Wagner Coelho de Albuquerque. **Avaliação da Estabilidade de um Phantom com Propriedades Acústicas Similares aos Tecidos Biológicos**. In: XI Congresso Brasileiro de Engenharia Biomédica, 2008, Salvador - BA. Anais do XXI Congresso Brasileiro de Engenharia Biomédica. Salvador : SBEB, 2008, 2008. v. 1. p. 1135-1138.
4. OMENA, Thaís Pionório; MAGGI, L. E.; PEREIRA, Wagner Coelho de Albuquerque; KRÜGER, Marco Antônio von. **Calorímetro Diferencial com Matriz de Termopares Para Análise do Aquecimento Gerado por Ultra-Som**. In: XXI Congresso Brasileiro de Engenharia Biomédica, 2008, Salvador - BA. Anais do XXI Congresso Brasileiro de Engenharia Biomédica. Salvador: SBEB, 2008, 2008. v. 1. p. 1046-1049.
5. COSTA, R. M.; P. S. Bunn; MAGGI, L. E.; KRÜGER, Marco Antônio von; PEREIRA, Wagner Coelho de Albuquerque. **Phantom com Propriedades Termocromáticas Para Visualização da Radiação Gerada por Transdutores Ultra-Sônicos de Fisioterapia**. In: XXI Congresso Brasileiro de Engenharia Biomédica, 2008, Salvador - BA. Anais do XXI Congresso Brasileiro de Engenharia Biomédica. Salvador: SBEB, 2008, 2008. v. 1. p. 1042-1045.
6. MAGGI, L. E.; Monteiro, E. E. C.; LEITE, Rodrigo Bastos; FURTADO, Camila S; KRÜGER, Marco Antônio von; PEREIRA, Wagner Coelho de Albuquerque. **Desenvolvimento de Materiais Mimetizadores das Propriedades Acústicas de Tecidos Biológicos, à Base de Silicose**. In: XXI Congresso Brasileiro de Engenharia Biomédica, 2008, Salvador - BA. Anais do XXI Congresso Brasileiro de Engenharia Biomédica. Salvador : SBEB, 2008., 2008. v. 1. p. 1082-1085.
7. MAGGI, L. E.; Monteiro, E. E. C.; LEITE, Rodrigo Bastos; FURTADO, Camila S; KRÜGER, Marco Antônio von; PEREIRA, Wagner Coelho de Albuquerque. **Desenvolvimento de Materiais Mimetizadores das Propriedades Acústicas de Tecidos Biológicos à Base de Silicose**. In: XXI Congresso Brasileiro de Engenharia Biomédica, 2008, Salvador - BA. Anais do XXI Congresso Brasileiro de Engenharia Biomédica. Salvador: SBEB, 2008., 2008. v. 1. p. 1082-1085.
8. CORTELA, G.; MAGGI, L. E.; NEGREIRA, C. A.; PEREIRA, Wagner Coelho de Albuquerque. **Análisis de la Contribución del Scattering en la Atenuación del**

- Ultrasonido en Phantoms Biológicos.** In: XXI Congresso Brasileiro de Engenharia Biomédica, 2008, Salvador - BA. Anais do XXI Congresso Brasileiro de Engenharia Biomédica. Salvador : SBEB, 2008, 2008. v. 1. p. 555-558.
9. SOUZA, A. B. B.; MAGGI, L. E.; ICHINOSE, R. M.; PEREIRA, Wagner Coelho de Albuquerque; KRÜGER, Marco Antônio von. **Expressão de Incertezas de Medição de Parâmetros Acústicos de Phantoms Ultra-Sônicos.** In: XXI Congresso Brasileiro de Engenharia Biomédica, 2008, Salvador - BA. Anais do XXI Congresso Brasileiro de Engenharia Biomédica. Salvador : SBEB, 2008, 2008. v. 1. p. 1202-1205.
  10. MAGGI, L. E. ; PEREIRA, Wagner Coelho de Albuquerque; KRÜGER, Marco Antônio von ; OMENA, Thaís Pionório. **Modelagem do Padrão de Aquecimento dos Tecidos Irradiados por Ultra-som fisioterápico.** In: XX CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA BIOMÉDICA, 2006, São Pedro - SP. CBEB 2006, 2006. p. 800-803.
  11. MAGGI, L. E.; OMENA, Thaís Pionório; FURTADO, Camila S.; LEITE, Rodrigo Bastos; KRÜGER, Marco Antônio von; PEREIRA, Wagner Coelho de Albuquerque. **ESTIMATIVA DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA A PARTIR DA CURVA DE AQUECIMENTO DE UM PHANTOM IRRADIADO POR ULTRA-SOM.** In: xx CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA BIOMÉDICA, 2006, São Pedro - SP. Anais do XX Congresso Brasileiro de Engenharia Biomédica. Rio de Janeiro : SBEB, 2006. p. 840-842.
  12. MAGGI, L. E.; PEREIRA, Wagner Coelho de Albuquerque. **Software Didático para Auxiliar na Dosagem do Ultra-som Fisioterápico.** In: III Congresso Latino-Americano de Engenharia Biomédica, 2004, João Pessoa - Paraíba. III CLAEB. Rio de Janeiro : SBEB, 2004. v. 5. p. 1631-1634.

#### RESUMOS PUBLICADOS EM ANAIS DE CONGRESSOS

1. MAGGI, L. E.; OMENA, Thaís Pionório; COSTA, R. M.; PEREIRA, Wagner Coelho de Albuquerque; KRÜGER, Marco Antonio von. **ANÁLISE DO PADRÃO DE AQUECIMENTO DE PHANTOM DE GORDURA POR ULTRASSOM TERAPÊUTICO USANDO CÂMERA INFRAVERMELHA.** In: 5º CONGRESSO INTERNACIONAL DE FISIOTERAPIA 2010, FORTALEZA/CE. 5º CONGRESSO INTERNACIONAL DE FISIOTERAPIA, 2010.
2. MAGGI, L. E.; Monteiro, E.E. C.; KRÜGER, Marco Antônio von; PEREIRA, Wagner Coelho de Albuquerque. **Development of Silicon-Based Materials for Ultrasound Biological Phantoms.** In: IEEE - 2009 International Ultrasonic Symposium, 2009, 2009, ROMA - ITALY. Book of Abstracts. Roma : IEEE, 2009., 2009. v. 1. p. 470.
3. OMENA, Thaís Pionório; PEREIRA, Wagner Coelho de Albuquerque; KRÜGER, Marco Antônio von ; MAGGI, L. E.. **Calorimetro diferencial para análise do aquecimento gerado por transdutor ultra-sonico de 1 MHz aplicado em Fisioterapia.** In: I CONGRESSO NACIONAL DE FISIOTERAPIA UFRJ, 2008, RIO DE JANEIRO. I CONAFISIO UFRJ, 2008.
4. MAGGI, L. E.; PEREIRA, Wagner Coelho de Albuquerque; KRÜGER, Marco Antônio von; OMENA, Thaís Pionório. **SOFTWARE DE SIMULAÇÃO DO AQUECIMENTO DOS TECIDOS IRRADIADOS POR ULTRA-SOM FISIOTERAPÊUTICO.** In: III CONGRESSO INTERNACIONAL DE FISIOTERAPIA / I CONGRESSO BRASILEIRO DE FISIOTERAPIA SOCIAL / I MEETING DE EMPREENDEDORISMO EM FISIOTERAPIA, 2007, SALVADOR - BA. Fisioterapia Brasil, Suplemento Especial, maio/junho 2007, n. 3 (Anais do III Congresso Internacional de Fisioterapia, Salvador, 20 - 23 maio/2007), 2007.
5. MAGGI, L. E. ; OMENA, Thaís Pionório ; KRÜGER, Marco Antonio Von ; PEREIRA, Wagner Coelho de Albuquerque . **ANÁLISE DO AQUECIMENTO DE UM MEIO MIMETIZADOR DE TECIDO BIOLÓGICO IRRADIADO POR ULTRA-SOM FISIOTERAPÊUTICO.** In: III CONGRESSO INTERNACIONAL DE FISIOTERAPIA / I MEETING DE EMPREENDEDORISMO EM FISIOTERAPIA / I

CONGRESSO BRASILEIRO DE FISIOTERAPIA SOCIAL, 2007, SALVADOR - BA.  
Fisioterapia Brasil, Suplemento Especial, maio/junho 2007 (Anais do III Congresso  
Internacional de Fisioterapia, Salvador, 20 - 23 maio/2007), 2007.

#### PREMIAÇÕES RELACIONADAS

2009 VOTO DE LOUVOR, COPPE UFRJ.

2008 Jornada Científica do I CONAFISIO UFRJ, UFRJ.

2007 1º LUGAR - PRÊMIO DR CARLOS TRIBUZZI 2007, SOCIEDADE  
BRASILEIRA DE FISIOTERAPIA

## 1 INTRODUÇÃO

*Phantoms* ultrassônicos são corpos de prova utilizados para mimetizar propriedades do tecido biológico tais como velocidade, impedância acústica, coeficiente de atenuação, e possibilitando o estudo da interação do mesmo com o ultrassom [1]. Tecnicamente, podem ser utilizados para as seguintes aplicações: 1 – Calibração de equipamentos de imagem por ultrassom (mimetizam formas e tamanhos de estruturas dos órgãos e permitem avaliar parâmetros como resolução lateral, profundidade de penetração, faixa dinâmica, contraste, entre outros); 2 – Calibração de aparelhos ultrassônicos que avaliam estruturas em movimento como ecocardiograma e Doppler [2] e 3 – Avaliação da distribuição de campos térmico (hipertermia e diatermia).

No caso de *phantoms* para avaliação de imagens médicas, o material mimetizante necessitaria apresentar idealmente os seguintes parâmetros acústicos médios dos tecidos biológicos: velocidade de propagação da onda no meio, coeficiente de atenuação (absorção e espalhamento) e a impedância acústica. Para o estudo de campos térmicos, o material mimetizante deve ainda apresentar propriedades térmicas como calor específico e condutividade térmica, similares aos dos tecidos biológicos.

Vários materiais têm sido estudados buscando as propriedades acústicas ideais para a confecção destes *phantoms* tais como: gelatina [3], Agar [4, 5], poliacrilamida (zerdine) [6], uretanos [7], epóxi [8], entre outros. Geralmente, se faz necessário misturar com esses materiais outras substâncias como cobre, grafite ou pó de PVC em proporções variadas, para atingir a faixa de valores dos parâmetros acústicos e térmicos desejados [9]. Deve-se levar em conta também a estabilidade destes materiais face às oscilações ambientais de temperatura, pressão e umidade, além da resistência ao ataque de bactérias ou fungos [5].

Bacon *et al.* (1980) [10] e Browne *et al.* (2003) [6] recomendam que um *phantom* ultrassônico que mimetize as propriedades acústicas e térmicas médias dos tecidos moles deva apresentar valores conforme a Tabela 1.

Tabela 1. Faixa de valores das propriedades acústicas e térmicas ideais para a produção de um *phantom* acústico [6, 10].

PROPRIEDADES	VALORES DOS TECIDOS MOLES
Condutividade térmica $k$ ( $\text{WK}^{-1}\text{m}^{-1}$ )	0,47 – 0,56
Velocidade do som a 21°C $v$ ( $\text{m.s}^{-1}$ )	1.540 – 1.590
Coefficiente de atenuação $\alpha$ ( $\text{dB.cm}^{-1}\text{MHz}^{-1}$ )	0,5 – 0,7

Entretanto, se a intenção é mimetizar os tecidos individualmente (pele, gordura, músculo e osso), o *phantom* deve ter os valores de suas propriedades de acordo com a Tabela 2.

Tabela 2. Propriedades acústicas e térmicas dos tecidos [11, 12]

TECIDO	Atenuação $\alpha$ ( $\text{dB.cm}^{-1}.\text{MHz}^{-1}$ )	Impedância $Z$ ( $\times 10^6 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ )	Densidade $\rho$ ( $\text{g.cm}^{-3}$ )	Velocidade $v$ ( $\text{J.g}^{-1}.\text{°C}^{-1}$ )	Condutividade
					térmica $k$ ( $\text{W.m}^{-1}.\text{°C}^{-1}$ )
<b>Pele</b>	1,04	1,87	1,20	3,59	0,23
<b>Gordura</b>	0,50	1,37	0,95	2,67	0,19
<b>Músculo</b>	1,50	1,65 – 1,74	1,04	3,64	0,55
<b>Osso</b>	6,51	3,75 – 7,38	1,38 – 1,80	1,25	2,30

O aquecimento gerado pelo ultrassom terapêutico (UST) no tecido esta relacionado com as propriedades acústicas e térmicas deste, bem como intensidade, frequência e forma de onda emitida pelo aparelho. Para se definir o melhor protocolo de tratamento, o fisioterapeuta precisa conhecer o número, a sequência e a espessura das camadas de tecidos a serem irradiados, além das propriedades físicas de cada tecido descritas na Tabela 2. Em relação à fonte de irradiação (aparelho de UST), o profissional deve definir a frequência da onda (1 ou 3 MHz), seu modo de emissão (contínuo ou pulsado), sua intensidade e o tempo do tratamento. Vários modelos matemáticos têm sido implementados para auxiliar a compreensão do comportamento da energia e da temperatura em aplicações de feixes ultrassônicos contínuos [13, 14]. Entretanto, o emprego desses modelos requer, muitas vezes, o conhecimento de matemática avançada, programas (softwares) complexos e inacessíveis para os

profissionais da área de Saúde. Maggi *et al.* (2008) apresentaram um software didático que simula o padrão de aquecimento dos tecidos por uma onda ultrassônica, baseado em uma modelagem matemática simplificada da equação biotérmica (Bioheat Transfer, BHT) [15] [16]. Esta equação descreve o comportamento da temperatura ao longo do tempo, nos tecidos, em diferentes profundidades. O simulador contém parâmetros acústicos e térmicos ajustáveis pelo operador e permite visualizar a evolução da distribuição de energia e da temperatura nos tecidos (pele, gordura, músculo e osso) durante a propagação ultrassônica (Figura 1).

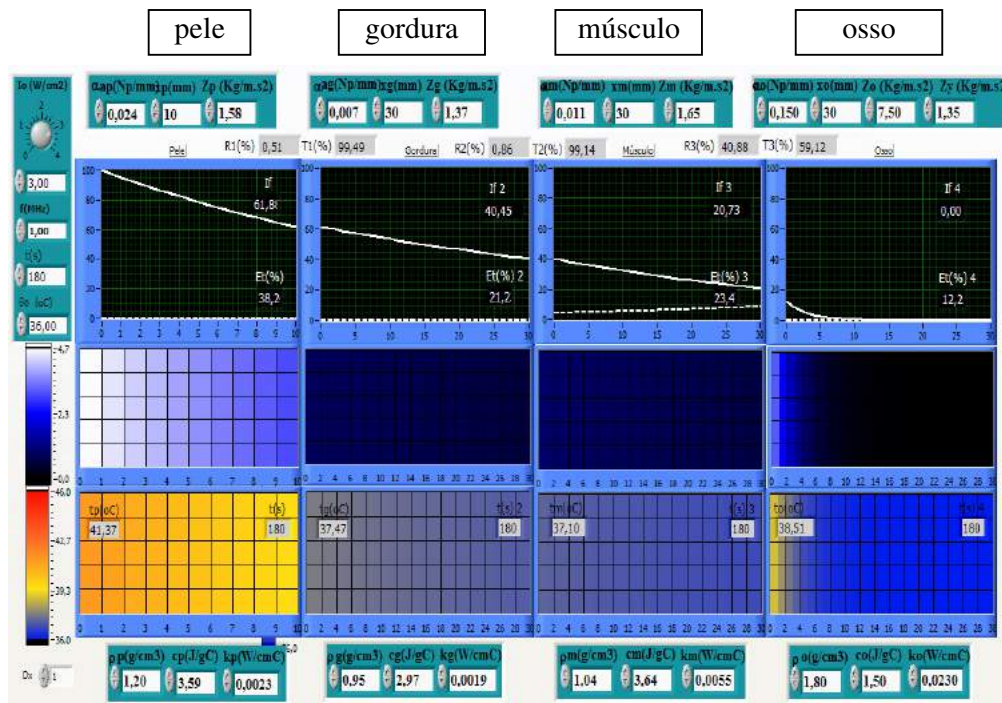


Figura 1. Apresentação da tela do software, com a simulação de quatro camadas de tecidos com UST a 1 MHz e 3 W/cm<sup>2</sup>, durante 180 segundos. A linha superior de gráficos apresenta as curvas de queda da intensidade ao longo de cada camada. Os gráficos intermediários representam a quantidade de energia que reside em cada centímetro de tecido de 0,0 a 4,7 W/cm<sup>2</sup> em cada camada, devido à absorção do ultrassom. A última linha de gráficos mostra a distribuição da temperatura gerada devido à absorção da energia que ficou depositada em cada camada em função do tempo de acordo com a modelagem matemática simplificada.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 GERAIS

O presente trabalho se propõe a caracterizar as propriedades acústicas (velocidade longitudinal, impedância, atenuação) buscando também, quando possível, propriedades térmicas (calor específico e condutividade térmica) de novos materiais, visando à confecção de *phantoms* ultrassônicos que apresentem maior estabilidade ao longo do tempo e resistência ao ataque de agentes microbianos. Pretende-se também, estudar a expressão da incerteza das técnicas de medição dos parâmetros acústicos.

### 2.2 ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- a) Pesquisar novos materiais para produzir *phantoms* que mimetizem diferentes tecidos (pele, gordura e músculo) com propriedades acústicas e térmicas dentro da faixa de valores de interesse.
- b) Testar a repetitividade<sup>1</sup> dos protocolos de fabricação dos *phantoms*.
- c) Analisar a incerteza metrológica de diferentes técnicas de medição das propriedades acústicas (velocidade longitudinal e atenuação).

---

<sup>1</sup> Repetitividade - Condição de **medição** num conjunto de condições, as quais compreendem o mesmo **procedimento de medição**, os mesmos operadores, o mesmo **sistema de medição**, as mesmas condições de operação e o mesmo local, assim como medições repetidas no mesmo objeto ou em objetos similares durante um curto período de tempo. [61]

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Ao longo da história da busca de materiais mimetizantes das propriedades acústicas dos tecidos biológicos, várias substâncias têm sido estudadas. Um polímero utilizado como almofadas para prevenir escaras, comercializado pela 3M (produto não identificado) foi analisado por Madsen *et al.*(1978) [3], e apresentando valores de velocidade de propagação da onda no meio entre  $1468 \text{ m.s}^{-1}$  e  $1524 \text{ m.s}^{-1}$ . Segundo eles, estes valores são aceitáveis para mimetizar a gordura. Como a atenuação aumenta em função da frequência, assumiu-se a equação  $\alpha(f) = \alpha_0.f^n$  para se estimar o valor do coeficiente de atenuação  $\alpha_0$  e  $n$  por meio de ajuste da curva, onde  $n$  indica o grau de linearidade. O coeficiente de atenuação encontrado a  $18,9^\circ\text{C}$  foi de  $0,846 \text{ dB.cm}^{-1}.\text{MHz}^{-1}$ , superior aos valores tabelados para este tecido ( $0,6 \text{ dB.cm}^{-1}.\text{MHz}^{-1}$ ). Além disso, este material não apresentou um grau de espalhamento desejado [3]. Madsen *et al.* [3] também investigaram misturas de gelatina/água/álcool e seus resultados foram coeficientes de atenuação entre  $0,2$  e  $0,3 \text{ dB.cm}^{-1}.\text{MHz}^{-1}$ . Adicionando grafite em pó em diferentes proporções, os autores conseguiram reproduzir valores entre  $0,2$  e  $1,5 \text{ dB.cm}^{-1}.\text{MHz}^{-1}$  (Figura 2). Aparentemente, não houve alterações significativas na velocidade de propagação do som nesses meios em função da concentração de grafite [3, 5].



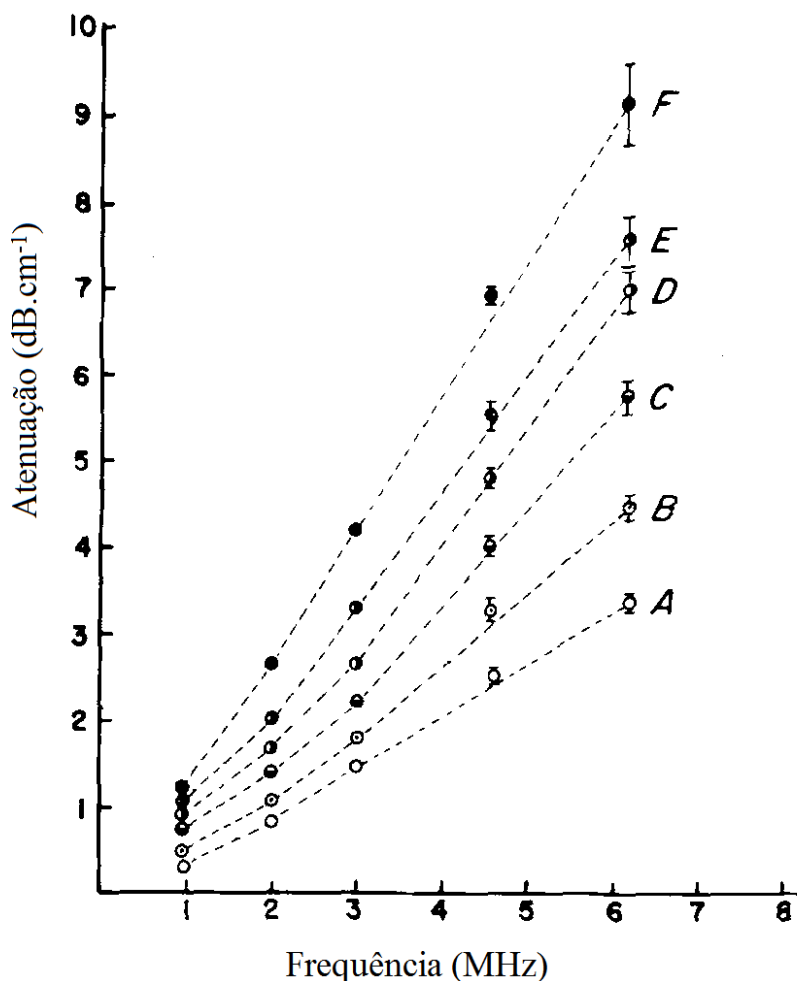


Figura 2. Coeficiente de atenuação em função da frequência de *Phantoms* de mistura gelatina/água/álcool a 25°C em diferentes proporções de concentração de grafite (A= 0,049 g/cm<sup>3</sup>, B = 0,073 g/cm<sup>3</sup>, C = 0,097 g/cm<sup>3</sup>, D = 0,124 g/cm<sup>3</sup>, E= 0,142 g/cm<sup>3</sup> e F = 0,187 g/cm<sup>3</sup>) [3].

Burlew *et al.* (1980) [5] investigaram um gel à base de água derivado de pele de animais e contendo várias concentrações de n-propanol e grafite. Essa mistura exibiu uma textura similar àquela apresentada pelo parênquima tecidual, porém o limite mais baixo para velocidade do som no tecido foi de 1570 m.s<sup>-1</sup> e o ponto de fusão não foi maior que 32,5° C. Eles estudaram também o Agar que além de apresentar um ponto de fusão mais elevado, poderia ter a velocidade variando em torno de 1544 m/s dependendo da proporção de n-propanol. O coeficiente de atenuação apresentou-se proporcional à concentração de grafite e à frequência, variando entre 0,124 a 1,62 dB.cm<sup>-1</sup>MHz<sup>-n</sup>, com n variando de 0,93 a 1,18. Os autores observaram, também,

que a variação do coeficiente de atenuação em função da temperatura foi pequena, assim como a taxa de variação da velocidade em função da temperatura ( $1,7 \text{ m.s}^{-1}.\text{°C}^{-1}$ ).

Madsen *et al.* (1980) [9] utilizaram um gel à base de água e álcool e diferentes concentrações de grafite e gotas de querosene para desenvolver um *phantom* da secção do torso antropomórfico para ultrassom de imagem. O *phantom* deveria mimetizar órgãos e tecidos como fígado, rim, gordura e sangue, além de cisto e tumor. A Tabela 3 apresenta os valores das propriedades físicas dos tecidos equivalentes. Eles puderam observar que alguns valores, como o coeficiente de atenuação, se alteram cerca de 2%, variando a temperatura de 14°C para 30°C.

Tabela 3. Valores das propriedades físicas acústicas dos *Phantoms* tecido-equivalentes.

<b>Tecido Equivalente</b>	$\nu \text{ (m.s}^{-1}\text{)}$	$\rho \text{ (g.cm}^{-3}\text{)}$	$\alpha \text{ (dB.cm}^{-1}\text{MHz}^{-n}\text{)}$	<b>n</b>
<b>Fígado</b>	1.570	1,06	0,70	1,1
<b>Rim</b>	1.570	1,05	0,60	1,1
<b>Gordura</b>	1.460	0,96	0,51	1,0
<b>Sangue</b>	1.570	1,02	0,22	1,1

Madsen *et al.* (1982) continuaram o aprimoramento dos *phantoms* incluindo estudos sobre o espalhamento. Buscando materiais que mimetizassem as propriedades acústicas do fígado, esferas de Agar com diâmetros entre 1,2 a 1,7 mm foram fabricadas e imersas em uma matriz a base de gel pele de animal (*animal hide gel*) e partículas de grafite com 40 a 90  $\mu\text{m}$  de diâmetro com velocidade e densidade maiores [17]. Os resultados encontrados para os coeficientes de retroespalhamento foram semelhantes aos dos tecidos do fígado “in vivo”. Chin *et al.* (1990) aperfeiçoaram a técnica de confecção das esferas de Agar, produzindo-as com diâmetro de 0,3 a 3,6 mm preenchidas com uma solução de n-propano 10% e água 90% [18]. Analisaram amostras deste material quanto às propriedades acústicas e, comparando-as com um modelo matemático para aplicação em hipertermia. As propriedades acústicas obtidas para o material foram: velocidade de propagação entre 1552 e 1556  $\text{m.s}^{-1}$ , a temperaturas de 22 e 27°C, respectivamente. O coeficiente de atenuação medido em três frequências diferentes à temperatura de 22°C e 27°C pode ser visto na Tabela 4.

Tabela 4. Coeficiente de atenuação do material mimetizante em três frequências (incerteza de  $\pm 0,05 \text{ dB.cm}^{-1}$ ).

Frequência (MHz)	22°C $\alpha(\text{dB.cm}^{-1})$	27°C $\alpha(\text{dB.cm}^{-1})$
0,60	0,55	0,55
1,00	0,85	0,84
2,50	1,89	1,96

Os autores estimaram a perda da energia ultrassônica por aquecimento  $\alpha_a$  utilizando a Equação 1:

$$\alpha_a = \frac{\rho \cdot c}{P_o e^{-\alpha D}} \int_s \left( \frac{\partial T}{\partial t} \right) \Big|_o ds \quad \text{Equação 1}$$

onde  $\rho$  e  $c$  são densidade e calor específico respectivamente, e  $P_o$  é a potência inicial aplicada (medida por meio de uma balança), e está em função de coeficiente de atenuação  $\alpha$  e da profundidade  $D$ . O termo entre parênteses é a derivada parcial da temperatura em função do tempo. Os coeficientes de absorção para as frequências 0,525 MHz e 1,060 MHz foram  $0,086 \text{ cm}^{-1}$  e  $0,147 \text{ cm}^{-1}$ . Os valores acústicos e térmicos do *phantom* a 1 MHz e 22°C podem ser vistos na Tabela 5.

Tabela 5. Propriedades ultrassônicas e térmicas do material mimetizante a 22°C.

PROPRIEDADE	VALOR ENCONTRADO
Velocidade	$1552 \pm 2 \text{ m.s}^{-1}$
Coefficiente de atenuação*	$0,196 \pm 0,020 \text{ cm}^{-1}$
Coefficiente de absorção	$0,147 \pm 0,015 \text{ cm}^{-1}$
Condutividade térmica	$0,555 \pm 0,011 \text{ W.m}^{-1}\text{C}^{-1}$
Calor específico	$4,44 \pm 0,13 \text{ J.g}^{-1}\text{C}^{-1}$
Densidade de massa	$1,036 \pm 0,002 \text{ g.cm}^{-3}$

\* O coeficiente de atenuação a 1 MHz relacionado à intensidade.

Com base nesses dados, realizou-se uma simulação utilizando a equação em diferentes profundidades do *phantom* para comparação com os dados coletados da temperatura ao longo do tempo em experimentos reais (Figura 3). Bacon *et al.* (1993) também utilizaram *phantoms* a base de gel e água desenvolvidos por Madsen *et al.*(1982) [17] para comparar resultados experimentais com teóricos da curva de aquecimento. Em média, as previsões teóricas foram 15% maiores do que as medições, utilizando o modelo desenvolvido pelo *National Council on Radiation Protection and Measurements* (NCRP) e 30% inferiores aos valores medidos com base no modelo do

American Institute of Ultrasound in Medicine e o National Electrical Manufacturers Association (AIUM/NEMA) [10].

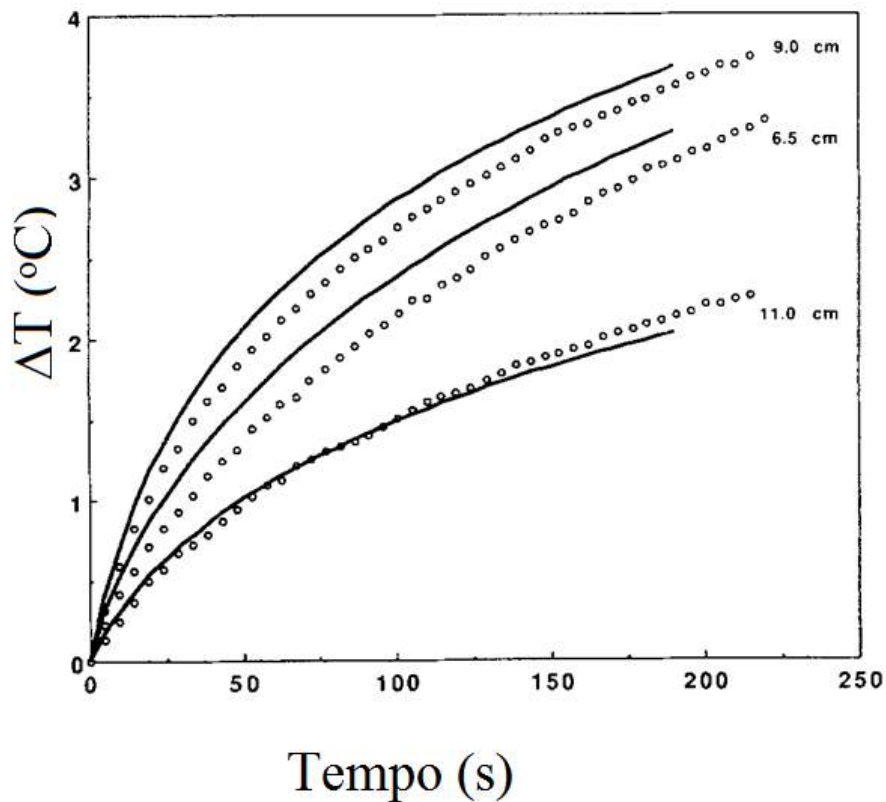


Figura 3. Variação da temperatura em função do tempo ao longo do eixo do feixe do ultrassom focalizado a 6,5, 9,0 e 11,0 cm de profundidade no *phantom*. O modelo teórico é representado pelas linhas sólidas e o modelo experimental pelos círculos. [18]

Madsen *et al.* (1991) [19] implementaram dois *phantoms*, sob a forma de gel, à base de água com pó de grafite e pequenos grânulos de vidro peneirado (75 a 90  $\mu$ m) para simular lesões esféricas com diâmetros de 2,4, 3,0 e 4,0 mm e coeficiente de retroespalhamento de 16, 9 e 6 dB. Os grânulos de vidro foram usados para aproximar o retroespalhamento do *phantom* ao dos tecidos biológicos quando estes apresentam certas lesões.

Clarke *et al.* (1994) [20] também utilizaram resina (epóxi) para produzir *phantoms* que mimetizassem o osso esponjoso humano. Uma mistura de 11 g de gelatina com 150 ml de água em diferentes concentrações foi feita para mimetizar a parte líquida do

osso esponjoso. Depois de enrijecida, ela foi segmentada passando-se duas vezes por uma malha (peneira) para produzir grânulos cúbicos ásperos de 1 mm e estes, por sua vez, foram misturados à solução de epóxi. Assim como nos diversos tipos de ossos do corpo humano, os *phantoms* apresentaram uma porosidade de 10% a 80%. Para a confecção do osso cortical (duro) misturaram-se duas resinas epóxi diferentes (Araldite CW 1302 e Araldite HY 1300), segundo eles, nas proporções recomendadas pelos fabricantes. A velocidade de propagação da onda encontrada estava dentro dos valores apresentados pelo osso, mas o coeficiente de atenuação foi 50% menor. Os resultados obtidos para os parâmetros acústicos do *phantom*, comparados com os valores do tecido biológico, podem ser visto na Tabela 6.

Tabela 6. Comparação das características do osso real e mimetizado [21].

PROPRIEDADES	OSSO MIMETIZADO	OSSO TRABECULAR
Atenuação a 0,5 MHz (dB.cm <sup>-1</sup> )	7,0 – 17,7	6,0 – 16,0 <sup>a</sup>
Velocidade (m.s <sup>-1</sup> )	1.844 – 3.118	1.465 <sup>b</sup> – 2.084 <sup>c</sup>
BUA (dB.MHz <sup>-1</sup> )*	24 – 76	26 – 99 <sup>d</sup>

a) Tavakoli (1991) ; b)Miller et al. (1993); c)McKelvie and Palmer (1987); d)Truscott et al. (1992); \* BUA - *Broadband Ultrasonic Attenuation* (Faixa 500 – 900 kHz e espessura 20 mm).

Lerski et al (1989) desenvolveram um *phantom* utilizando uma espuma reticulada. Entretanto, de acordo com Frayne *et al.* (1993) [21], esse material não foi muito bem aceito por ser difícil de ser moldado no formato desejado. Neste trabalho, foi utilizada poliamida (nylon de linha de pesca) para mimetizar a parede dos vasos sanguíneos. Este material apresentou propriedades semelhantes às dos tecidos biológicos, exceto a impedância acústica que se mostrou muito maior do que a desejada. A alta impedância acústica pode, dependendo do tecido ao redor, promover uma grande reflexão e refração indesejada. Lewis et al (1986) , Boote *et al.* (1988), Deane et al (1991) e Fei *et al.* (1994) apud. Rickey *et al.* (1995) [2] utilizaram borrachas de látex e silicone e encontraram uma impedância acústica próxima à dos vasos humanos, entretanto, esses materiais apresentam um elevado coeficiente de atenuação.

O leite em seu estado natural apresenta um coeficiente de atenuação de 0,35 dB.cm<sup>-1</sup>MHz<sup>-1</sup> e uma velocidade de propagação de 1518 m.s<sup>-1</sup> a uma temperatura de 22°C, valores inferiores aos aceitáveis para mimetizar um tecido biológico. Entretanto, Madsen *et al.* (1998) [22] utilizaram diferentes concentrações de leite

condensado para chegar a uma velocidade  $1540 \text{ m.s}^{-1}$  e uma de atenuação de  $0,5 \text{ dB.cm}^{-1}\text{MHz}^{-1}$ . Todavia, o grau de espalhamento é muito baixo quando esse material se apresenta na forma líquida. Para obter um maior grau de espalhamento os autores testaram *phantoms* de leite em pó misturado com Agar com diferentes concentrações de esferas de vidro, mas, os valores de espalhamento foram inferiores aos desejados.

Bouchard *et al.* (2000) [23] descrevem o material poliacrilamida patenteado por M. B. Zerhouni e M. Rachedine (1998), comumente chamado de Zerdine, para calibração de equipamentos de terapia térmica por ultrassom. Entretanto, Lafon *et al.* 2005 [24] estudaram as propriedades acústicas deste tipo de material. A velocidade acústica e a densidade encontradas para uma concentração de 3%, 5%, 7% e 9% de albumina foram de  $1544 \pm 11 \text{ m.s}^{-1}$  e  $1044 \pm 15 \text{ kg.m}^{-3}$  respectivamente, enquanto a impedância acústica foi de 1,6 MRayls. O coeficiente de atenuação foi aproximadamente linear para a faixa de frequência de 1 a 5 MHz com  $0,009 \text{ Np.cm}^{-1}.\text{MHz}^{-1}$ ,  $0,013 \text{ Np.cm}^{-1}.\text{MHz}^{-1}$ ,  $0,017 \text{ Np.cm}^{-1}.\text{MHz}^{-1}$  e  $0,021 \text{ Np.cm}^{-1}.\text{MHz}^{-1}$  respectivamente. Segundo os autores, significativamente inferior aos valores dos tecidos moles.

Wu (2001) [25] analisou as propriedades acústicas do Tofu (um tipo de alimento a base de soja) para aplicações como tecido mimetizante. A densidade do material foi medida em três regiões (mole, firme e extra-firme) variando de  $1,10$  a  $1,17 \text{ g.cm}^{-3}$ . A velocidade do som no meio ( $v$ ) foi medida por meio da Equação 2:

$$v = \frac{v_w}{1 + v_w (\varphi_t - \varphi_w \pm 2m\pi) / 2\pi f d} \quad \text{Equação 2}$$

onde  $v_w$  é a velocidade do som na água,  $\varphi_w$  e  $\varphi_t$  são as fases da onda na água e no Tofu respectivamente,  $d$  é a espessura do material,  $m$  é um número inteiro relativo a fase do sinal e  $f$  a frequência. Já o coeficiente de atenuação  $\alpha$  foi medido usando-se a Equação 3:

$$\alpha = 8,68. \log_e \left( \frac{T^2 A_w}{A_r} \right)^{2d} \quad \text{Equação 3}$$

onde  $A_w$  e  $A_t$  são as amplitudes das ondas na água e no meio, respectivamente, e  $T$  é o coeficiente de transmissão relacionado com a impedância acústica da água e do Tofu. A velocidade do som no meio variou nas 3 categorias de 1480 a 1490 m.s<sup>-1</sup>, tendo o meio mole apresentado uma velocidade levemente mais alta. Os coeficientes de atenuação encontrados, segundo o autor, têm sido semelhantes àqueles encontrados no cérebro, rim e gordura. Os coeficiente de atenuação para os meios mole, firme e extra-firme foram 0,74, 1,0 e 0,94 dB.cm<sup>-1</sup>.MHz<sup>-1</sup>.

D'Souza *et al.* (2001) [26] produziram um *phantom* para mimetizar a próstata e músculos em diferentes imagens (ultrassom, ressonância magnética e tomografia computadorizada). Os materiais empregados foram; água, Agar, partículas de lipídio, proteínas, cobre, EDTA (Ácido Etilenodiamino Tetra-Acético), partículas de vidro e látex. Para mimetizar a gordura, os pesquisadores utilizaram uma rede de poliuretano na qual foi vertido óleo de girassol. As propriedades acústicas foram medidas à temperatura de 22°C e podem ser vistas na Tabela 7, a seguir.

Tabela 7. Coeficiente de atenuação, velocidade de propagação dos materiais mimetizantes de tecido. [26]

Material	Coeficiente de atenuação (dB.cm <sup>-1</sup> ) Coef. de atenuação ÷ frequência (dB.cm <sup>-1</sup> .MHz <sup>-1</sup> )				Velocidade (m.s <sup>-1</sup> )
	2,5 MHz	4,5 MHz	6,2 MHz	8,0 MHz	
TM próstrata	0,97±0,20 (0,39±0,08)	1.62±0.20 (0.36±0.04)	2.41±0.20 (0.37±0.03)	3.13±0.20 (0.39±0.03)	1537±2
TM músculo	2.25±0.20 (0.9±0.08)	3.48±0.20 (0.77±0.04)	4.61±0.20 (0.71±0.03)	5.92±0.20 (0.74±0.03)	1544±2
TM gordura (óleo +PU)	3.86±0.20 (1.54±0.08)	5.48±0.20 (1.22±0.04)	7.46±0.20 (1.20±0.03)	10.07±0.20 (1.26±0.03)	1468±2

Browne *et al.* (2003) [6] averiguaram as propriedades acústicas dos TMM (*Tissues Mimicking Material*) como Agar, poliacrilamida (zerdine), duas marcas de Gel a Base de Leite Condensado (0,5 e 0,7) e borracha de poliuretano. A velocidade acústica de todos os TMMs testados a 20 °C permaneceu relativamente constante (±3 m.s<sup>-1</sup>) com o aumento da frequência. O coeficiente de atenuação de todos os TMMs aumentou com a elevação da frequência, o maior aumento no coeficiente de atenuação foi observado para a borracha de uretano de 0,43 dB.cm<sup>-1</sup> a 2,25 MHz para 2,53 dB.cm<sup>-1</sup> a 15 MHz. A

borracha de uretano e a poliacrilamida (Zerdine) apresentaram respostas altamente não-linear de atenuação com a frequência de  $f^{1,83}$  e  $f^{1,3}$ , respectivamente, enquanto que as duas marcas de gel a base de leite condensado exibiram respostas ligeiramente não lineares ( $f^{1,1}$  e  $f^{1,08}$ ). O TMM Agar foi o único material que apresentou uma resposta linear de atenuação com a frequência ( $f^{1,01}$ ). Os autores também observaram a variação dos valores de velocidade de propagação e coeficiente de absorção em função da variação da temperatura (Figura 4).

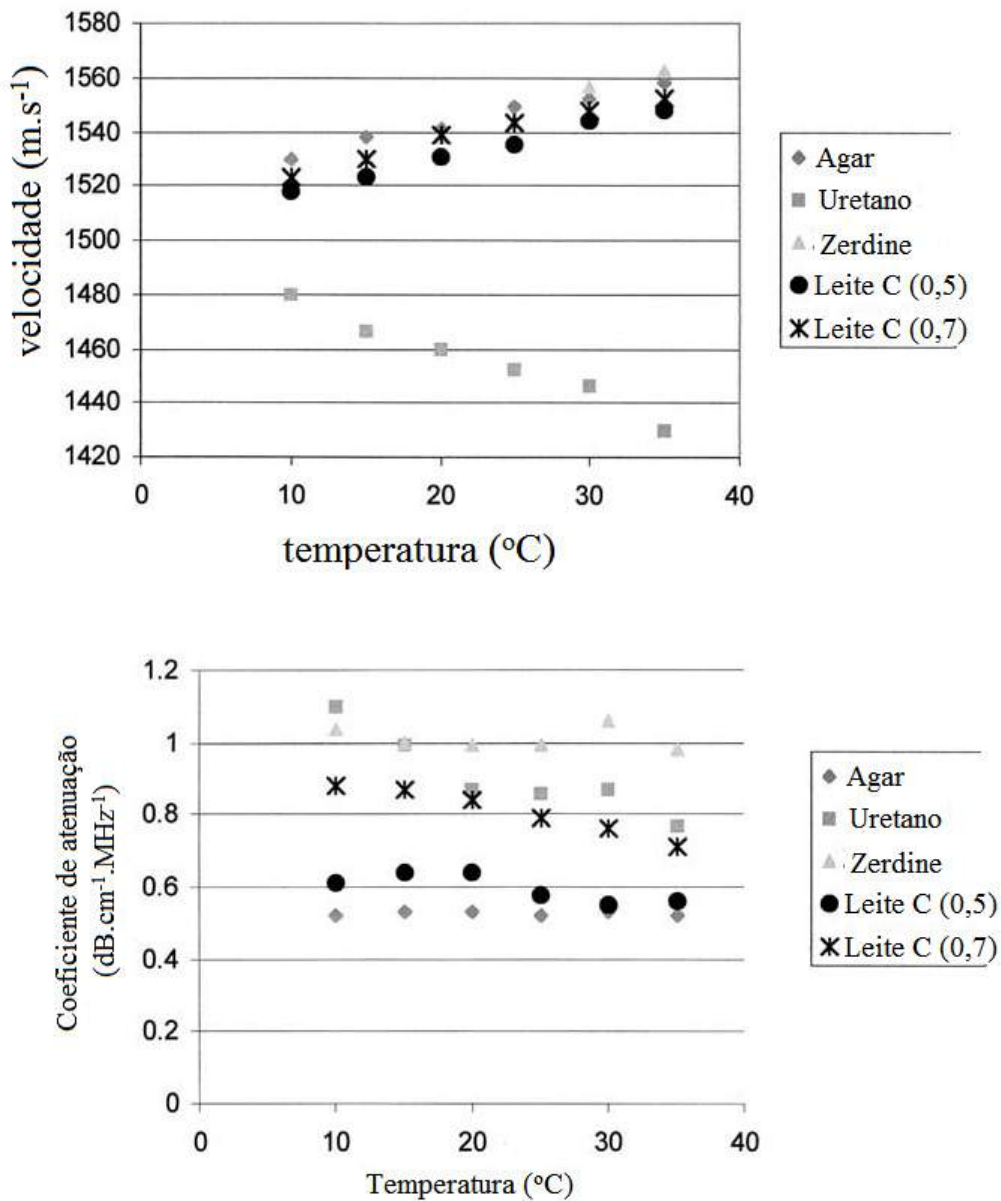


Figura 4. Efeito da temperatura na velocidade de propagação (superior) e no coeficiente de atenuação (inferior) dos cinco TMMs. [6]



Prokop *et al.* (2003) [27] estudaram as propriedades acústicas, elásticas e térmicas de materiais a base de poliacrilamida (PAA) em concentrações que variam de 10% a 20%. Os valores para as propriedades acústicas variaram de acordo com a concentração e podem observados na Tabela 8.

Tabela 8. Propriedades acústicas e elásticas (média  $\pm$  desvio-padrão) do PAA sob a forma de gel (ou PAA-gel) para várias concentrações de acrilamida à 25°C [28].

% de Acrilamida	$\rho$ (g.cm <sup>-3</sup> ) n = 7	$\nu$ (m.s <sup>-1</sup> ) n=7	Z (Mrayl) n=7	$\alpha$ (dB.cm <sup>-1</sup> ) n = 7				
				1 MHz	2 MHz	3 MHz	4 MHz	5 MHz
10%	1.024±0.006	1546±2	1.583±0.008	0.08±0.04	0.12±0.03	0.21±0.03	0.30±0.04	0.44±0.06
12.5%	1.031±0.005	1558±2	1.607±0.008	0.10±0.03	0.18±0.04	0.26±0.04	0.39±0.04	0.52±0.05
15%	1.038±0.004	1568±2	1.628±0.005	0.12±0.03	0.19±0.04	0.33±0.04	0.50±0.04	0.70±0.11
17.5%	1.043±0.005	1582±2	1.649±0.009	0.12±0.05	0.25±0.04	0.38±0.03	0.54±0.04	0.76±0.03
20%	1.052±0.003	1595±2	1.679±0.004	0.14±0.02	0.24±0.05	0.41±0.05	0.65±0.07	0.87±0.04

Os autores desenvolveram uma forma de medir as propriedades térmicas do *phantom* utilizando fio de termopares e empregando a Equação 4 e a Equação 5 para extrair os valores de capacidade térmica específica  $C_p$  (J.kg<sup>-1</sup>.°C<sup>-1</sup>) e condutividade térmica  $k$  (W.m<sup>-1</sup>.°C<sup>-1</sup>).

$$\ln(\Delta T t) = -\frac{r^2}{4Xt} + \ln\left(\frac{Q}{4\pi L\rho C_p X}\right) \quad \text{Equação 4}$$

$$X = \frac{k}{\rho C_p} \quad \text{Equação 5}$$

onde

$\Delta T$  – elevação da temperatura a uma distância radial (°C);

$r$  – distância radial (m) do fio de termopar;

$t$  – tempo (s) depois do aquecimento em que a medida foi feita;

$Q$  – calor (J) total depositado;

$L$  – comprimento (m) do fio do termopar;

$\rho$  – densidade (Kg/m<sup>3</sup>) do gel

$X$  – constante de difusividade térmica (m<sup>2</sup>/s) do gel.

Os valores encontrados para os parâmetros condutividade térmica e calor específico ao longo das variações de concentrações de poliacrilamida podem ser vistos na Tabela 9.

Tabela 9. Condutividade térmica  $k$  e calor específico  $c$  (média  $\pm$  desvio-padrão) do PAA-gel para diferentes concentrações de acrilamida.

Concentração de acrilamida	$k$ (W.m <sup>-1</sup> .°C <sup>-1</sup> )	$c$ (J.kg <sup>-1</sup> .°C <sup>-1</sup> )
10%	0,83 $\pm$ 0,11	6350 $\pm$ 680
15%	0,82 $\pm$ 0,09	6480 $\pm$ 490
20%	0,85 $\pm$ 0,11	6570 $\pm$ 760
Média de todos os dados	0,84 $\pm$ 0,10	6470 $\pm$ 690

Além da utilização de *phantoms* para estudo de imagem e da temperatura, esses materiais também podem ser usados para outras aplicações como estudo da elastografia por ultrassom. Madsen *et al.* (2003) estudaram uma dispersão de óleo em gelatina em diversas concentrações para desenvolver *phantoms* aplicados à elastografia [28]. Eles encontraram uma faixa de constante de elasticidade que pode variar de 100 KPa à 12 KPa e é capaz de se manter estável por meses.

Surry *et al.* (2004) [29] testaram *phantoms* de PoliVinilAlcool-Criogel (PVA-C) aplicados a ultrassom e ressonância magnética. A velocidade de propagação da onda no *phantom*  $v_s$  foi medida empregando a Equação 6:

$$v_s = \frac{v_w}{1 + \Delta t \frac{v_w}{d}} \quad \text{Equação 6}$$

onde  $d$  é a profundidade do *phantom* medida com um paquímetro e  $\Delta t$  é o intervalo de tempo e  $v_w$  é a velocidade de propagação da onda na água pura determinada pela Equação 7, onde  $T$  é a temperatura da água (°C).

$$v_w = 1403 + 5T - 0.06T^2 + 3.0 \times 10^{-4}T^3$$

Equação 7

A medição da atenuação foi feita seguindo o AIUM *Technical Standards Committee* 1995 [30], desde que seja mantida uma distância segura das oscilações do campo próximo e empregando a Equação 8:

$$\alpha = \frac{20}{d} \cdot \log \frac{A_w}{A}$$

Equação 8

onde  $d$  é a espessura da amostra em cm,  $A_w$  é a amplitude do pico da FFT do sinal coletado na água, e  $A$  é a amplitude do pico da FFT do sinal do *phantom*.

No que diz respeito às propriedades acústicas, os autores encontraram uma velocidade de propagação da onda no intervalo de 1520 a 1540  $\text{m.s}^{-1}$ . A faixa de coeficiente de atenuação apresentada pelo material foi de 0,075 a 0,28  $\text{dB.cm}^{-1}\text{MHz}^{-1}$ . Entretanto, estes parâmetros apresentaram uma variação proporcional ao número de vezes em que o *phantom* passava por um processo de congelamento/descongelamento (Figura 5).

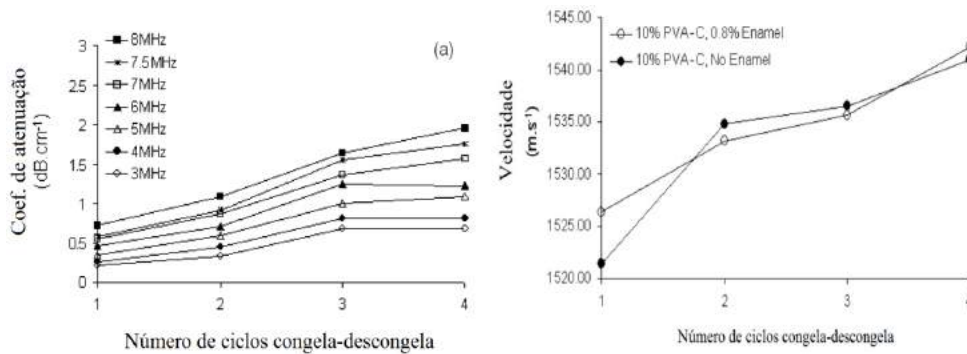


Figura 5. (Superior) Variação do coeficiente de atenuação do *phantom* 10% PVAC em função da frequência ao longo dos ciclos de processo de congelamento/descongelamento. (Inferior) Variação da velocidade de propagação da onda no *phantom* em função da frequência ao longo dos ciclos de processo de congelamento/descongelamento.

Takegami *et al.* (2004) [31] estudaram uma aplicação da poliacrilamida com clara de ovo (que contem uma proteína utilizada como indicador sensível a temperatura) para visualizar regiões lesadas com aplicações de ultrassom de alta intensidade (*High Intensity of Focused Ultrasound – HIFU*). Eles testaram várias concentrações de clara de ovo variando de 0% a 40%. Segundo os autores, concentrações baixas podem apresentar baixa sensibilidade e pouco contraste óptico, enquanto concentrações elevadas resultam em um gel não muito transparente, o que dificulta a visualização da região lesada pelo HIFU. Os valores encontrados para velocidade de propagação e coeficiente de atenuação podem ser vistos na Tabela 10 a seguir.

Tabela 10. Propriedades acústicas do gel Poliacrilamida com várias concentrações de clara de ovo [31].

% de clara de ovo	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	$v$ (m.s <sup>-1</sup> )	$\alpha$ (dB.cm <sup>-1</sup> )			
			1,10 MHz	2,19 MHz	3,34 MHz	5,56 MHz
0%	1,00 ± 0,02	1537 ± 1	0,14 ± 0,04	0,28 ± 0,03	0,41 ± 0,04	0,77 ± 0,05
10%	0,99 ± 0,02	1539 ± 1	0,15 ± 0,05	0,30 ± 0,05	0,48 ± 0,05	0,89 ± 0,04
20%	1,00 ± 0,02	1541 ± 1	0,19 ± 0,05	0,36 ± 0,03	0,59 ± 0,04	1,04 ± 0,05
30%	0,99 ± 0,02	1542 ± 1	0,24 ± 0,02	0,43 ± 0,03	0,66 ± 0,04	1,17 ± 0,03
40%	1,00 ± 0,02	1544 ± 1	0,31 ± 0,03	0,50 ± 0,04	0,76 ± 0,05	1,29 ± 0,05

Após o desenvolvimento e o estudo dos parâmetros acústicos do novo *phantom*, os pesquisadores estudaram o comportamento do gel de poliacrilamida 30% com clara de ovo, empregando um HIFU de 2,19 MHz, uma potência elétrica de 72 W por 2, 5, 15 e 30 segundos. Os resultados podem ser vistos na Figura 6.

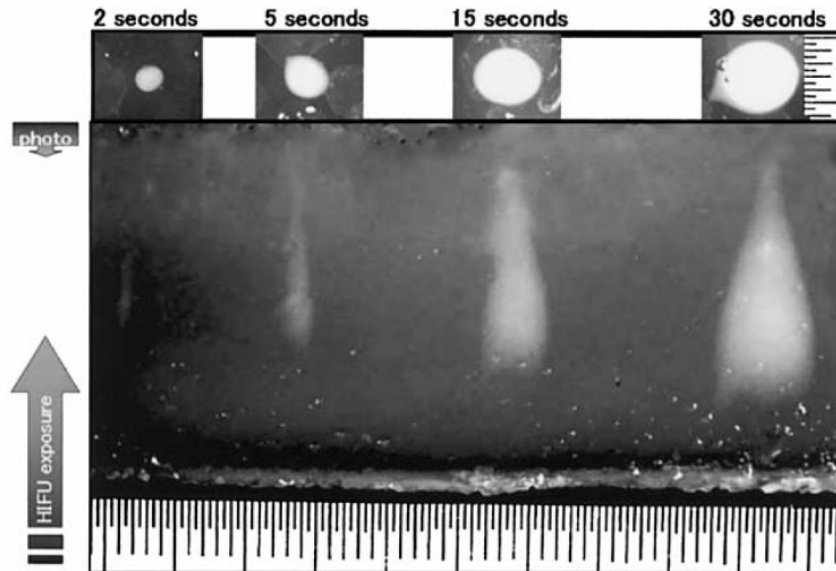


Figura 6. *Phantom* gel de Poliacrilamida contendo 30% de clara de ovo submetido à HIFU por 2,5, 15 e 30 segundos. A imagem circular acima, mostra a visão superior das lesões (extraído de Tekegami *et al.*, 2004) [31].

No Brasil, as pesquisas com *phantoms* ultrassônicos ainda são muito incipientes. Cardona *et al.* (2000) [8] desenvolveram métodos para confecção de *phantoms* ecogênicos para estudar a velocidade de propagação da onda (VPO), usando os ecos retroespalhados. Foram avaliados quatro procedimentos para a construção de *phantoms*, todos eles feitos por camadas: 1- *Phantom* com camadas de materiais diferentes (PVC/acrílico/epóxi). 2- *Phantom* com camadas de epóxi misturado com diferentes quantidades de pó de tungstênio; 3- *Phantom* com camadas de diferentes concentrações de água destilada e etilenoglicol. 4- *Phantom* com camadas de diferentes concentrações de álcool etílico e etilenoglicol. A ecogenicidade dos *phantoms* é obtida acrescentando à mistura micro-partículas de sílica de 0,4 mm de diâmetro. Segundo os autores, o processo de confecção destes *phantoms* era complicado, pois durante o processo de resfriamento, precisavam de constante movimento para manter o material granular e os diversos volumes uniformemente distribuídos.

Os dois primeiros procedimentos não forneceram resultados pretendidos. No primeiro, houve geração de ecos provenientes das interfaces, com amplitude e duração maior do que aqueles provenientes dos espalhadores. No segundo procedimento, a velocidade média do *phantom* foi de  $2.674 \text{ m.s}^{-1}$  ( $\approx 70\%$  acima da média dos tecidos

biológicos). As interfaces não foram detectadas (o que era desejável para a aplicação pretendida) e houve espalhamento devido ao pó de tungstênio. Segundo Cadorna *et al.* (2000), no método que utiliza a gelatina, misturas com maior percentagem de glicol etilênico tendem a absorver água e um *phantom* com estes materiais tenderia a se deformar ao longo do tempo. Os *phantoms* com álcool na mistura podem perdê-lo, se não estiverem apropriadamente selados e armazenados, caso contrário estes *phantoms* podem modificar suas características ultrassônicas rapidamente. O quarto procedimento foi o que teve melhor desempenho. A velocidade de propagação da onda variou de  $1.300 \text{ m.s}^{-1}$  a  $1.700 \text{ m.s}^{-1}$ .

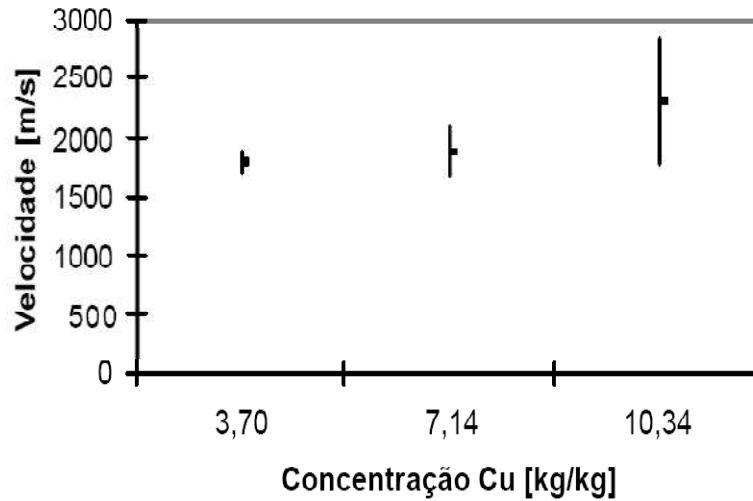
Sato *et al.* (2000) [32] também analisaram como material mimetizador, uma solução de 2,5% de Agar; 11% de glicerina (concentração ideal encontrada para se obter a velocidade de propagação de  $1.540 \text{ m.s}^{-1}$ ), 86,5% de água e  $63,8 \text{ g.l}^{-1}$  de grafite. Como conservantes, foram utilizados os antibióticos: clorafenicol a  $1 \text{ g.l}^{-1}$ , tetraciclina a  $250 \text{ mg.l}^{-1}$ , penicilina G a  $25 \text{ mg.l}^{-1}$ , e os antifúngicos nistatina a 1,5 a  $13 \text{ mg.l}^{-1}$  e anfotericina B a  $1 \text{ mg.l}^{-1}$ . A variação do coeficiente de atenuação com a concentração de grafite em misturas Agar/glicerina/água/grafite a  $22,0 \pm 0,8^\circ\text{C}$  pode ser vista na Tabela 11.

Tabela 11. Variação do coeficiente de atenuação em função da concentração de grafite na solução.

Concentração de grafite ( $\text{g.l}^{-1}$ )	$\alpha_o$ ( $\text{dB.cm}^{-1}.\text{MHz}^n$ )	n
<b>20</b>	0,364	0,78
<b>40</b>	0,516	0,78
<b>60</b>	0,667	0,82
<b>80</b>	0,842	0,87
<b>100</b>	0,975	0,92

Marsili *et al.* (2004) [7] estudaram corpos de prova de poliuretano (PU) segmentado, agregado a cobre metálico em pó. Apresentaram resultados de duas amostras de PU puro e doze amostras do mesmo com pó de cobre. Os gráficos de velocidade de propagação e do coeficiente de atenuação, em função da concentração de cobre, estão na Figura 7.

### Vel. de propagação do ultra-som em função da concentração de Cu



### Atenuação em função da concentração de Cu

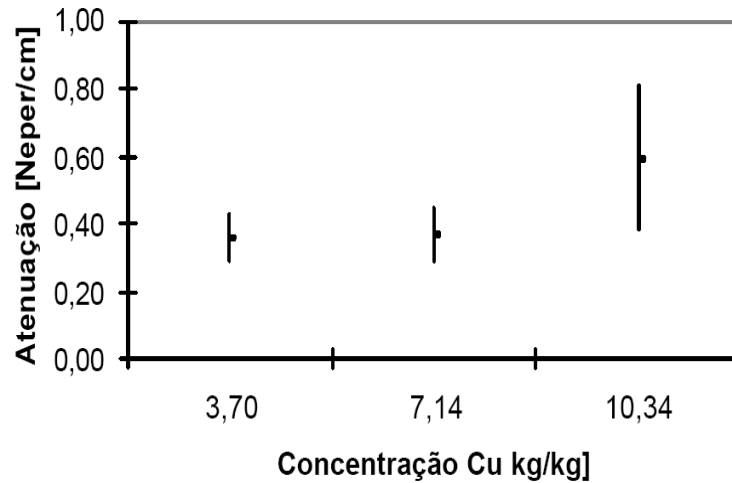


Figura 7. Variação da velocidade de propagação do ultrassom (esquerda) e do coeficiente de atenuação (direita) em função da concentração de cobre. (extraído de Marsili *et al.*, 2004).

Apesar do grande número de materiais testados como *phantoms* para aplicações de ultrassom (diagnóstico ou terapêutico), até o presente momento não foi possível encontrar um que apresentasse estabilidade, durabilidade e resistência a infecções além das propriedades acústicas e térmicas dentro da faixa dos valores dos tecidos biológicos.

Os dois mais promissores (Agar e poliacrilamida) sofrem com desidratação e deterioração ao longo do tempo. Além disso, nenhum deles apresenta coeficiente de atenuação ou espalhamento desejável, sendo necessário o emprego de outras substâncias como cobre ou PVC para torná-los mais ecogênicos e com maior coeficiente de absorção. Existem outros polímeros que ainda não foram estudados e com a ajuda da engenharia química, muitos outros materiais vêm sendo produzidos ou descobertos. Uma boa opção seriam os poliuretanos e os siliconados, ou uma mescla desses produtos em proporções diferentes, devido à sua estabilidade ao longo do tempo, pois podem durar um ano ou mais.

Considerando a importância dos polímeros, o capítulo seguinte será dedicado a estes materiais, para melhor compreensão do trabalho proposto.



## 4 POLÍMEROS

Devido ao caráter multidisciplinar deste trabalho, um conjunto de conceitos básicos sobre polímeros e sua forma de fabricação, silicone e PVCP será apresentado, com base no livro de Mano e Mendes [33].

### 4.1 INTRODUÇÃO

Polímeros podem ser definidos quimicamente como sendo moléculas relativamente grandes, de pesos moleculares da ordem de 1.000 a 1.000.000 g/mols ou mais, em cuja estrutura se encontra unidades químicas simples repetidas (do grego; meros = partes). Polietileno, polipropileno, poliestireno, poliéster, nylon® e teflon® são exemplos de polímeros industriais. Polimerização é definida como o conjunto de reações químicas intermoleculares, cujas moléculas dos monômeros se unem umas as outras, por ligações covalentes, para formar polímeros.

Devido à complexidade dessas estruturas moleculares, existem várias formas de se classificar os polímeros. A primeira classificação dos polímeros foi feita por Carothers (1929) apud Guitián (2006) [34], que dividiu os polímeros de acordo com o número de diferentes “meros” presentes.

**Homopolímero** - É o polímero constituído por apenas um tipo de unidade estrutural repetida. Ex: polietileno, poliestireno, poli(acrilonitrila), poli(acetato de vinila).

**Copolímero** - É o polímero formado por dois ou mais tipos de meros. Ex: copolímero estireno-acrilonitrila (SAN), copolímero butadieno-acrilonitrila (NBR), copolímero estireno-butadieno (SBR). Geralmente, os copolímeros constituídos por três unidades químicas repetidas diferentes são denominados terpolímeros.

Em relação à forma da cadeia polimérica, esta pode assumir as formas: **Lineares** - A cadeia do polímero não possui ramificações (Figura 8 A). **Ramificadas** - O polímero se apresenta ramificado, ou seja, com cadeias laterais (Figura 8 B). **Reticuladas** - Os

polímeros possuem estrutura tridimensional, onde as cadeias estão unidas por ligações químicas cruzadas (Figura 8 C).

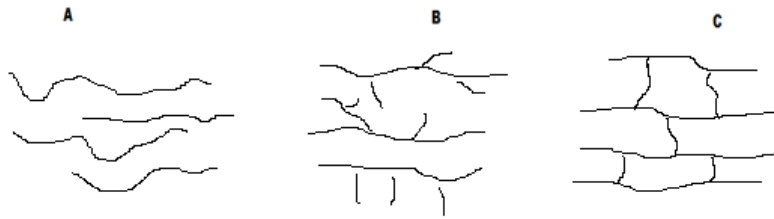


Figura 8. A) Esquema de cadeia polimérica linear, B) Cadeia polimérica ramificada e C) Cadeia polimérica reticulada.

Dependendo do comportamento ao serem aquecidos, os polímeros podem ser designados:

**Termoplásticos** - São polímeros que fundem ao serem aquecidos e que se solidificam ao serem resfriados. Ex: polietileno, poli(tereftalato de etileno), poliacrilonitrila, nylon.

**Termorrígidos** - São polímeros que formam ligações cruzadas ao serem aquecidos ou submetidos a uma outra forma de tratamento, tornando-se infusíveis e insolúveis. Ex: resina fenol-formol, resina melamina-formol, resina uréia-formol.

## 4.2 SILICONE

O Silicone surgiu pela primeira vez em 1944, produzido pela *Dow Corning Corporation* e *General Electric Company* [35]. A grande aceitação deste material no mercado está intimamente ligada às vantagens fornecidas pelas suas propriedades em relação aos demais elastômeros. Entre estas estão a excelente estabilidade térmica, resistência à oxidação, ao ozônio e a agressões ambientais, boas propriedades elétricas, extrema flexibilidade a baixas temperaturas, baixa ativação energética para fluidos viscosos e alta permeabilidade para gases, bom solvente, biocompatibilidade, curabilidade por vários métodos em alta temperatura e temperatura ambiente.

Os polímeros usados na fabricação de borrachas de silicone possuem porções orgânicas e inorgânicas (Figura 9). Eles têm uma estrutura polimérica semelhante ao quartzo, sendo feita de átomos de oxigênio e silício alternados, que é uma característica dos polímeros inorgânicos [36]. Tipicamente, o átomo de silício apresenta um ou mais grupos orgânicos ligados a eles, geralmente unidades de fenil ( $-C_6H_5$ ), metil ( $CH_3-$ ) ou vinil ( $CH_2=CH-$ ), porém, outros radicais, alquil, aril e grupos orgânicos reativos também são possíveis. Existem praticamente três tipos diferentes de borrachas de silicones no mercado: Composição de alta consistência, vulcanização a temperatura ambiente (RTV - *Room Temperature Vulcanization*) e borracha de silicone líquida (LSR - *Liquid Silicone Rubber*).

Polímeros contendo uma pequena quantidade de vinil (inferior a 0,5 mol %) substituído pelo grupo metil são os mais largamente utilizados na tecnologia de elastômeros de silicone. A substituição do grupo metil é o mais fácil e pode ser feita por quartzo, coque, cloro e água. O coque é utilizado para reduzir o silício presente no quartzo a silício metálico, que pode então reagir com o cloreto de metila para formar a mistura de silanos,  $Cl_{4-n}(CH_3)_nSi$ , onde “n” pode ser 1, 2, 3 ou 4. O dimetildiclorosilano é separado da mistura de silanos por destilação para a subsequente hidrólise, formando assim o dimetil ciclo siloxano substituído,  $[(CH_3)_2SiO]_x$ , que será utilizado na preparação dos polímeros. O número médio de unidades de siloxanos é controlado para melhor satisfazer as propriedades desejadas do produto final. Os polímeros do tipo composição de alta consistência usualmente contêm de 3.000 a

10.000 unidades repetidas de siloxanos. Outros polímeros usados (LSR e RTV) contêm entre 50 a 2.000 unidades.

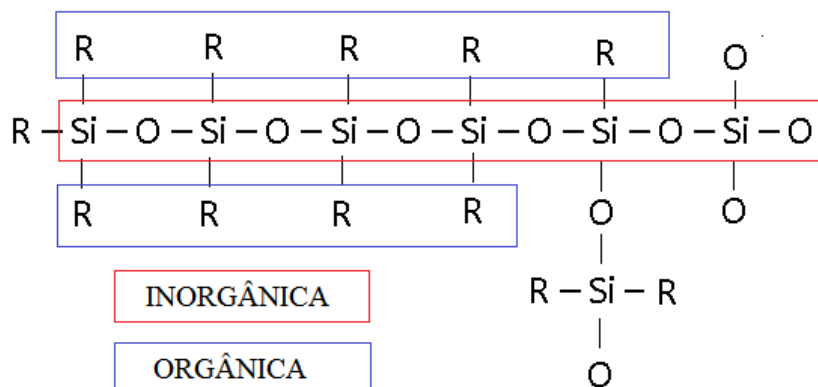


Figura 9. Molécula de silicone mostrando porção inorgânica e orgânica.

### 4.3 PVC e PVCP

O policloreto de vinila (PVC) é uma substância de elevado peso molecular, resultante da polimerização radicalar de cloreto de vinila (Figura 10). O primeiro método para a preparação do monômero (cloreto de vinila) foi descrito por Renault, em 1835 (apud Salman, 1995) [37] e consistia em tratar o dicloreto de etileno com uma solução alcoólica de hidróxido de potássio. Em 1872, Baumann obteve a polimerização do cloreto de vinila, em tubos de vidro fechados expostos à luz do sol. O polímero encontrado na forma de um sólido branco foi considerado estável até a temperatura de 130°C; a temperaturas mais elevadas ele se decompõe rapidamente, liberando um vapor ácido, somente em 1913, Goodrich começou a fabricação do PVC flexível [37].

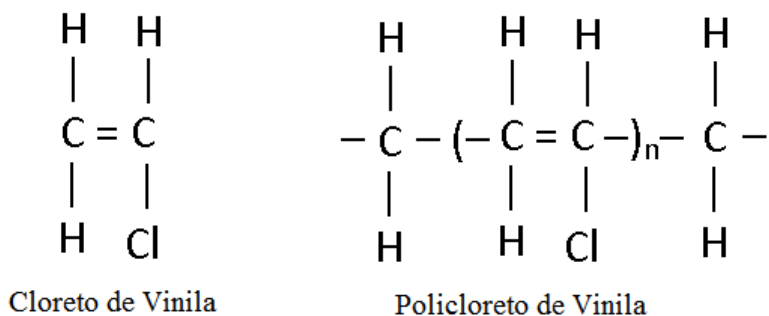


Figura 10. Monômero Cloreto de Vinila e PVC

O PVC plastificado foi desenvolvido após a segunda guerra mundial e começou a substituir a borracha em algumas aplicações importantes, como em cabos e isolantes térmicos. Com isso, deu-se início a um aumento contínuo da aplicação do PVC, alcançando, desta forma, uma posição dominante entre os termoplásticos [37].

O plastisol é definido como sendo o produto da dispersão de resina vinílica em líquidos orgânicos, basicamente plastificantes e, de acordo com sua aplicação, pode ser formulado para se obter características atóxicas, resistência à água, a óleos, a fungos e a agressões por produtos químicos. Pode também ser facilmente ajustado para se conseguir a processabilidade desejada [37].

As resinas específicas de PVC para plastisol têm sido continuamente pesquisadas e produzidas com o objetivo de se atingir os melhores resultados de processamento do produto. Basicamente, as resinas para plastisóis são obtidas pelo processo de polimerização em emulsão ou microssuspensão com peso molecular médio relativamente elevado. Elas possuem a propriedade de se misturarem intimamente com os plastificantes e de formarem líquidos viscosos a temperatura ambiente. O tamanho médio da partícula encontra-se na faixa de 1 a 10  $\mu\text{m}$ , substancialmente mais fina que a resina de PVC obtida pelo processo de polimerização em suspensão utilizada em compostos que são processados pelos métodos convencionais de calandragem, extrusão e injeção. Algumas resinas fazem com que a viscosidade do plastisol, com o decorrer do tempo, aumente após a preparação. Parte disso é devido à natureza tixotrópica da pasta e pode ser revertida com uma simples agitação. Por outro lado, certa viscosidade será mantida devido a penetração do plastificante na resina. Assim, com este aumento da viscosidade, o comportamento reológico do plastisol será função da resina utilizada, sendo que outros ingredientes da formulação, como plastificantes, estabilizantes térmicos, cargas minerais, redutores da viscosidade, entre outros, podem atenuar esse comportamento [37].

O nível e o tipo de plastificante utilizado são selecionados para se obter as características necessárias para cada tipo de aplicação. Geralmente, eles são líquidos inodoros e incolores, relativamente não voláteis e tem solubilidade muito baixa em água. A maioria dos plastificantes são ésteres de ácido ftálico (ftalatos) com grande variedade de alcoóis de cadeia longa contendo até 13 átomos de carbono. Os remanescentes também são ésteres, que incluem aqueles com base em ácidos adípicos, fosfóricos, trimetílicos ou azeláticos [37].

Basicamente, a ação do plastificante consiste em diminuir a intensidade das ligações dipolares entre as moléculas adjacentes do polímero. Estas ligações são resultantes dos elevados momentos bipolares entre os átomos de C e Cl, bem como Cl e H, forças de Van der Waals, que conferem ao PVC uma rigidez extremamente alta. O plastificante se interpõe aos dipolos intermoleculares devido a seu próprio dipolo induzido, reduzindo a atração molecular e, conseqüentemente, aumentando a flexibilidade das cadeias poliméricas. Tal flexibilidade será maior à medida que se aumenta a concentração de plastificante e/ou pela utilização de plastificantes com maior

poder de solvatação. Os plastificantes ftálicos (como DOP) são os mais largamente empregados em função do preço relativamente baixo e da obtenção de boas propriedades gerais do produto acabado. No caso do DOP (Ftalato de di-2 etilhexila), outro fator importante é seu uso permitido pelo FDA (*Food and Drug Administration*) em determinadas doses, para produtos médicos. O plastificante secundário mais utilizado é o óleo de soja epoxidado que também atua sinergeticamente com estabilizantes a base de Ba, Cd e Zn na estabilização térmica do PVC [37].

A estabilização de um material polimérico tem como objetivo fornecer proteção contra os agentes potencialmente nocivos à sua estrutura molecular, mantendo assim, as características previstas para o desempenho adequado, assegurando maior vida útil ao material polimérico. Estudos realizados em amostras de PVC plastificadas com ftalato de di-2-etilhexila (DOP) e com estabilizantes epóxidos e estearatos de Ca-Zn, mostraram que a liberação de gases é bem menos acentuada do que as amostras puras irradiadas. Os gases que foram liberados com irradiação foram; HCl (produto principal no caso da amostra pura), H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CO e CH<sub>4</sub>. Os resultados obtidos indicam que realmente a presença de plastificaste inibe o efeito da degradação do PVC irradiado com radiação  $\gamma$ .

## 5 CONFECÇÃO DE *PHANTOMS* POLIMÉRICOS

Neste capítulo serão apresentados os processos de confecção de *phantoms* de silicone e PVCP, puros e misturados com outras substâncias.

### 5.1 *PHANTOM* À BASE DE SILICONE

Da lista de elastômeros encontrados na literatura [1], a borracha de silicone RTV615 (*General Electric*®) é a que apresenta menor coeficiente de atenuação (1 dB.cm<sup>-1</sup> a 0,8 MHz). Entretanto, a velocidade de propagação da onda longitudinal é baixa (1.080 m.s<sup>-1</sup>). Buscou-se então, acrescentar materiais que possuíssem coeficiente de atenuação inferior, e velocidade de propagação superior aos respectivos valores médios dos tecidos biológicos, de forma que o produto final atingisse os valores das propriedades acústicas dentro da faixa de interesse.

O RTV (“*Room Temperature Vulcanization*”) 615 (*General Electric*®) é um produto à base de silicone, constituído por uma solução de dois componentes viscosos (RTV 615 A: RTV 615 B) que, quando misturados em uma proporção de 1:10, inicia o processo de cura, mesmo em temperatura ambiente. Alguns materiais, como a resina epoxi, impedem o processo de cura do silicone, quando misturados. Foram testados 20 tipos de misturas (Tabela 12) dos quais, os que obtiveram sucesso de cura e melhor valor das propriedades acústicas foram: a) silicone e fluído de silicone, b) silicone e vaselina e c) silicone e glicerina (em negrito na Tabela 12). Os *phantoms* foram numerados em ordem crescente, de acordo com a sequência cronológica de confecção, por exemplo, Ph1 foi o primeiro, Ph2 o segundo e assim por diante. Os *phantoms* Ph2x não apresentaram sucesso no processo de cura, sendo, portanto descartados.



Tabela 12 – Lista de *phantoms* à base de silicone, puros ou misturado com substâncias (concentrações) e suas respectivas nomenclaturas adotadas. Os *phantoms* em negrito foram os selecionados para estudo continuado.

	<b>Material</b>	<b>Nome</b>
1	<i>Phantom</i> de silicone e fluido de silicone (4%)	Ph5
2	<i>Phantom</i> de silicone borracha de silicone à base d'água rhodiastic (29,7 %)	Ph6
3	<i>Phantom</i> de silicone e glicerina (27%)	Ph8
4	<i>Phantom</i> de silicone e fluido de silicone (23%)	Ph10
5	<b><i>Phantom</i> de silicone puro</b>	<b>Ph11</b>
6	<b><i>Phantom</i> de silicone e vaselina (23%)</b>	<b>Ph12</b>
7	<b><i>Phantom</i> de silicone e óleo de silicone (23%)</b>	<b>Ph14</b>
8	<b><i>Phantom</i> de silicone e óleo de silicone (40%)</b>	<b>Ph15</b>
9	<i>Phantom</i> de silicone e vaselina (37.29%) e pó de vidro (6.78%)	Ph16
10	<i>Phantom</i> de silicone e vaselina (40 %)	Ph17
11	<i>Phantom</i> de silicone e vidro (10,8 %)	Ph18
12	<i>Phantom</i> de silicone e glicerina (10 %)	Ph19
13	<b><i>Phantom</i> de silicone e glicerina (40 %)</b>	<b>Ph22</b>
14	<i>Phantom</i> de silicone e epoxi (5 %)	Ph23
15	<i>Phantom</i> de silicone e vaselina (50 %)	Ph24
16	<i>Phantom</i> de silicone cola branca PVA p/ moveis rhodopas (34 %)	Ph2x
17	<i>Phantom</i> de silicone e álcool isopropílico (4 %)	Ph2x
18	<i>Phantom</i> de silicone e alumina (5,71 %)	Ph25
19	<i>Phantom</i> de silicone e solução glicerol/água 80% (10 %)	Ph2x
20	<b><i>Phantom</i> de silicone e óleo de silicone (40%)</b>	<b>Ph31</b>

Obs – As porcentagens entre parênteses é relativa à massa (Tabela 13).

A concentração dos produtos misturados ao silicone é determinada utilizando-se uma balança de precisão (Ohaus adventurer ®). Mistura-se o RTV 615 A com a substância de interesse (p. ex., vaselina) e posteriormente acrescenta-se o agente de cura RTV 615 B, na proporção conforme indicada na Tabela 13. Após a mistura dos produtos em um béquer, o produto final é levado a uma câmara à vácuo para extração de bolhas de ar. Devido à alta viscosidade dos produtos, as bolhas de ar que se formam na superfície durante o processo de extração de bolhas de ar não se estouram facilmente, sendo necessária a inserção rápida de ar na câmara para estourar as bolhas. Isso é

adquirido retirando-se a mangueira de vácuo subitamente. Este processo é repetido de 30 a 40 vezes até a constatação visual da ausência de bolhas na superfície. Após este processo, o líquido é vertido em um molde e espera-se cerca de 12 horas até o processo de cura total. O tempo de espera pode ser reduzido até 2 horas quando o molde é levado para a estufa a 70°C.

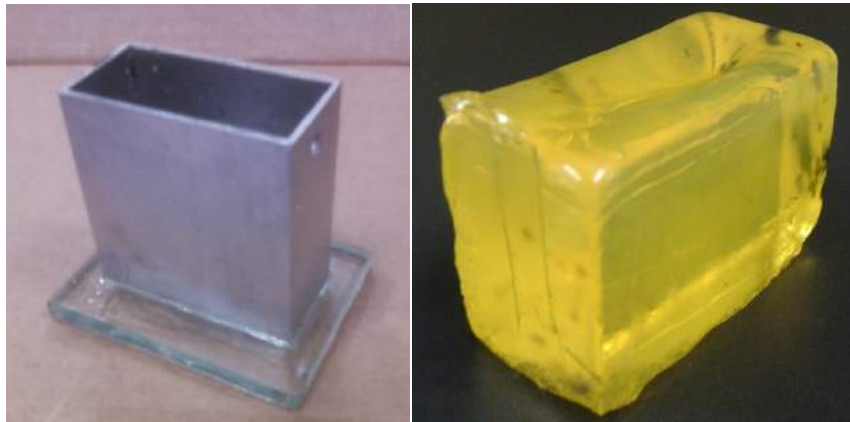
Tabela 13 - Processo de determinação da concentração de vaselina no silicone.

<b>PRODUTO</b>	<b>Massa (g)</b>	<b>%</b>
<b>RTV A</b>	35,00	70
<b>RTV B</b>	03,50	07
<b>Vaselina</b>	11,50	23
<b>TOTAL</b>	50,00	100

## 5.2 PHANTOM À BASE DE PVCP

Em meio à busca de materiais que pudessem ser misturados com o silicone, elevassem sua velocidade e reduzissem sua atenuação, deparou-se com o PVC siliconizado a 5%. Um material fornecido pelo Instituto de Macromoléculas da UFRJ (IMA/UFRJ), que apresentou uma velocidade em torno de  $1.700 \text{ m.s}^{-1}$ , porém uma atenuação elevada. Tal material poderia ser confeccionado em outras concentrações de silicone em busca dos valores apropriados. Entretanto, não foi possível conseguir novas amostras desse material em tempo hábil. Buscou-se então algum material similar, o que direcionou a pesquisa ao PVC plastificado (PVCP). Um material estudado por Spirou *et al.* (2005) [38] para aplicações optoacústicas que apresentou vantagens como; valores de atenuação e velocidade longitudinal próximos aos dos tecidos biológicos moles, menor preço e maior facilidade de aquisição do material no mercado.

Na técnica inicial utilizada para se preparar o *phantom* a base de PVCP, o líquido é aquecido a  $150^\circ\text{C}$  em um agitador/aquecedor ou em um aquecedor simples mexendo-se continuamente por meio de um bastão de vidro. Com o aquecimento, o PVCP líquido torna-se mais viscoso e translúcido. Mantendo-se aquecido o produto, este é levado para uma câmara à vácuo para a extração de bolhas de ar resultante do processo de mistura. Esse processo não pode demorar mais que dois ou três minutos, pois, se a temperatura cair abaixo de  $60^\circ\text{C}$  o PVCP se solidifica antes de ser levado ao molde. O processo de extração das bolhas de ar é o mesmo utilizado no RTV615, removendo-se a mangueira da câmara de vácuo subitamente. Retiradas as bolhas de ar, o líquido é vertido em um molde (Figura 11 a) e após o resfriamento pode ser facilmente removido deste (Figura 11 b). Esta técnica apresentou algumas desvantagens como: grande desperdício de material, dificuldade de manuseio devido à alta temperatura dos recipientes, necessidade de agilidade para se retirar as bolhas de ar na câmara de vácuo e risco de exposição à fumaça tóxica.



(a)

(b)

Figura 11. (a) Molde para confecção de *phantoms*. (b) *Phantom* a base de PVCP com deformação na face superior.

Uma nova técnica (denominada de MAVK em homenagem ao seu criador Marco Antônio von Krüger) simplifica este processo e evita desperdício de material além de não necessitar da presença do manuseador durante o aquecimento. Nesta nova técnica, o líquido PVCP é levado para a câmara de vácuo antes de ser aquecido. Retirada as bolhas de ar, o líquido é então colocado no molde e aquecido a 150°C em uma estufa por duas horas. Após o resfriamento, o *phantom* é removido do molde facilmente.

Os *phantoms* de PVCP não devem ter contato direto com materiais plásticos ou acrílicos, pois podem degradá-los rapidamente. É importante salientar que em qualquer uma das técnicas de produção da *phantoms* de PVCP citadas, o produto final apresenta sempre uma concavidade na face aberta do molde onde é confeccionado (Figura 11 a), indicando uma contração do produto após o resfriamento. Durante o aquecimento, o PVCP líquido se expande e quando sua temperatura cai à temperatura ambiente, o *phantom* se comprime, promovendo a curvatura na porção superior (Figura 11 b). Esta deformação impossibilita que esta face seja utilizada para análise das propriedades ultrassônica e medições nas proximidades desta face devem ser evitadas para que reflexões dos lobos laterais do transdutor não interfiram nos valores mensurados.

O PVCP apresenta valores de velocidade e atenuação próximos aos da gordura, entretanto, sua velocidade é um pouco menor. Buscou-se então misturar este material com outras substâncias para o ajuste da velocidade ou adequação deste *phantom* com os

valores de outros tecidos. A Tabela 27 indica algumas substâncias misturadas ao PVCP para estudo de suas propriedades e a Figura 40 mostra as fotos dos *phantoms* à base de PVCP analisados.

## 6 TÉCNICAS DE AQUISIÇÃO DE SINAIS PARA MEDIÇÃO

Neste capítulo, serão apresentadas as metodologias de medição de velocidade longitudinal e coeficiente de atenuação por meio de duas diferentes técnicas.

Como o presente trabalho se propõe a produzir *phantoms* com propriedades acústicas (velocidade e atenuação) mais estáveis ao longo do tempo, é necessário que a montagem experimental para se medir tais propriedades forneça valores exatos<sup>2</sup> e repetitivos.

Várias técnicas têm sido descritas na literatura para se calcular a velocidade longitudinal e o coeficiente de atenuação de *phantoms* e tecidos biológicos. De forma geral, as técnicas de medição destas propriedades podem ser divididas em dois tipos: 1) Pulso/eco e 2) Transmissão/recepção. Várias montagens foram testadas buscando-se maior repetitividade dos resultados. Em cada uma das técnicas foram testados os métodos: AFASTADO (com transdutores distantes das faces do *phantom*) e TOCANDO (com os transdutores em contato direto com o *phantom*). Desta forma, este trabalho visa também contribuir para o aprimoramento de técnicas de medição das propriedades acústicas. Um diagrama para melhor elucidar a ramificação das técnicas testadas pode ser visto na Figura 12.

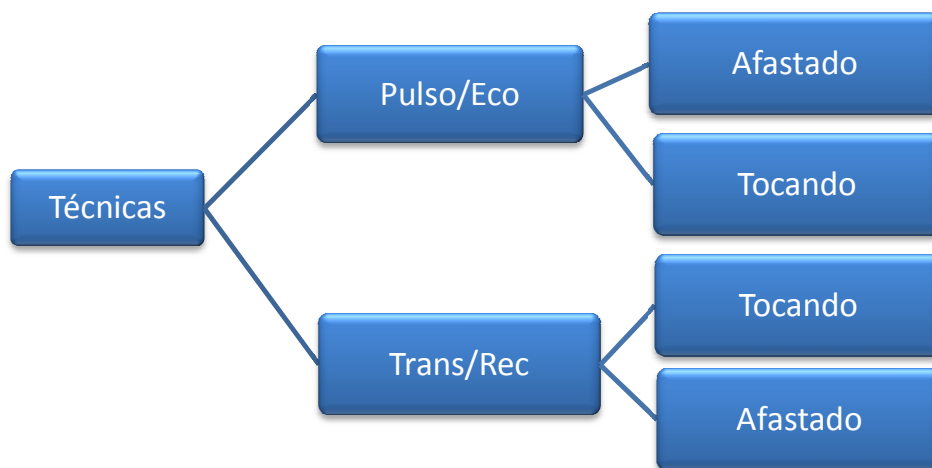


Figura 12. Diagrama da ramificação das diferentes técnicas testadas.

---

<sup>2</sup> **Exatidão de medição:** Grau de concordância entre um **valor medido** e um **valor verdadeiro** de um **mensurando**.

## 6.1 PULSO/ECO AFASTADO

Para se fazer as medições de velocidade e atenuação do som por meio da técnica **Pulso/eco**, são adquiridos os sinais de pulso ultrassônicos que atravessa *phantom* e o meio de referência (água), atingem o refletor e voltam pelo mesmo transdutor (Figura 13). Para tal, foram utilizados: um gerador de pulsos (placa de excitação MATEC TB1000 com os parâmetros descritos na Tabela 14), um transdutor ultrassônico (Tx) 1,25 MHz (ou outro transdutor de 2 MHz Harsonic 13-0108-S) imerso em água destilada alinhado à um refletor de alumínio por meio de posicionadores/hastes, e um osciloscópio (TEKTRONIX TDS1000) conectado a um computador por meio da porta Ethernet. Primeiramente adquire-se o sinal que passa através do *phantom* duas vezes (ida e volta), depois o *phantom* é removido e o sinal de referência é adquirido. Foram realizados cinco ensaios de cada e processados em um programa desenvolvido em Labview. Esta técnica tem a vantagem de se utilizar apenas um transdutor, entretanto, como o sinal passa pelo *phantom* duas vezes, são necessários *phantoms* mais finos ou geradores mais potentes para se medir a atenuação nas maiores frequências.

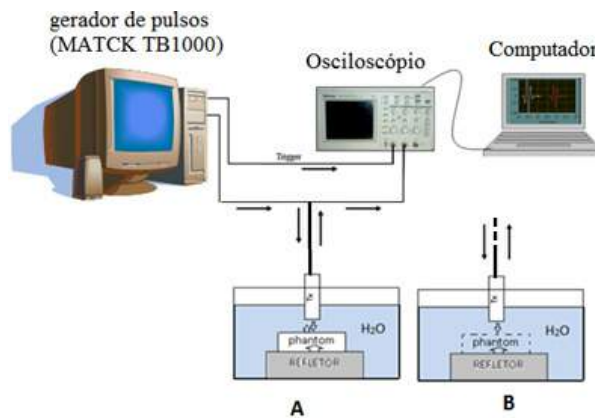


Figura 13 – Técnica pulso/eco. A) Com *phantom* (Sinal do *phantom* – Sp), B) Sem o *phantom* (Sinal de referência- Sr).

Tabela 14. Parâmetros utilizados no sistema de excitação do transdutor com a placa MATEC TB1000.

<b>PARÂMETRO</b>	<b>VALOR</b>	<b>UNIDADE</b>
<b>Tempo de Repetição</b>	12.000	ms
<b>Frequência</b>	1,25 ou 2	MHz
<b>Largura do pulso</b>	2	ms
<b>Transmissão/Recepção ou Pulso/eco</b>	P/E	
<b>Ganho</b>	20	dB
<b>Trigger</b>	+ interno	
<b>Taxa de amostragem</b>	500	MS/s



## 6.2 PULSO/ECO TOCANDO

Após várias tentativas de se melhorar a estabilidade do sistema de medição pela técnica pulso/eco AFASTADO sem sucesso, buscou-se então, simplificar a montagem experimental colocando o transdutor virado para cima e o *phantom* TOCANDO a sua superfície, dispensando complexos sistemas de posicionamento e haste de sustentação, empregando apenas uma fina camada de água para promover o casamento de impedância acústica entre o transdutor e o *phantom* (Figura 14). Com isso, utilizava-se o ar como refletor, o que maximizava o sinal de eco da segunda face do *phantom*.

Nesta montagem, a água não é usada como meio de referência, sendo necessária a utilização de dois *phantoms* de mesmo material com espessuras diferentes (*Phantom* fino e *Phantom* grosso) ou um mesmo *phantom* com diferentes espessuras em duas de suas faces (*Phantom* AB) como o *Phantom* 31 que pode ser visto na Figura 23. O eco do *Phantom* fino, ou do lado de menor espessura (A) do *Phantom* AB, foi utilizado como Sinal de referência ( $S_r$ ) e o eco do *Phantom* grosso, ou lado de maior espessura (B), era utilizado como Sinal do *phantom* ( $S_p$ ) e a diferença de espessura entre os dois *phantoms* utilizada como “ $\Delta x$ ” na Equação 11 para o cálculo da velocidade e “ $x$ ” na Equação 25 para o cálculo da atenuação, ainda multiplicados por dois devido à ida e volta do sinal. Esta técnica tem a vantagem de não precisar compensar a reflexão nas interfaces, pois se assume que seriam similares nos dois sinais (referência e *phantom*). (Figura 14)

Foi utilizado um gerador (Agilent Technologies, CA, EUA Modelo 33250A) para excitar os transdutores com até 20 ciclos de ondas senoidais de 20 V pico a pico na frequência central do transdutor. As ondas detectadas pelo transdutor Rx foram monitoradas por meio de um osciloscópio digital (modelo DSO6032A Agilent Technologies, CA, USA) e transferidas para um computador por meio de um cabo GPIB/USB (NI-488-2 da National Instrument®) empregando-se um programa desenvolvido em Labview 2009 denominado AcousticTrans a ser descrito no Capítulo 8: SOFTWARE DE AQUISIÇÃO E CÁLCULO DOS PARÂMETROS ACÚSTICOS.

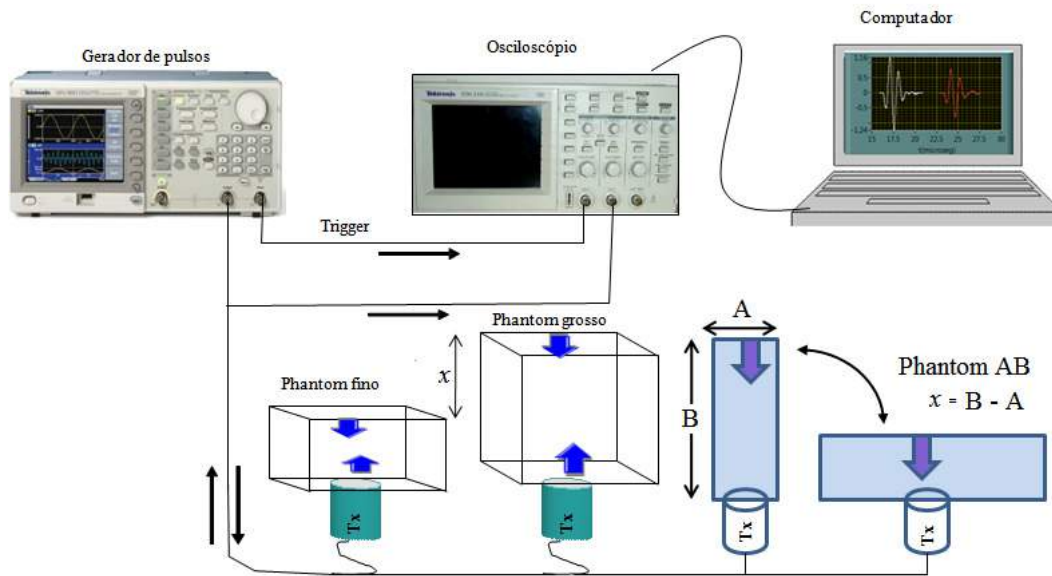


Figura 14. Esquema do método pulso/eco TOCANDO usando o *phantom* fino e *phantom* grosso, ou o *phantom* AB.

### 6.3 TRANSMISSÃO/RECEPÇÃO TOCANDO E AFASTADO

Na técnica **Transmissão/recepção** dois transdutores de mesma frequência, um Transmissor (Tx) e o outro Receptor (Rx), são colocados um de frente ao outro, alinhados para maximizar o sinal. Nesta técnica, pode-se empregar dois métodos, A) TOCANDO – com os transdutores em contato direto com as faces paralelas do *phantom*, ou B) AFASTADO – com os transdutores distantes das faces do *phantom*. São coletados então, dois sinais, o Sinal de Referência (Sr) e o Sinal do *phantom* (Sp) que corresponde à passagem da onda através de uma massa de água e de *phantom* com a mesma espessura respectivamente (Figura 15).

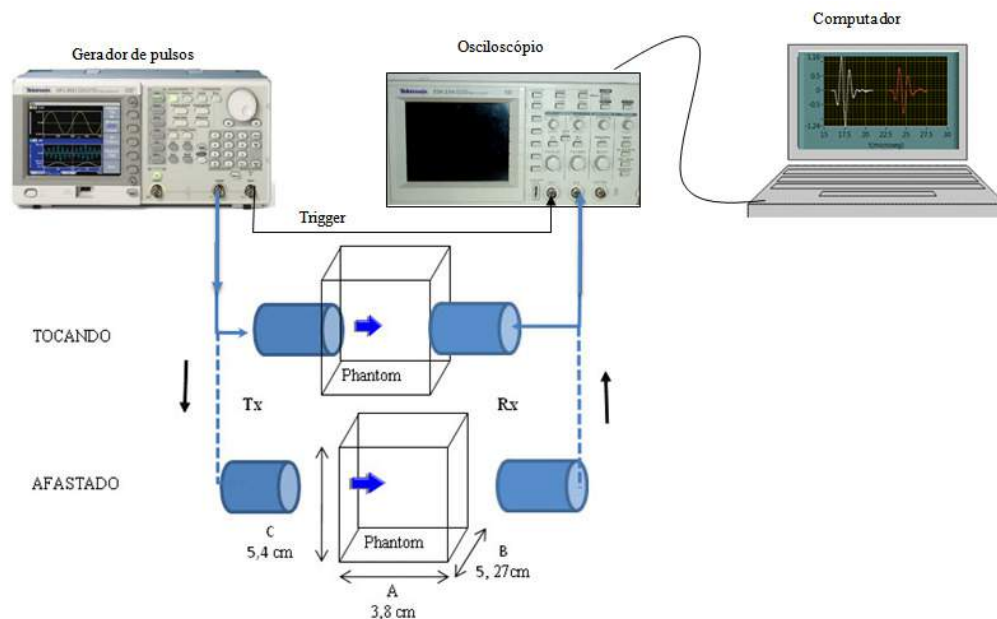


Figura 15. Técnica Transmissão/Recepção TOCANDO e AFASTADO.

Tanto no método transmissão/recepção TOCANDO como no AFASTADO, para se garantir o alinhamento dos transdutores entre si, e estes com o *phantom*, foi necessário a construção de trilhos perpendiculares em forma de cruz (Figura 16). Dois problemas para se empregar o método TOCANDO podem acontecer: 1) A má fixação dos transdutores permitindo uma movimentação no suporte, mesmo que ínfima, durante a retirada do *phantom* para se adquirir o Sinal de referência (Sr) e 2) A dificuldade de se

tocar as faces dos *phantoms* mais maleáveis (como o PVCP) com os transdutores sem pressioná-las, ocasionando alteração de suas propriedades.

Para se reduzir estes problemas, um molde duro de alumínio dimensões semelhantes as do *phantom* maleáveis passou a ser utilizado para se posicionar os transdutores e travá-los. Posteriormente o molde é substituído pelo *phantom* que se movimenta perpendicularmente ao trilho dos transdutores fixo a um carrinho adicionado ao sistema para se movimentar o *phantom* com maior repetitividade e mantendo suas faces paralelas aos transdutores. Como a medição da atenuação é relativa, pequenas alterações não devem influenciar fortemente no valor final. O sistema de posicionamento e fixação pode ser visto na Figura 16.

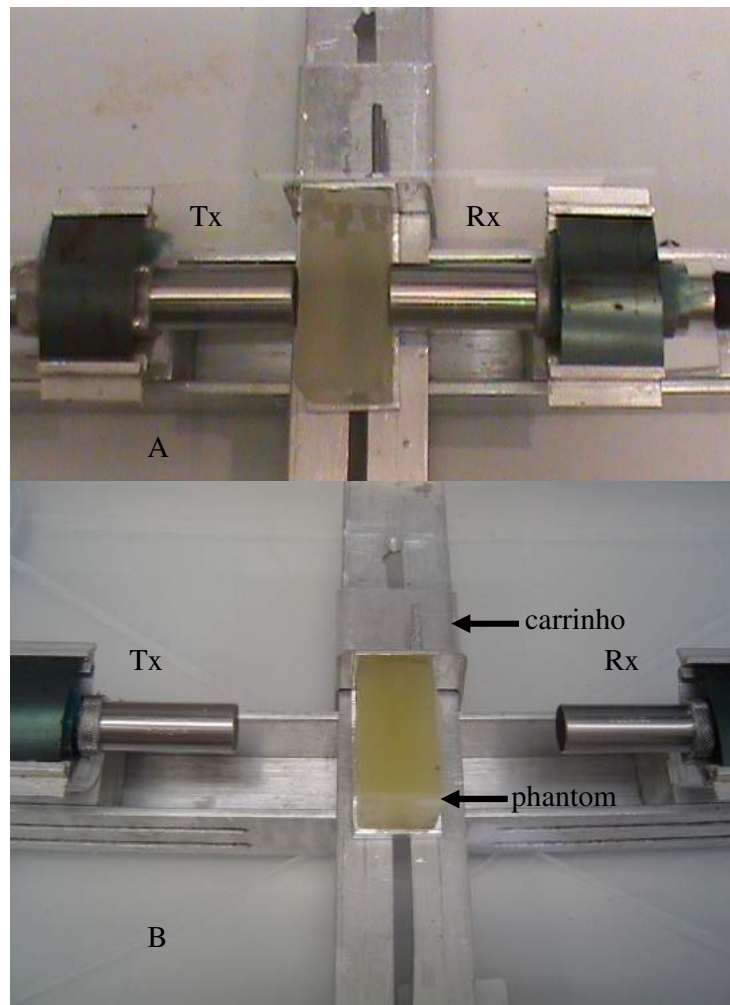


Figura 16. Montagem experimental Transmissão/recepção com trilhos cruzados. A) Técnica TOCANDO e B) Técnica AFASTADO.

Com o apoio do Laboratório de Ultra-som do INMETRO (LABUS/DIAVI/INMETRO), as medições puderam ser feitas com quatro pares de transdutores idênticos (Panametrics-NDT Olympus Corporation, Japan), com frequências centrais de 1,0 MHz, 2,25 MHz, 3,5 MHz e 5 MHz, e diâmetros de 0,5 polegadas. Com isso, conseguiu-se perfazer uma faixa mais larga de frequência e calcular o coeficiente de atenuação. Um gerador Modelo 33250A (Agilent Technologies, CA, EUA) foi empregado para excitar os transdutores com até 20 ciclos de ondas senoidais de 20 V pico a pico para cada frequência testada. As ondas detectadas pelo transdutor Rx foram monitoradas por meio de um osciloscópio digital (modelo DSO6032A Agilent Technologies, CA, USA) e transferidas para um computador através da interface GPIB/USB empregando-se o programa AcousticTrans.

## 7 CÁLCULO DAS PROPRIEDADES

Na prática científica, os laboratórios de pesquisa que se empenham em desenvolver *phantoms* ultrassônicos, criam sua própria metodologia de medição ou montagem experimental e muitas vezes apresentam apenas o desvio-padrão como expressão da incerteza de suas medições. A falta de uma metodologia padronizada e da expressão da incerteza expandida das medições gera uma grande dúvida quanto ao valor verdadeiro da grandeza medida [39]. Em muitos artigos estudados, pôde-se notar uma incerteza (ou desvio-padrão) elevada(o) dos valores medidos da atenuação, como é o caso de Zell, *et al.* (2007) [40] que apresentam uma variação do valor da atenuação a 4 MHz de aproximadamente 9 a 15 dB.cm<sup>-1</sup> (Figura 17). Madsen *et al.* em uma comparação inter-laboratorial, encontraram uma diferença entre os valores medidos, para um mesmo *phantom*, em torno de 20% para o coeficiente de atenuação [41].

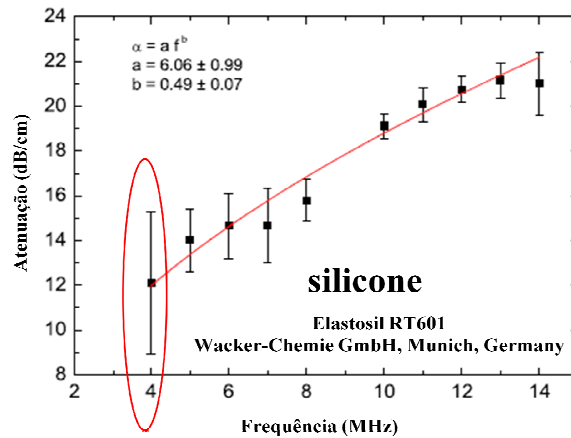


Figura 17. Gráfico da medição da atenuação do silicone RT601 segundo Zell *et al.* (2007). O círculo chama a atenção para a alta incerteza do valor da atenuação a 4 MHz.

Neste capítulo serão apresentadas as equações utilizadas para se calcular a velocidade e o coeficiente de atenuação com as diferentes técnicas empregadas e o cálculo de incerteza destas medições. Também será descrito um breve conceito sobre as propriedades térmicas (condutividade e calor específico) e suas técnicas de medição.

## 7.1 VELOCIDADE LONGITUDINAL

Para se calcular a velocidade longitudinal do *phantom* ( $v_{pha}$ ) tanto na técnica de **pulso/eco AFASTADO** quanto **na transmissão/recepção AFASTADO** utilizou-se a Equação 9 de acordo com Queiroga [42] e Zell *et al.* [40].

$$v_{pha} = \left( \frac{1}{v_{ref}} - \frac{\Delta t}{x} \right)^{-1} \text{ (m.s}^{-1}\text{)} \quad \text{Equação 9}$$

onde  $x$  em metros. Na técnica pulso/eco este valor tem que ser multiplicado por dois, pois a onda passa pelo *phantom* duas vezes (ida e volta), e  $\Delta t$  é a diferença entre os tempos dos picos dos sinais de referência e do *phantom*. A velocidade da onda na água ( $v_{ref}$ ) depende de sua temperatura ( $T$ ) e é dada pela Equação 10.

$$v_{ref} = 140238 + 5,03T - 0,05T^2 + 3,34 \cdot 10^{-4}T^3 - 1,47 \cdot 10^{-6}T^4 + 3,14 \cdot 10^{-9}T^5 \quad \text{Equação 10}$$

Para a técnica **pulso/eco TOCANDO**, utilizou-se a Equação 11 onde  $\Delta x$  é a diferença de espessura entre o *phantom* grosso e o *phantom* fino ou a diferença entre os lados D e d do *phantom* com dimensões diferentes.

$$v_{pha} = \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad \text{Equação 11}$$

Já se empregando a técnica **transmissão/recepção** com os transdutores TOCANDO, a velocidade longitudinal pode ser calculada pela Equação 12.

$$v_{pha} = v_{ref} \frac{t_{ref}}{t_{pha}} \quad \text{Equação 12}$$

## 7.2 INCERTEZA DA MEDIÇÃO DA VELOCIDADE

**Incertezas padrão do tipo A e B** - A incerteza padrão de uma variável de entrada ( $Y$ ) é definida conforme a Equação 13:

$$u^2(Y) = u_A^2(Y) + u_B^2(Y) \quad \text{Equação 13}$$

onde  $u_A(Y)$  representa a incerteza padrão do tipo A, a qual é obtida por meio do cálculo da Equação 14, onde é  $\sigma$  o desvio-padrão de  $n$  amostras.

$$u_A(Y) = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad \text{Equação 14}$$

A incerteza-padrão do tipo B,  $u_B(Y)$ , refere-se às especificações do fabricante ou ao conhecimento prévio do comportamento ou das propriedades de instrumentos.

A  $u_B(l)$  do paquímetro (metros), por exemplo, é representada pela Equação 15. Para isso, considera-se que as variações na medição da espessura seguem uma distribuição retangular [43]:

$$u_B(l) = \frac{10^{-3}}{2l\sqrt{3}} \quad \text{Equação 15}$$

onde  $l$  é o número de divisões do nóvio do paquímetro ( $l = 20$ ).

As incertezas-padrão dos tempos ( $t_{ref}$  e  $t_{pha}$ ) são calculadas usando-se a Equação 13. Sendo  $u_A(t)$  o desvio-padrão experimental da média ( $n = 30$ ) e  $u_B(V)$  dependerá da exatidão do osciloscópio.

**Incerteza-padrão combinada** - A incerteza-padrão combinada  $u_c$  será a soma quadrática do produto de cada componente da incerteza-padrão com seu respectivo



coeficiente de sensibilidade [43]. Este coeficiente é definido como a derivada parcial do mensurando em relação à variável considerada na componente da incerteza [44].

As expressões utilizadas para os cálculos dos coeficientes de sensibilidade da medição da velocidade longitudinal empregando o método **TOCANDO** de acordo com a Equação 12 estão da Equação 16 à Equação 18 e pelo método **AFASTADO** de acordo com a Equação 9 da Equação 19 à Equação 22:

$$\frac{\partial v_{pha}}{\partial v_{ref}} = \frac{t_{ref}}{t_{pha}} \quad \text{Equação 16}$$

$$\frac{\partial v_{pha}}{\partial t_{ref}} = \frac{v_{ref}}{t_{pha}} \quad \text{Equação 17}$$

$$\frac{\partial v_{pha}}{\partial t_{pha}} = -\frac{v_{ref} \cdot t_{ref}}{t_{pha}^2} \quad \text{Equação 18}$$

$$\frac{\partial v_{pha}}{\partial x} = \frac{v_{ref} \cdot [x - v_{ref} (t_{ref} - t_{pha})] - x \cdot v_{ref}}{[x - v_{ref} \cdot (t_{ref} - t_{pha})]^2} \quad \text{Equação 19}$$

$$\frac{\partial v_{pha}}{\partial v_{ref}} = \frac{x \cdot [x - v_{ref} (t_{ref} - t_{pha})] - x \cdot v_{ref} (t_{pha} - t_{ref})}{[x - v_{ref} \cdot (t_{ref} - t_{pha})]^2} \quad \text{Equação 20}$$

$$\frac{\partial v_{pha}}{\partial t_{ref}} = -\frac{x \cdot v_{ref}^2}{[x - v_{ref} \cdot (t_{ref} - t_{pha})]^2} \quad \text{Equação 21}$$

$$\frac{\partial v_{pha}}{\partial t_{pha}} = \frac{x \cdot v_{ref}^2}{[x - v_{ref} \cdot (t_{ref} - t_{pha})]^2} \quad \text{Equação 22}$$

**Grau de liberdade efetivo** - O grau de liberdade efetivo é calculado por:

$$v_{eff} = \frac{u_c^4}{\sum_{i=1} \frac{u_i^4}{v_i}}$$

Equação 23

Tal que  $u_i$  são as incertezas-padrão e  $v_i$  os graus de liberdade das incertezas padrão.

**Incerteza expandida** – Essa incerteza (U) é definida como sendo o produto do fator de abrangência  $k$ , o qual depende de  $v_{eff}$ , por  $u_c$  [43]. Neste trabalho será adotado um nível de confiança de 95 %.

### 7.3 IMPEDÂNCIA ACÚSTICA

A impedância acústica do *phantom*  $Z_p$  foi calculada por meio da Equação 24:

$$Z_p = \rho_{pha} \cdot v_{pha} \quad \text{Equação 24}$$

onde  $\rho_{pha}$  é a densidade (massa específica) do *phantom* obtida por meio de um picnômetro e  $v_{pha}$  é a velocidade longitudinal da onda no *phantom*. Já a impedância acústica da água  $Z_w$  é dada pelo produto da velocidade da onda na água  $v_{ref}$  e a densidade da água que foi considerada como sendo  $997.0479 \text{ kg/m}^3$  a  $25^\circ\text{C}$  de acordo com o CRC *Handbook of Chemistry and Physics* 48<sup>th</sup> [45].

## 7.4 ATENUAÇÃO E COEFICIENTE DE ATENUAÇÃO

Assim como na medição da velocidade longitudinal, para se estimar a atenuação dos *phantoms* foram testados dois métodos (**pulso/eco** e **transmissão/recepção**) que se dividiram em duas técnicas (**TOCANDO** e **AFASTADO**).

Inicialmente, devido à carência de transdutores pareados no Laboratório de Ultra-Som (LUS/PEB/COPPE/UFRJ), empregou-se a técnica **Pulso/Eco** e a Equação 25 para se calcular a atenuação dos *phantoms*. Entretanto, esta técnica apresenta algumas limitações, tais como: 1) necessidade de se conhecer o coeficiente de atenuação do refletor e do *phantom*, 2) *phantoms* com maior atenuação precisam ser mais finos para se obter energia suficiente no eco, pois o sinal passa pela espessura duas vezes, e 3) refletores e *phantoms* muito finos impedem o emprego de ondas Burst com vários ciclos, pois as reflexões nas duas faces próximas podem interagir entre si.

Posteriormente, o laboratório conseguiu transdutores pareados e a atenuação pôde ser calculada por meio da técnica transmissão/recepção utilizando-se dois métodos diferentes: A) TOCANDO e B) AFASTADO. Os sinais coletados em cada uma destas técnicas podem ser analisados de duas formas diferentes: 1- **FFT** pela divisão do pico da FFT (Transformada Rápida de Fourier) do Sinal de Referência ( $A_o$ ) pelo correspondente na frequência da FFT do Sinal da Amostra ( $A$ ), forma empregada no LUS/UFRJ. 2 – **RMS** que em sinais com 05 ciclos ou mais, pode-se utilizar também, para cálculo e comparação do valor da atenuação, a divisão dos valores da Raiz Quadrática Média (RMS – Root Mean Square) de trechos dos sinais  $S_r$  e  $S_p$ , forma utilizada no Laboratório de Ultra-som (LABUS/INMETRO).

A atenuação ( $\alpha$ ) em  $\text{dB.cm}^{-1}$  com a técnica **transmissão/recepção TOCANDO** e **transmissão/recepção AFASTADO APARENTE** foi obtida pela Equação 25:

$$\alpha = 20 \frac{\log\left(\frac{A}{A_o}\right)}{x} \quad \text{Equação 25}$$

onde “ $x$ ” é a espessura da amostra em cm,  $A_o$  é a amplitude do pico da FFT ou o valor RMS do sinal de referência ( $S_r$ ), e  $A$  é a amplitude do pico da FFT ou o valor RMS do sinal do *phantom* ( $S_p$ ). É importante salientar que os valores apresentados para

atenuação dos phantoms em  $\text{dB.cm}^{-1}$  neste trabalho são referentes à intensidade. Foram colhidos 05 sinais de cada amostra em uma faixa de frequências de 1 a 4 MHz.

A medida da atenuação pela técnica **transmissão/recepção AFASTADO REAL** foi feita empregando-se a Equação 26:

$$\alpha = 2\alpha_w - \frac{1}{x} \left[ \ln\left(\frac{A}{A_0}\right) - 2 \ln(1 - R) \right] \quad \text{Equação 26}$$

onde  $\alpha_w$  é o coeficiente de atenuação da água (meio de referência) em função da frequência e pode ser calculado por  $\alpha_w = 2,5 \times 10^{-4} f^2$  de acordo com Park *et al.* apud Zell [40].  $R$  é o coeficiente de reflexão acústica entre a interface água/*phantom* que é dada pela Equação 27:

$$R = \frac{Z_p - Z_w}{Z_p + Z_w} \quad \text{Equação 27}$$

onde  $Z_w$  é a impedância acústica da água e  $Z_p$  a impedância acústica do *phantom* dada pela Equação 24.

Uma vez calculada a média aritmética dos valores de atenuação das 05 medições do *phantom*, utilizou-se estes valores de atenuação em função da frequência para estimar a melhor curva potencial pelo método de mínimos quadrados, conforme proposto por [40], de acordo com a Equação 28:

$$\alpha(f) = A.f^B \quad \text{Equação 28}$$

onde  $A$  representa o coeficiente de atenuação do *phantom* ( $\text{dB.cm}^{-1}.\text{MHz}^{-1}$ ) e  $B$  o grau de linearidade. Como exemplo da aplicação do método, apresenta-se os resultados obtidos com o *phantom* 11 a base de silicone, cujos valores de atenuação medidos em função da frequência são apresentados na Tabela 15. O coeficiente de atenuação  $A$  e o grau de linearidade  $B$  obtidos com os dados da Tabela 15 podem ser vistos na Figura 18.

Tabela 15. Médias da atenuação pela técnica Transmissão/Recepção TOCANDO do *Phantom* 11 de silicone puro do dia 09 de novembro de 2009.

Frequência (MHz)	1,00	2,00	2,25	3,00	3,50	4,00
Atenuação FFT (dB.cm <sup>-1</sup> )	1,12	3,13	3,82	6,75	9,20	8,66

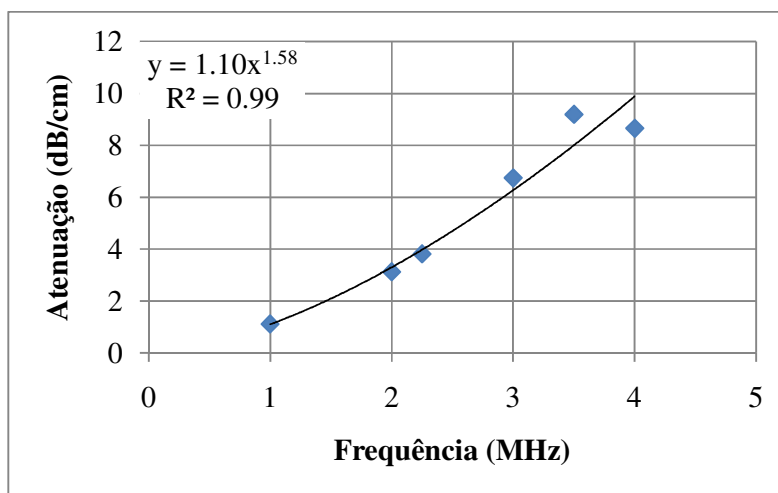


Figura 18. Curva de regressão potencial (linha de tendência) da atenuação do *phantom* de silicone puro em função da frequência. O coeficiente de atenuação  $A = 1,10$  dB.cm<sup>-1</sup>.MHz<sup>-1</sup> pode ser visto no canto superior esquerdo da figura.

## 7.5 INCERTEZA DA MEDIÇÃO DA ATENUAÇÃO

Na Equação 25,  $\alpha$  representa o coeficiente de atenuação acústica no meio,  $A$  e  $A_0$  simbolizam as amplitudes dos sinais (FFT ou RMS) do *phantom* e de referência respectivamente e  $x$ , a espessura do *phantom*. A incerteza padrão da espessura  $x$  é dada pela Equação 13, sendo  $uA(x)$  a incerteza padrão do tipo A obtida por meio da Equação 14 e  $uB(x)$  a incerteza padrão do tipo B, referente à menor divisão do paquímetro utilizado na medição, dada pela Equação 15, considerando-se que as variações na medição da espessura seguem uma distribuição retangular [44].

A incerteza-padrão das amplitudes dos sinais  $A$  e  $A_0$  são calculadas de maneira análoga à Equação 13, sendo a incerteza-padrão do tipo A, o desvio-padrão dividido pela raiz quadrada de  $n$  medições. A incerteza-padrão do tipo B ( $u_V^B$ ) dada pela Equação 29, depende do modelo do osciloscópio e está relacionada com a exatidão do eixo vertical deste, obtida por meio da Equação 30 e Equação 31 para o osciloscópio Agilent conforme manual do equipamento [46], onde  $u_{VD}^B$  é a incerteza do tipo B de tensão devido a digitalização,  $V_{max}$  é a tensão máxima medida no osciloscópio com ajuste de 8 bits digitalização,  $u_{VFS}^B$  é a incerteza Tipo B de tensão chamada "precisão" no manual do fabricante e  $V_{Div}$  representa a escala em "volts por divisão". Para as atenuações medidas utilizando-se o RMS, a incerteza padrão tipo B foi obtida por meio da Equação 32 onde  $n_p$  é o número de pontos utilizados para se obter o valor RMS.

$$u_V^B = \sqrt{(u_{VD}^B)^2 + (u_{VFS}^B)^2} \quad \text{Equação 29}$$

$$u_{VD}^B = \left[ \left( \frac{V_{max}}{2^8} \right) \cdot \frac{1}{2\sqrt{3}} \right] \quad \text{Equação 30}$$

$$u_{VFS}^B = 0.022 \cdot 8 \cdot V_{Div} \quad \text{Equação 31}$$

$$u_{V_{RMS}}^B = \frac{u_V^B}{\sqrt{n_p}} \quad \text{Equação 32}$$

As expressões utilizadas para os cálculos dos coeficientes de sensibilidade, considerando-se a Equação 25, para os valores de atenuação por RMS podem ser vistas da Equação 33 à Equação 35. As utilizadas para atenuação por FFT são as mesmas equações trocando-se o valor 20 por 10 uma vez que foi utilizado o espectro de potência.

$$\frac{\partial \alpha}{\partial A} = \frac{20 \log e}{x \cdot A} \quad \text{Equação 33}$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial A_o} = -\frac{20 \log e}{x \cdot A_o} \quad \text{Equação 34}$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial x} = -\frac{20 \log \frac{A}{A_o}}{x^2} \quad \text{Equação 35}$$

A expressão da incerteza expandida ( $U = k \times u_c$ ) será feita considerando o nível de confiança de 95%. O fator de abrangência  $k$  dependerá dos graus de liberdade efetivos dos mensurandos [44]. Estes graus de liberdade foram calculados por meio da Equação 23.



## 7.6 CALOR ESPECÍFICO

**Calor específico** é uma grandeza física que descreve a variação de temperatura de uma substância ao receber determinada quantidade de calor, ou seja, a quantidade de calor necessária para aumentar de um grau uma unidade de massa deste material. [47] Também é chamado de capacidade térmica mássica e é constante para cada substância em cada estado físico. A unidade no SI é  $\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ , mas também pode ser dada em  $\text{cal.g}^{-1}.\text{°C}^{-1}$  [48].

O DSC (*Differential Scanning Calorimetry*) é um método que pode ser utilizado para determinação do calor específico do *phantom* [49]. Trata-se de um método comparativo em que é necessário controlar a potência térmica fornecida à amostra tendo como referência um material padrão inerte [50].

Nesta técnica, a amostra a ser investigada e um material de referência são aquecidos concomitantemente e submetidos a um programa controlador de temperatura. Geralmente é utilizada uma substância-padrão, com temperatura e calor de fusão bem determinados e padronizados, como a água, o índio (In) ou uma safira [50].

O princípio básico da técnica obedece à categoria de compensação de potência, mantendo-se a diferença de temperatura entre a amostra e a referência constante. O equipamento controla a temperatura da amostra para que ela acompanhe a da referência através de perda ou ganho de calor [50, 51]. Qualquer evento físico-químico que ocorra na amostra (fusão, cristalização, transição vítrea) que envolva a troca de calor com o meio deverá ser compensado com o fornecimento ou retirada de energia para que a diferença temperatura permaneça constante. Desta forma, a técnica fornece uma curva que representa a diferença entre a quantidade de energia entregue para a amostra e a referência, registrada em função da temperatura ou do tempo [50].

O registro da curva de DSC é expresso em termos de fluxo de calor (mW) versus temperatura (°C) ou tempo (minutos). A análise da amostra consiste em utilizar um material de poucos miligramas em uma cápsula de alumínio (panelinha), que é coberta por uma tampa, devendo haver contato máximo entre as superfícies da cápsula e da amostra. A outra panelinha comportará um material padrão. O calor específico varia em

função da temperatura da amostra e é determinado comparando-se as variações de fluxo de calor com a temperatura medida para este material e para uma substância-padrão.

Quando uma amostra é submetida a uma variação linear de temperatura, o calor específico é proporcional à velocidade com a qual o calor atravessa a amostra, de acordo com a Equação 36:

$$\frac{c_{pa}}{c_{ps}} = \frac{Ya}{Ys} \cdot \frac{ms}{ma} \quad \text{Equação 36}$$

onde  $c_{pa}$  é o calor específico do *phantom*,  $c_{ps}$  é o calor específico do material de referência,  $Ya$  é o deslocamento da pena do registrador a uma dada temperatura, demonstrando a variação de fluxo de calor no *phantom*,  $Ys$  é o deslocamento da pena do registrador a uma dada temperatura, demonstrando a variação de fluxo de calor no meio de referência e  $ms$  e  $ma$  são as massas do *phantom* e do material de referência respectivamente. Assim, com estas duas medições, pode-se determinar a razão entre os  $C_p$ .

## 7.7 CONDUTIVIDADE TÉRMICA

**Condutividade térmica** pode ser definida como quantidade de calor  $Q$  transmitida através de uma espessura  $L$ , numa direção normal à superfície de área  $S$ , devido a uma variação de temperatura  $\Delta T$ , sob condições de estado fixo e quando a transferência de calor é dependente apenas da variação de temperatura [52]. Ela pode ser calculada pela Equação 37.

$$k = \frac{Q \cdot L}{S \cdot \Delta T} \quad \text{Equação 37}$$

onde:

$k$ = condutividade térmica ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )

$Q$ = taxa de energia transferida ( $\text{W}$ ) = ( $\text{J} \cdot \text{s}^{-1}$ )

$S$ = área ( $\text{m}^2$ )

$\Delta T$ = diferença de temperaturas ( $\text{K}$ )

$L$ = espessura ( $\text{m}$ )

O método Flash é o mais utilizado para a medição de propriedades térmicas em sólidos, inclusive a condutividade térmica. Foi proposto em 1961 por PARKER *et al.* [53] e em 1992 tornou-se padrão (ASTM 1461-01, 2001) [54]. Nesse método, um pulso de energia de curta duração e alta intensidade incide sobre a superfície frontal de uma amostra onde é absorvido e transmitido. A energia do pulso e a temperatura são medidas na face oposta, obtendo-se a partir do cálculo de PARKER *et al.* (1961), a difusividade térmica do material analisado. A espessura da amostra ( $L$ ) e o tempo necessário para a face oposta alcançar 50% do seu valor máximo de temperatura ( $t_{0.5}$ ) é levada em consideração como mostrado pela Equação 38. Maiores detalhes do processo de obtenção da condutividade térmica podem ser obtidos em Costa, *et al.* (2009) [55].

$$T(L,t) = \frac{Q}{\rho c_p L} \left[ 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \cdot e^{-n^2 \pi^2 \frac{Xt}{L^2}} \right] \quad \text{Equação 38}$$

onde,  $T$  é a temperatura,  $\rho$  é a densidade em  $\text{g/cm}^3$ ,  $c_p$  é o calor específico,  $Q$  a quantidade de calor e  $X$  é a difusividade térmica. A difusividade térmica está relacionada com a condutividade térmica por meio da densidade e do calor específico de acordo com a Equação 39.

$$X = \frac{k}{\rho c_p} \quad \text{Equação 39}$$

## 8 SOFTWARE DE AQUISIÇÃO E CÁLCULO DOS PARÂMETROS ACÚSTICOS

O programa desenvolvido em Labview 2009, AcousticTrans, apresenta 4 abas distintas: 1) FFT, 2) RMS, 3) Ua (Incerteza da atenuação) e 4) Uv (Incerteza da velocidade). Antes de executar o programa, o usuário deve inserir: a espessura do *phantom* d (cm), a temperatura da água Tref(°C) que será utilizada para se calcular a velocidade do som na água VH2O (m.s<sup>-1</sup>), número de testes que pretende executar (Ntest) e a técnica empregada (Tecnic), TOCANDO, AFASTADO APARENTE ou AFASTADO REAL. Os termos “APARENTE” e “REAL” dizem respeito somente à equação matemática utilizada para se calcular a atenuação. Sendo empregada a Equação 25 para o caso de AFASTADO APARENTE, e a Equação 26 para o caso de AFASTADO REAL. Se a técnica empregada for AFASTADO REAL, o usuário deve preencher também a densidade do *phantom* d Phan (g.cm<sup>-3</sup>) que será utilizada para se calcular a impedância acústica do *phantom* e compensar a reflexão nas interfaces (Figura 19).

No canto superior esquerdo da aba FFT do programa (Figura 19), são vistos os sinais de referência (em branco) e do *phantom* (amarelo) ao longo do tempo. Acima destes estão seus respectivos número de pontos (SIZE) e frequência de amostragem SRate (MS/s). No gráfico à esquerda, podem ser vistos os espectros de potência dos sinais (Referência em verde e *phantom* em azul) obtidos por meio de FFT. Os pontos referentes à -3 dB do pico do maior sinal são frisados por marcadores.

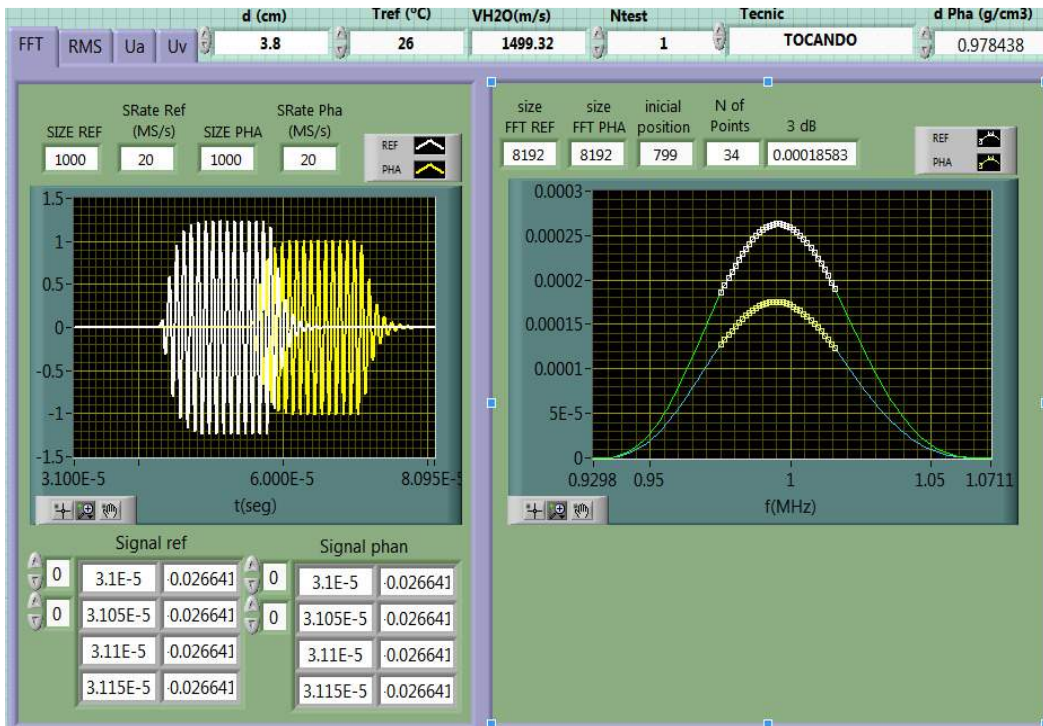


Figura 19 - Aba **FFT** do programa AcousticTrans (Labview 2009). No gráfico à esquerda estão os sinais de referência (branco) e do *phantom* (amarelo). A direita superior, os respectivos módulos das FFTs dos sinais (ordenada arbitrária), com o trecho correspondente a -3 dB destacado.

Na aba **RMS** do programa AcoustiTrans (Figura 20), novamente são apresentados na parte superior os gráficos dos sinais de referência (à esquerda) e do *phantom* (à direita). Acima destes são encontrados os indicadores com as frequências centrais (freq ref e freq pha), os tempos de início dos sinais (To Ref e To Pha), tempos e amplitudes de picos dos sinais quando se utiliza a ferramenta *peak detect* (tp ref, Ap re, tp pha e Ap pha). *Threshold* (V) são controladores utilizados para indicar o limiar de detecção dos primeiros picos dos sinais de referência (tp ref) e do *phantom* (tp pha) e estão padronizados em 0,1 v e podem ser alterados digitando valores nestes quadros.

Os dois tempos (tp ref e tp pha) em segundos são utilizados para se calcular o  $\Delta t$  aplicado nas equações da velocidade longitudinal (técnicas TOCANDO e AFASTADO) por meio da técnica PeakDetect (Vel PD) apresentada na região inferior esquerda da Figura 20. Outra forma de se detectar o  $\Delta t$  entre os dois sinais é por meio da correlação cruzada (*Cross Correlation Function*). O valor da velocidade quando se emprega esta

função pode ser visto na porção inferior esquerda do programa como Vel Corr (m.s<sup>-1</sup>). Abaixo do gráfico direito está o botão que ativa os cursores. Note que enquanto desligado (Figura 20, CURSOR OFF, seta vermelha) os cursores representados como linhas verticais (vermelha e rosa) aparecem nas extremidades dos gráficos.

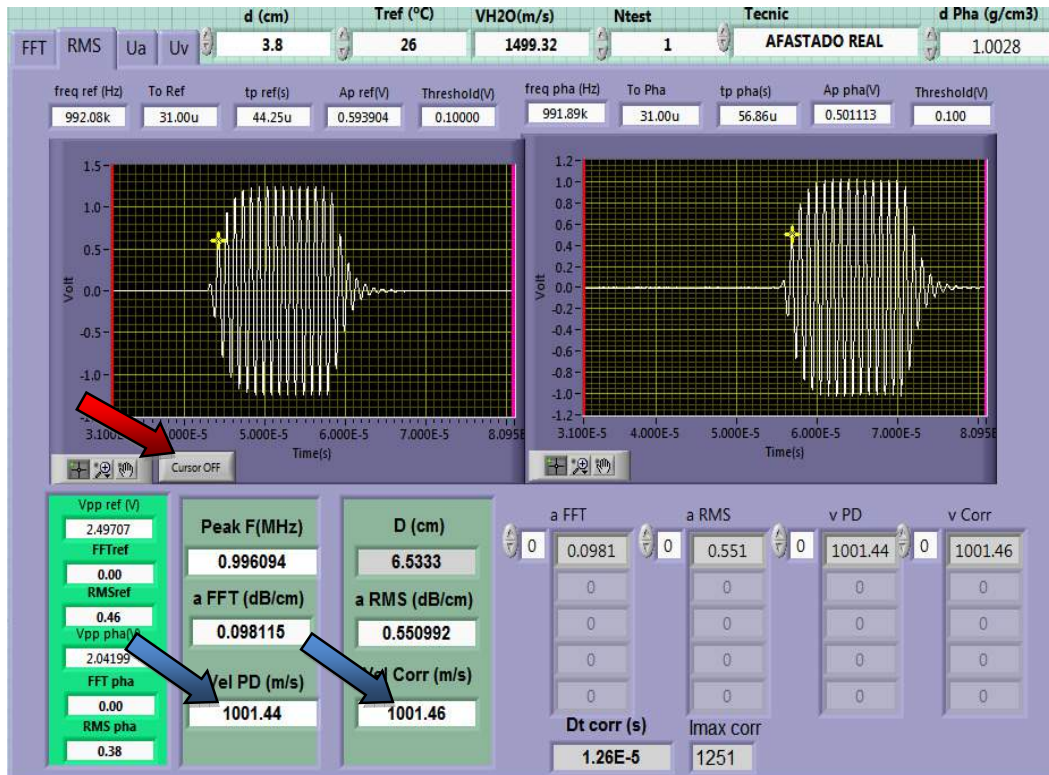


Figura 20. Tela RMS do software AcousticTrans (Labview 2009). Na parte superior estão os gráficos dos sinais de referência (esquerda) e do *phantom* (direita). Setas azuis indicam os valores de velocidade determinados usando-se as técnicas *PeakDetect* e *Cross Correlation*.

Quando ativados (Figura 20, CURSOR ON) os dois cursores livres podem ser utilizados pelo usuário para selecionar o início (cursor vermelho) e o fim (cursor rosa) do trecho do sinal que será utilizado para se calcular o valor quadrático médio (RMS ref e RMS pha indicados no canto inferior esquerdo), a serem empregados na equação da atenuação do *phantom* (Figura 21). Os valores da atenuação do *phantom* tanto pela FFT (aFFT) quanto pelo valor RMS (aRMS) em dB.cm<sup>-1</sup> podem ser vistos logo acima dos valores de velocidade (Figura 21).

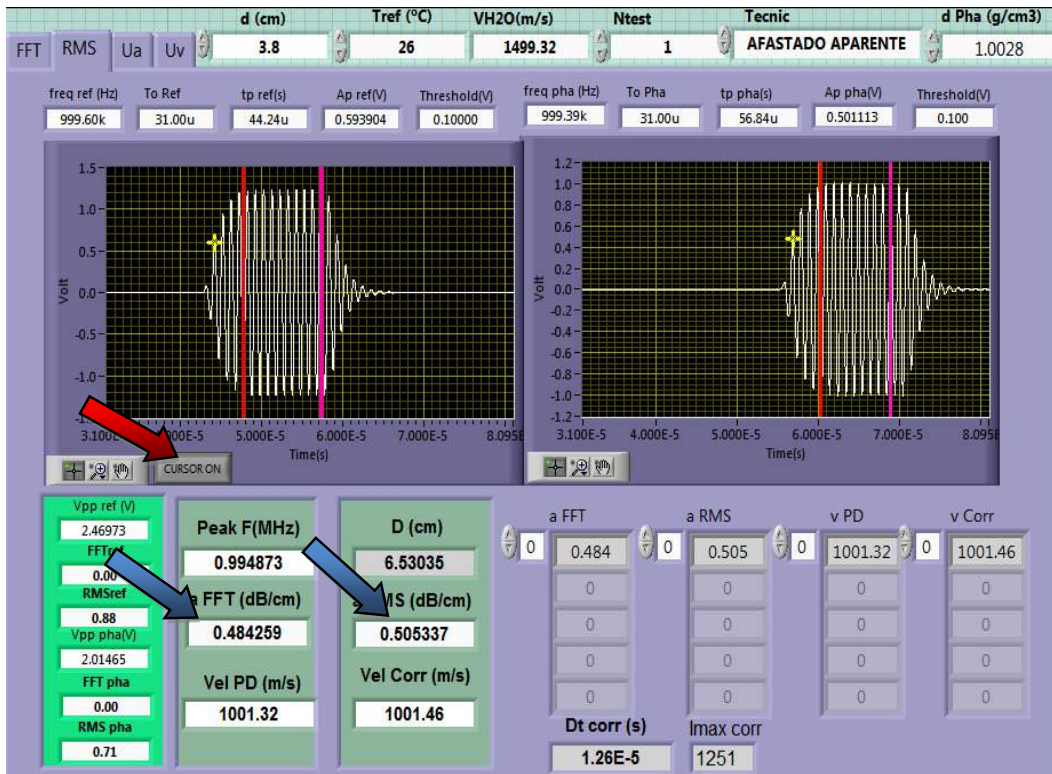


Figura 21. Tela RMS do software AcousticTrans (Labview 2009). Observar cursores livres ativados (CURSOR ON indicado pela seta vermelha) e os cursores marcando o início (vermelho) e final (rosa) do trecho do sinal a ser processado para o cálculo do valor RMS.

A Figura 22 mostra os dados utilizados para se calcular as incertezas tanto por FFT (quadrado verde claro) quando por RMS (quadrado verde escuro). As setas azuis mostram os 5 valores utilizados como  $A_0$  e  $A$  para o cálculo da atenuação pela FFT conforme Equação 25. Logo abaixo deles, em negrito, estão as médias e os respectivos desvios padrões. Com os valores de  $A_0$  e  $A$  são obtidos os valores de 5 atenuações cuja média, o desvio-padrão e a incerteza expandida calculada são apontados pelas setas pretas.

As setas vermelhas mostram os 5 valores utilizados como  $A_0$  e  $A$  para o cálculo da atenuação pelo RMS. Logo abaixo deles, em negrito estão as médias e os respectivos desvios padrões. Com os valores de  $A_0$  e  $A$  são obtidos 5 valores de atenuação cuja média, o desvio-padrão e a incerteza expandida calculada são apontados pelas setas verdes (Figura 22).



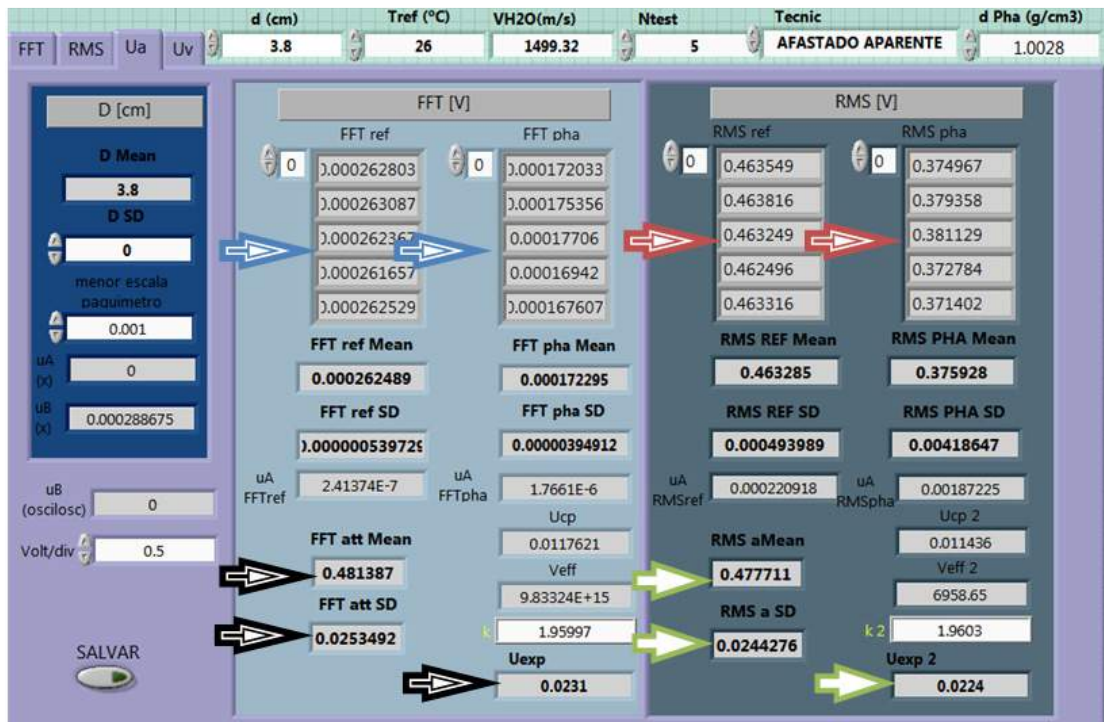


Figura 22. Tela Ua do software AcousticTrans mostrando os valores encontrados para se expressar a incerteza da atenuação.

A página Uv (incerteza da medição da velocidade) ainda não foi desenvolvida em Labview, sendo os cálculos para a medição desta incerteza realizados em uma planilha em Excel ®.

## 9 RESULTADOS E DISCUSSÕES SOBRE AS TÉCNICAS DE MEDIÇÃO DA VELOCIDADE E DA ATENUAÇÃO

A título de comparação das técnicas de medição da velocidade longitudinal e atenuação, serão apresentados neste capítulo, somente os resultados das velocidades do *Phantom 31* (silicone + óleo de silicone 40%) por ser o *phantom* de maiores dimensões entre os usualmente confeccionados, o que permite a análise por meio de um sinal Burst senoidal com um maior número de ciclos, e cujo método de confecção, mais apurado, permitiu um maior grau de homogeneidade e paralelismo de suas arestas (Figura 23).

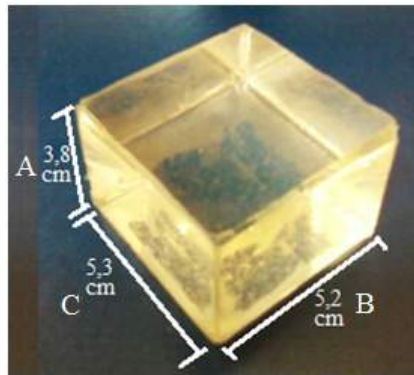


Figura 23. Fotografia de *Phantom 31* com suas arestas e dimensões em cm.

### 9.1 VELOCIDADE

Os resultados encontrados para a velocidade longitudinal utilizando-se tanto a técnica **pulso/eco AFASTADO** como a **pulso/eco TOCANDO**, ambas por *PEAK DETECT*, apresentaram um valor para o *phantom* próximo aos descritos na literatura de 1.080 m/s [56], porém, significativamente diferentes entre si ( $p\text{-valor} < 0,01$ ) quando se aplica o teste  $t$  como pode ser visto na Tabela 16.

Tabela 16. Resultados da análise estatística Teste  $t$  para duas amostras presumindo variâncias diferentes das medições da velocidade longitudinal pelas técnicas pulso/eco AFASTADO e TOCANDO.

PULSO/ECO	<i>TOCANDO</i>	<i>AFASTADO</i>
Média	1001,58	1099,39
Variância	3,44	4,70
Observações	10	24
Hipótese testada	0	
Graus de liberdade	20	
Estatística teste $t$	-133,22	
<b>P(T&lt;= <math>t</math>) bi-caudal</b>	<b>5,76 10<sup>-31</sup></b>	
t crítico bi-caudal	2,84	

\*

diferença significativa para  $p \leq 0,01$

Utilizando-se o método **Transmissão/Recepção** paralelamente ao desenvolvimento do sistema de medição foi implementada a estimativa da incerteza expandida. O valor esperado foi obtido por meio das médias de 30 amostras dos valores da Equação 12 para o método **Transmissão/recepção** empregando a técnica **TOCANDO** e da Equação 9 para a técnica **AFASTADO**. O valor esperado da velocidade de propagação da onda longitudinal no *phantom* para os dois métodos analisados, bem como as respectivas incertezas expandidas, são apresentados na Tabela 17. Os resultados são referentes a uma onda ultrassônica propagando-se ao longo das arestas A de 3,8 cm e B de 5.27 cm (Figura 15 e Figura 23) e em três diferentes frequências (1 MHz, 2,25 MHz e 5 MHz). A título de ilustração, estão apresentados na Tabela 18 os valores dos componentes de incerteza utilizados para calcular a incerteza expandida, para a Aresta A do *phantom* a 1 MHz, no modo TOCANDO.

Tabela 17. Valor esperado e a incerteza expandida (U) da velocidade de propagação do ultrassom ao longo das arestas A e B do *phantom* a 1 MHz, 2,25 MHz e 5 MHz.

TÉCNICA	Frequência (MHz)	Aresta A		Aresta B	
		Valor esperado (m/s)	U (m/s)	Valor Esperado (m/s)	U (m/s)
AFASTADO	1	1022,0	3,6	1023,1	1,1
	2,25	1024,9	3,5	1025,4	1,4
	5	1027,7	3,6	1022,7	1,4
TOCANDO	1	1047,19	0,66	1042,18	0,20
	2,25	1038,06	0,38	1037,95	0,18
	5	1037,81	0,16	1037,4	1,2

Tabela 18. Valores da incerteza padrão ( $u_i$ ), coeficiente de sensibilidade (c.s.) e a contribuição da incerteza-padrão (C.I.) da velocidade de propagação de uma onda ultrassônica (1 MHz) no *phantom* (Aresta A), técnica TOCANDO. Cálculo da incerteza expandida (U).

PARÂMETRO	Valores da incerteza padrão			Cálculo da incerteza expandida (U)	
	$u_i$	c.s.	C. I.		
$v_{ref}$ [m/s] tipo A	$4,22 \times 10^{-14}$	0,71	$2,98 \times 10^{-14}$	$u_c$	0,28
$t_{ref}$ [s] tipo A	$5,67 \times 10^{-4}$	37,90	$2,15 \times 10^{-2}$	$v_{eff}$	30,40
$t_{ref}$ [s] tipo B	$7,85 \times 10^{-4}$		$2,97 \times 10^{-2}$	$k$	2,36
$t_{ph}$ [s] tipo A	$1,03 \times 10^{-2}$	26,70	$2,74 \times 10^{-1}$ *	U (95%)	0,66
$t_{ph}$ [s] tipo B	$7,85 \times 10^{-4}$		$2,09 \times 10^{-2}$		

\*Maior contribuição: tempo de pico no phantom – relacionado com espessura da amostra.

O teste de Kruskal-Wallis aplicado às populações de velocidade da onda dos diferentes grupos (AFASTADO X TOCANDO) evidencia que as amostras têm origens diferentes ( $p$ -valor < 0,0001), ou pelo menos existe um grupo que difere dos demais. Para se determinar quais amostras diferem entre si, foi realizado o “teste a posteriori de Dunn” apresentado na Tabela 19 (baseada em distribuição  $t$  de *Student* e na desigualdade de *Bonferroni*). A hipótese nula testada foi de que não há diferença entre

os grupos, a um nível de significância dado por  $\alpha_c = \alpha/k_i$  ( $\alpha_c = 0,0033$ ), com  $\alpha = 0,05$  e  $k_i$  o número de comparações. Por exemplo, na Tabela 19, observa-se que as médias das velocidades a 1,0 MHz da aresta A (v1A) e das velocidades de 1 MHz da aresta B (v1B) não diferem entre si (zero em negrito). O mesmo não acontece quando se comparam v1A com v5B (velocidades a 5 MHz na aresta B) pelo valor 1 em negrito.

Tabela 19. Teste de Dunn aplicado à população da velocidade, com as técnicas AFASTADO e TOCANDO. Rejeita (1) ou não (0) a hipótese nula.  $\alpha_c = 0,0033$ .

		v1A	v2,25A	v5A	v1B	v2,25B	v5B
<b>AFASTADO</b>	<b>v1A</b>	0	1	1	<b>0</b>	1	<b>1</b>
	<b>v2,25A</b>	1	0	1	0	1	1
	<b>v5A</b>	1	1	0	1	1	0
	<b>v1B</b>	<b>0</b>	0	1	0	1	1
	<b>v2,25B</b>	1	1	1	1	0	1
	<b>v5B</b>	<b>1</b>	1	0	1	1	0
	<b>TOCANDO</b>	<b>v1A</b>	0	1	1	0	1
<b>v2,25A</b>		1	0	1	1	0	0
<b>v5A</b>		1	1	0	1	0	0
<b>v1B</b>		0	1	0	0	1	1
<b>v2,25B</b>		1	0	0	1	0	1
<b>v5B</b>		1	0	0	1	1	0

Estes resultados mostram uma maior discordância entre os valores de velocidade para a técnica AFASTADO do que para a técnica TOCANDO, o que pode ser um indício de que esta técnica pode sofrer menos oscilações do que aquela.

## 9.2 DISCUSSÃO: TÉCNICAS DE MEDIÇÃO DA VELOCIDADE

As técnicas pulso/eco AFASTADO e TOCANDO apresentaram valores de velocidade longitudinal próximos aos descritos na literatura e baixo coeficiente de variação (C.V.), porém, diferem significativamente entre si ( $p \geq 0,01$ ) quando se aplica o Teste  $t$  para as médias de duas amostras conforme Tabela 16.

Um dos pontos críticos para o aprimoramento da técnica de medição da velocidade no *phantom* é assegurar a repetitividade da montagem experimental. Isso inclui, entre outros, a construção do *phantom* (o paralelismo entre suas arestas) e seu alinhamento com o feixe dos transdutores (paralelismo entre as arestas do *phantom* e as faces dos transdutores). Buscou-se minimizar essas fontes de erro para o método **transmissão/recepção** da seguinte forma: (i) para a técnica AFASTADO: utilizou-se um trilho perpendicular ao feixe dos transdutores (fixos), que possui um suporte permitindo deslizar o *phantom* fixado a ele, isto permite repetir as medições na mesma posição; (ii) para a técnica TOCANDO: os transdutores foram mantidos fixos a uma distância entre si equivalente a espessura do *phantom* por meio de um molde, permitindo que se retirasse e se recolocasse o *phantom* sempre na mesma posição sem pressionar as suas faces.

O teste de Kruskal-Wallis faz uma avaliação global mostrando que as populações de amostras têm origens diferentes (AFASTADO X TOCANDO). E a comparação múltipla (teste de Dunn) evidencia qual ou quais dos grupos das amostras da velocidade diferem.

Observa-se, na Tabela 17, que a incerteza expandida da velocidade de propagação no *phantom* é maior para o método AFASTADO. Por exemplo, para uma frequência de 2,25 MHz o AFASTADO apresenta  $v_{pha} = 1024,9 \text{ ms}^{-1}$  ( $U = 3,5 \text{ ms}^{-1}$ ), já para o TOCANDO este valor é de  $1038,06 \text{ ms}^{-1}$  ( $U = 0,38 \text{ ms}^{-1}$ ). Essa diferença pode ter ocorrido por que a técnica AFASTADO contém mais fontes de incerteza. Além disso, a variação do tempo de voo do sinal transmitido por  $T_x$ , devido provavelmente a ausência de paralelismo entre as faces dos transdutores e as do *phantom* no método AFASTADO. O valor de velocidade de propagação da onda longitudinal no silicone puro encontrado na literatura é de  $1080 \text{ ms}^{-1}$  [56], entretanto, a referência não menciona a metodologia

empregada nem tão pouco a incerteza das medições. Existe uma grande necessidade de um Material de Referência Certificado (MRC) que possa ser utilizado para validar a metodologia, o que não foi encontrado até o presente momento.

Em geral, os resultados das pesquisas são expressos na forma de valor médio  $\pm$  desvio-padrão [40]. Poucos pesquisadores expressam o valor esperado acompanhado da incerteza de medição [38, 57].

Foi apresentada a estimativa do valor esperado da velocidade de propagação da onda longitudinal no *phantom*, para as duas técnicas conhecidas e usuais na literatura, com suas respectivas incertezas. Essa quantificação, representada pela incerteza expandida, permite avaliar a confiabilidade dos resultados. É extremamente útil quando há limites de tolerância (máximo ou mínimo) para a velocidade, o que é fundamental na aceitação ou não de materiais que mimetizam as propriedades acústicas do meio biológico.

Os valores esperados para a velocidade e suas incertezas expandidas evidenciaram que a técnica TOCANDO se apresentou mais promissora, como era esperado, já que a equação a ela associada é mais simples, gerando, portanto menos coeficientes de sensibilidade.

### 9.3 ATENUAÇÃO

Os resultados iniciais para medição da atenuação dos *phantoms* por meio do método **pulso/eco AFASTADO** conforme Figura 13 não foram satisfatórios. Além de uma grande instabilidade por parte dos posicionadores e suportes, havia uma dúvida quanto ao valor real da atenuação do *phantom* devido à reflexão nas interfaces água/*phantom* e *phantom*/refletor. Devido à dificuldade de se medir a impedância acústica inicialmente, o coeficiente de atenuação continha as reflexões embutidas no seu valor (Atenuação Aparente). Posteriormente, uma técnica para se estimar o valor da impedância acústica do *phantom* foi implementada (7.3 IMPEDÂNCIA ACÚSTICA) e pôde-se então corrigir a reflexão nas faces água/*phantom* e *phantom*/água por meio da Equação 26 (Atenuação Real). Os valores encontrados para a Atenuação Real e Aparente podem ser vistos na Tabela 20. Nota-se que os valores para Atenuação Real são significativamente menores do que os para Atenuação Aparente, e diferentes entre FFT e RMS, além disso, o coeficiente de variação (C.V.) é muito maior.

Tabela 20. Resultados da atenuação do *Phantom* 31 (silicone + óleo de silicone 40%) pela técnica pulso/eco AFASTADO.

<i>PHANTOM</i> 31	Atenuação Aparente (dB.cm <sup>-1</sup> )		Atenuação Real (dB.cm <sup>-1</sup> )	
	$\alpha$ FFT	$\alpha$ RMS	$\alpha$ FFT	$\alpha$ RMS
<b>Média</b>	0,42	0,41	0,17	0,10
<b>D.P.</b>	0,06	0,06	0,06	0,05
<b>C.V.</b>	14,93%	15,02%	38,30%	56,47%

O método **pulso/eco** por meio do contato direto do *phantom* com o transdutor (TOCANDO) foi testado para se evitar a reflexão na primeira face e maximizar a reflexão na segunda, entretanto, esta técnica não utiliza a água como meio de transmissão da onda, somente o *phantom* (Figura 14). Para se ter dois sinais, (Sr e Sp) foram utilizados dois *phantoms* confeccionados pela mesma técnica, com diferentes espessuras ou um *phantom* com dois lados de dimensões diferentes, como foi o caso do *Phantom* 31 (Figura 23) onde o menor lado (A = 3,8cm) foi utilizado como referência (Sr) e o maior lado (B = 5.2 cm) como sinal do *phantom* (Sp). No lugar da espessura  $x$



da Equação 25 utilizou-se o dobro (ida e volta) da diferença de espessura entre os lados A e B ( $2 \cdot \Delta x = 2 \cdot 1,40 = 2,80$  cm). Esta técnica também não apresentou bons resultados, pois, os desvios-padrão apresentaram-se elevados, atingindo um coeficiente de variação (C.V.) de até 26% (Tabela 21).

Tabela 21. Resultados dos valores de atenuação ( $\text{dB} \cdot \text{cm}^{-1}$ ) de 10 testes com Phantom 31 de silicone RTV615 + óleo de silicone 40% a 1 MHz pela técnica pulso/eco TOCANDO.

<b>PHANTOM 31</b>	<b>ATENUAÇÃO PULSO/ECO TOCANDO</b>	
	<b><math>\alpha</math> FFT (<math>\text{dB} \cdot \text{cm}^{-1}</math>)</b>	<b><math>\alpha</math> RMS (<math>\text{dB} \cdot \text{cm}^{-1}</math>)</b>
<b>Média</b>	1,37	1,36
<b>D.P.</b>	0,36	0,35
<b>C.V.</b>	26,07%	25,69%

A partir de então, com o auxílio de transdutores pareados, passou-se a empregar o método **Transmissão/recepção**. Durante o processo de desenvolvimento do *setup* experimental para aplicação deste método, deparou-se com diferentes técnicas para medição da atenuação do *phantom*. Assim como para a medição da velocidade, testou-se a técnica TOCANDO para se reduzir as reflexões nas interfaces e AFASTADO. Neste, as reflexões devido à diferença de impedâncias acústicas entre a água e o *phantom* foram compensadas utilizando-se a Equação 26 (ATENUAÇÃO REAL). Sem compensar estas reflexões empregou-se a Equação 25 (ATENUAÇÃO APARENTE). Além disso, pôde ser verificada também a diferença entre o cálculo da atenuação utilizando o RMS e a FFT dos sinais. Os resultados podem ser vistos na Tabela 22. Note que os valores para a técnica TOCANDO e AFASTADO APARENTE apresentaram-se próximos apesar de a diferença entre eles ter sido significativa pelo teste ANOVA ( $p = 0,003$ ;  $\alpha = 0,05$ ). Mais uma vez, os valores das médias da atenuação para AFASTADO REAL foram menores do que aqueles empregando as demais técnicas.

Das técnicas que foram analisadas, aquela que apresentou menor coeficiente de variação e incerteza expandida foi a Transmissão/Recepção AFASTADO APARENTE. A incerteza padrão da técnica AFASTADO REAL não foi estimada.

Tabela 22. Resultados da atenuação do *Phantom* 31 (silicone + óleo de silicone 40%) pela técnica transmissão/recepção TOCANDO, AFASTADO APARENTE e AFASTADO REAL a 1 MHz.

<i>PHANTOM</i> 31	TRANSMISSÃO/RECEPÇÃO 5 CICLOS					
	TOCANDO		AFASTADO APARENTE		AFASTADO REAL	
	$\alpha$ FFT (dB.cm <sup>-1</sup> )	$\alpha$ RMS (dB.cm <sup>-1</sup> )	$\alpha$ FFT (dB.cm <sup>-1</sup> )	$\alpha$ RMS (dB.cm <sup>-1</sup> )	$\alpha$ FFT (dB.cm <sup>-1</sup> )	$\alpha$ RMS (dB.cm <sup>-1</sup> )
<b>N de testes</b>	30	30	30	30	30	30
<b>Média</b>	0,57	0,61	0,67	0,65	0,18	0,35
<b>D.P.</b>	0,14	0,15	0,06	0,06	0,06	0,06
<b>C.V.</b>	0,24	0,24	0,09	0,09	0,36	0,17
<b>Uexp</b>	0,049	0,053	0,022	0,021	—	—

Para se verificar a repetitividade entre dois testes, foram coletados 10 sinais de cada (Referência e *Phantom*) pela técnica Transmissão/recepção AFASTADO APARENTE (Experimento 1). Posteriormente todos os aparelhos foram desligados, os transdutores retirados e o sistema de posicionamento (trilhos) desmontados. Após um minuto, todo aparato foi remontado, os transdutores posicionados à mesma distância que o experimento anterior (6 cm), os equipamentos religados e o mesmo número de sinais coletados (Experimento 2). Não houve diferença significativa entre as médias dos valores de atenuação dos quatro grupos analisados (Tabela 23) de acordo com o teste Anova ( $p = 0,83$ ,  $\alpha = 0,05$ ) indicando uma boa repetitividade do sistema.

Tabela 23. Análise da repetitividade entre dois experimentos pela técnica transmissão/recepção AFASTADO APARENTE com 10 ciclos.

<i>PHANTOM 31</i>	EXPERIMENTO 1		EXPERIMENTO 2	
	$\alpha$ FFT (dB.cm <sup>-1</sup> )	$\alpha$ RMS (dB.cm <sup>-1</sup> )	$\alpha$ FFT (dB.cm <sup>-1</sup> )	$\alpha$ RMS (dB.cm <sup>-1</sup> )
<b>N de testes</b>	10	10	10	10
<b>Média</b>	0,56	0,55	0,58	0,58
<b>D.P.</b>	0,09	0,07	0,06	0,07
<b>C.V.</b>	0,16	0,13	0,11	0,12
<b>Uexp</b>	0,057	0,044	0,038	0,043

A influência do número de ciclos no sinal gerado pela técnica transmissão/recepção AFASTADO APARENTE foi verificada. Percebe-se que o aumento do número de ciclos reduziu consideravelmente o coeficiente de variação e a incerteza (Tabela 24).

Tabela 24. Análise da influencia do número de ciclos na incerteza das medições pela técnica transmissão/recepção AFASTADO APARENTE.

AFASTADO APARENTE <i>PHANTOM 31</i>	10 CICLOS		20 CICLOS	
	$\alpha$ FFT (dB.cm <sup>-1</sup> )	$\alpha$ RMS (dB.cm <sup>-1</sup> )	$\alpha$ FFT (dB.cm <sup>-1</sup> )	$\alpha$ RMS (dB.cm <sup>-1</sup> )
<b>N de testes</b>	10	10	10	10
<b>Média</b>	0,58	0,58	0,46	0,46
<b>D.P.</b>	0,06	0,07	0,02	0,02
<b>C.V.</b>	0,11	0,12	0,04	0,04
<b>Uexp</b>	0,038	0,043	0,0100	0,0097

Pode-se observar também que aumentando o número de ciclos, o espectro de potência tende a representar melhor o sinal na frequência que se pretende calcular a atenuação. Na Figura 24 são representadas 3 situações reais de sinais coletados com diferentes números de ciclos. Na Figura 24A à esquerda são vistos os sinais de referência (branco) e do *phantom* (amarelo) com 05 ciclos, e à direita o gráfico do espectro de potência mostrando certa irregularidade no espectro do *phantom* (azul). Na

Figura 24, B e C são mostrados os sinais e seus espectros de potência com 10 e 20 ciclos respectivamente. Note que os espectros de potência dos sinais com 20 ciclos apresentam maior energia a 1 MHz.

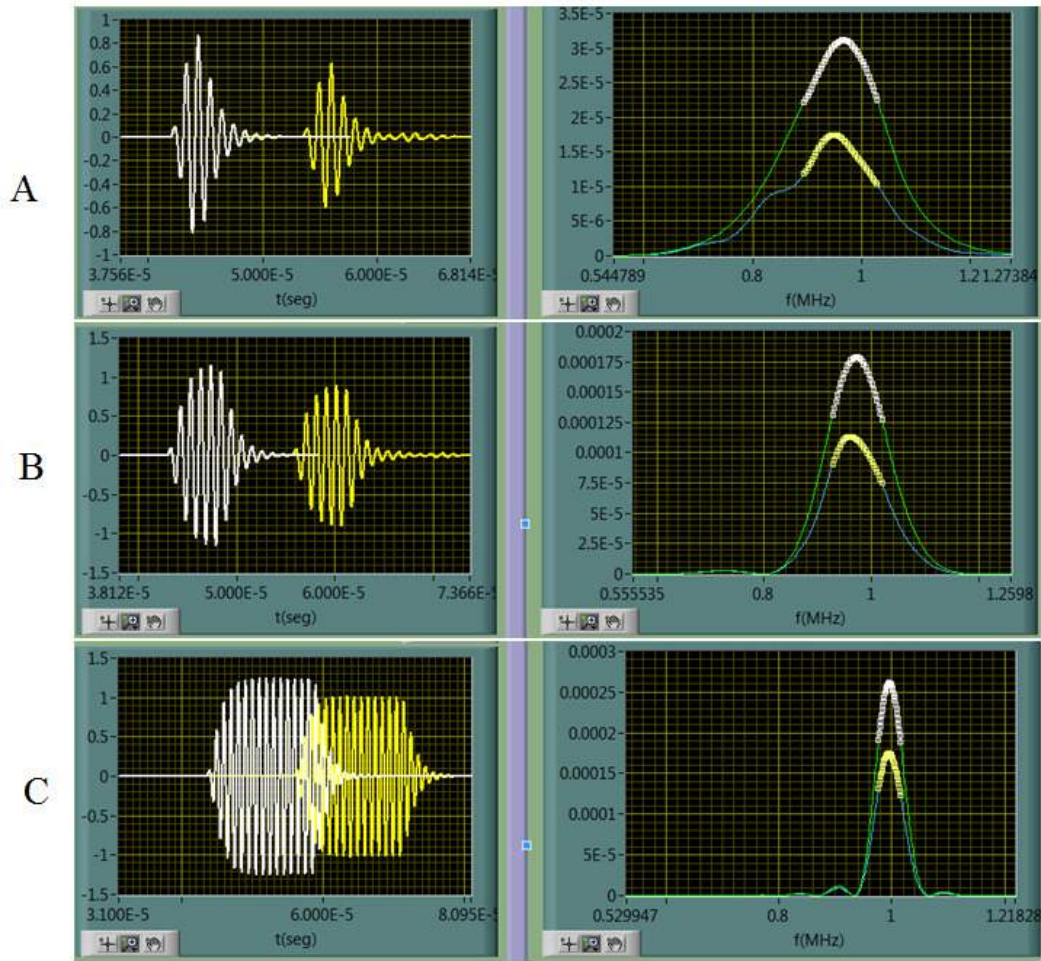


Figura 24. Influência do número de ciclos no espectro de potência. A) Sinais com 05 ciclos, B) sinais com 10 ciclos e C) sinais com 20 ciclos.

Então, para se verificar se existe diferença significativa entre os valores das médias das atenuações por FFT ou RMS usando 20 ciclos pela técnica transmissão/recepção AFASTADO APARENTE, foi realizado o teste  $F$  ( $\alpha = 0,05$ ). Não existe diferença significativa, pois o valor calculado  $F$  (1,06) é menor que o valor tabelado  $F_{crítico}$  (5,35) como pode ser visto na Tabela 25.

Tabela 25. Teste-F: duas amostras comparando atenuação FFT e RMS usando 20 ciclos pela técnica transmissão/recepção AFASTADO APARENTE.

	$\alpha$ FFT (dB.cm <sup>-1</sup> )	$\alpha$ RMS (dB.cm <sup>-1</sup> )
Média	0,462	0,458
Variância	0,000	0,000
Observações	10	10
Graus de liberdade	9	9
F	<u>1,068</u>	
P(F<=f) uni-caudal	0,462	
F crítico uni-caudal	<u>5,351</u>	

A análise do comportamento do valor da atenuação em função do tempo após a inserção do *Phantom* 31 (silicone + óleo de silicone 40%) que estava em temperatura ambiente (24° C) no tanque acústico com água a uma temperatura um pouco inferior (19°C) chama a atenção para o fato de que este demora cerca de 30 minutos para se estabilizar, apresentando uma elevação do valor da atenuação nos primeiros 5 minutos e posteriormente uma queda leve (Figura 25). Isso significa que antes da medição do valor da atenuação deste tipo de *phantom*, este deve estar pelo menos 30 minutos mergulhando no tanque para sua temperatura se equilibrar com a da água. Este tempo vale para os phantom de silicone e óleo de silicone 40%, e pode variar em função do material. Assim, é importante que para cada phantom estudado, este ensaio deve ser realizado para determinação do tempo de estabilização.

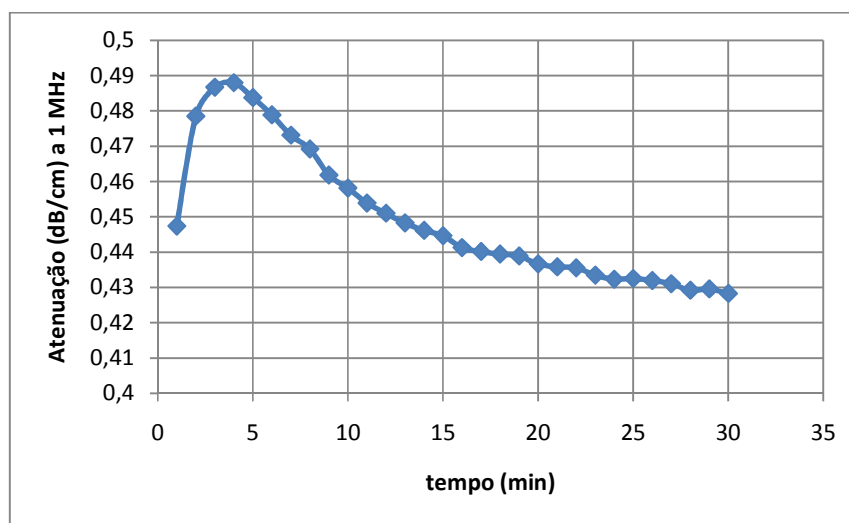


Figura 25. Comportamento térmico da atenuação do *phantom* nos primeiros 30 minutos após mergulhado no meio (água) com menor temperatura a 19°C.

## 9.4 DISCUSSÃO: TÉCNICAS DE MEDIÇÃO DA ATENUAÇÃO

Quatro técnicas foram testadas de acordo com a Figura 12. As medições realizadas pela técnica Pulso/Eco quando foram testadas, apresentaram elevado coeficiente de variação, provavelmente devido à grande instabilidade sistema de montagem (hastes e posicionadores do transdutor) e à dificuldade em se alinhar o transdutor com o refletor. Outro fator que deve ter contribuído para o elevado coeficiente de variação foi o gerador de sinais utilizado nestes experimentos (placa MATEC TB1000), pois este gerava apenas um sinal de pulso e de elevada amplitude o que distorcia o sinal e dificultava a análise pela FFT.

A Técnica que apresentou menor desvio-padrão para a medição da atenuação foi a transmissão/recepção AFASTADO. Não houve diferença significativa entre as médias dos valores de atenuação dos quatro grupos analisados (Tabela 23) utilizando-se esta técnica com 10 ciclos de acordo com o teste Anova ( $p = 0,83$ ,  $\alpha = 0,05$ ) indicando uma boa repetitividade do sistema. Pôde-se observar também que aumentando o número de ciclos, o espectro de potência tende a representar melhor o sinal na frequência, acredita-se que isso reduza a incerteza da medição da atenuação ao menos por FFT. Usando-se 20 ciclos por esta técnica, não foi observada diferença significativa entre as médias dos valores de atenuação por RMS e FFT.

Conclui-se então que a técnica transmissão/recepção AFASTADO APARENTE apresenta uma menor incerteza, entretanto, devido ao fato de não se corrigir as reflexões nas interfaces água/*phantom*/água o valor considerado para o *phantom* pode estar superestimado. Para *phantoms* cuja impedância acústica é semelhante ao da água, esta técnica pode ser utilizada, porém, para *phantoms* com impedância diferente, acredita-se ser necessário buscar formas de compensar as reflexões e ao mesmo tempo reduzir a incerteza das medições.

## 10 RESULTADOS E DISCUSSÕES SOBRE AS PROPRIEDADES ACÚSTICAS DOS *PHANTOMS*

### 10.1 INTRODUÇÃO

Devido à grande variedade de *phantoms* produzidos e à complexidade de suas propriedades acústicas analisadas, os resultados dos *phantoms* serão aqui apresentados em dois tópicos: a) Silicone, onde serão apresentados os resultados dos *phantoms* a base de silicone (RTV615) que apresentaram os resultados mais promissores, b) PVCP, onde serão exibidos os resultados dos *phantoms* a base de PVCP puro e misturados com outras substâncias.

A organização estrutural dos resultados de cada *phantom* seguirá uma ordem de acordo com a Figura 26 onde primeiramente serão apresentados os resultados da atenuação a 1 MHz em função do tempo de vida. Posteriormente, serão apresentados os resultados das velocidades de cada *phantom* em função do tempo. Sempre que possível, comparando os resultados dos *phantoms* compostos (misturados com alguma substância) com os puros (RTV615 e PVCP). Por fim, serão apresentados os resultados dos coeficientes de atenuação “ $\alpha(f)$ ” de todo o conjunto de *phantoms* de acordo como descrito no item 7.4 por meio da regressão potencial da atenuação em função da frequência, bem como a variação da velocidade em função da frequência destes.

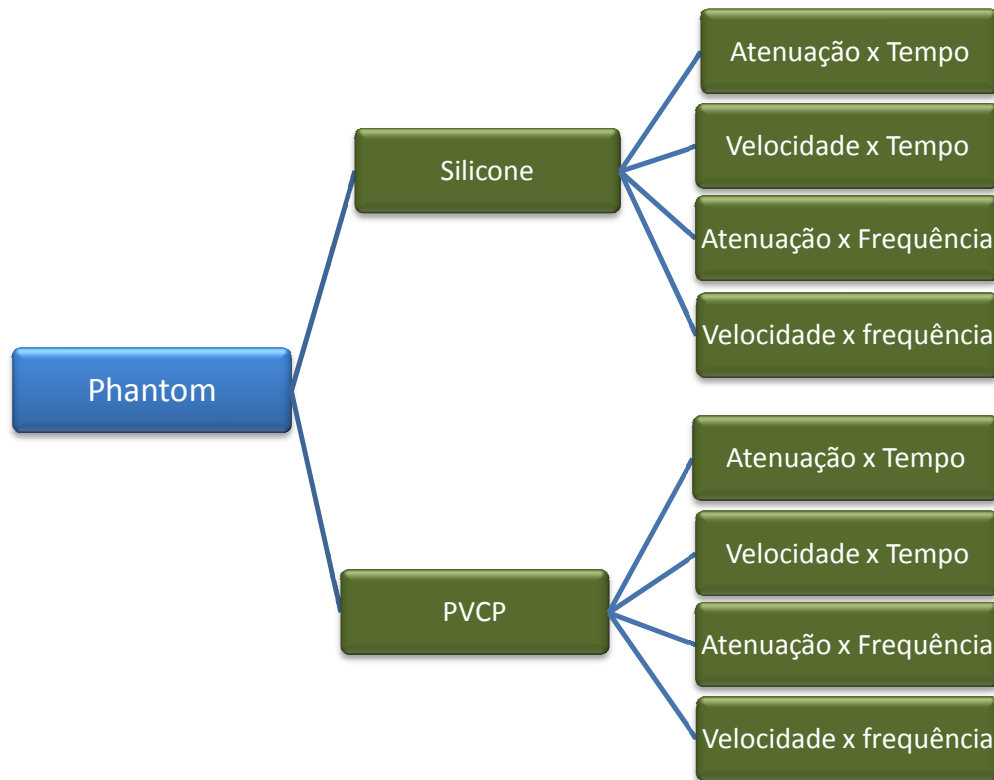


Figura 26. Organização estrutural dos resultados das propriedades acústicas dos phantoms a base de silicone e PVC.



## 10.2 PHANTOMS A BASE DE SILICONE

Conforme já mencionado, foram produzidos e testados cerca de 20 *phantoms* diferentes à base de silicone. A Tabela 12 lista estes *phantoms*, puros ou misturados com substâncias, suas concentrações e suas respectivas nomenclaturas adotadas. Dos *phantoms* à base de silicone produzidos até o presente momento, 6 foram selecionados por apresentarem faces paralelas, ausência de bolhas de ar e coeficiente de atenuação próximo dos valores de interesse ou elevação acentuada em sua velocidade. O nome, a substância misturada e sua concentração, assim como as respectivas espessuras de cada *phantom* selecionado, podem ser vistos na Tabela 26 e a Figura 27 mostra as fotos de três deles.

Tabela 26 - Composições e Espessuras dos *Phantoms* Analisados.

	<i>Phantom</i>	Espessura (cm)
<b>A</b>	<b>Ph11 RTV puro</b>	2,30
<b>B</b>	<b>Ph7 RTV + óleo de silicone (4%)</b>	1,95
<b>C</b>	<b>Ph14 RTV + óleo de silicone (23%)</b>	2,24
<b>D</b>	<b>Ph15 RTV + óleo de silicone (40%)</b>	3,08
<b>E</b>	<b>Ph12 RTV + vaselina (23%)</b>	2,50
<b>F</b>	<b>Ph22 RTV + glicerina (40%)</b>	2,40

RTV: *Room Temperature Vulcanization*

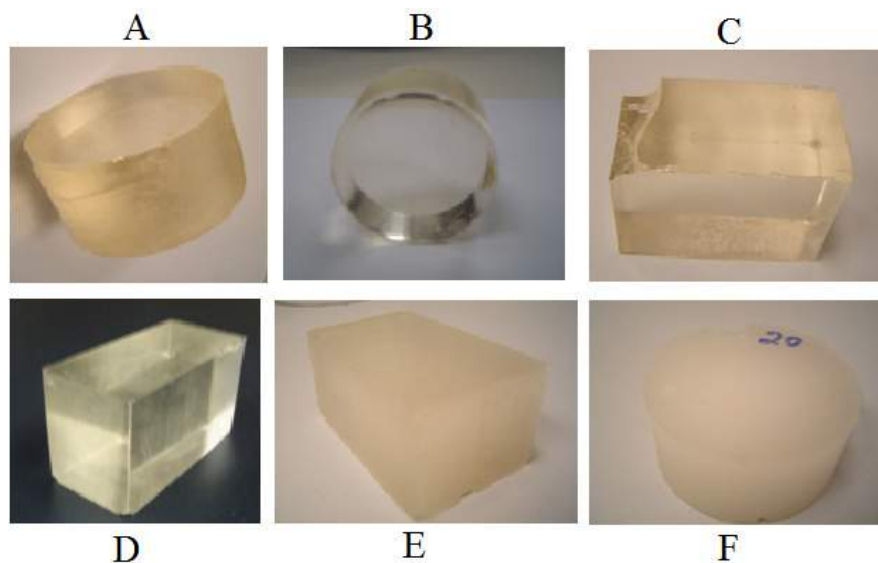


Figura 27. Fotos de *phantoms*: A- Silicone puro; B, C e D Silicone com 4%, 23% e 40% de fluido de silicone respectivamente, E - Silicone com 23% de vaselina e F – Silicone com 40% de glicerina.

A seguir serão discutidas as propriedades acústicas (atenuação a 1 MHz por FFT e RMS, e velocidade longitudinal por *Peak Detected* e Correlação Cruzada) de cada um dos *phantoms* da Tabela 26 separadamente ao longo do tempo demonstrando a estabilidade do *phantom* e a incerteza da medição e posteriormente o comportamento da atenuação e velocidade longitudinal de todo o conjunto de *phantoms* em função da frequência.

### Silicone Puro

Os valores das médias e desvios-padrão do coeficiente de atenuação por FFT do *Phantom 11* a base de silicone RTV615 puro, em função do tempo, podem ser vistos na Figura 28. Os valores de coeficiente de atenuação a 1 MHz foram medidos no período de março de 2008 a novembro de 2010. Percebe-se que os valores oscilaram no início apresentando um alto desvio-padrão, provavelmente devido à instabilidade do sistema de medição. As últimas medições apresentaram uma queda acentuada nos valores da atenuação, porém, com menor dispersão.



## Silicone + Fluido de Silicone

Como a atenuação do RTV615 puro foi maior do que o valor médio encontrado nos tecidos moles e a velocidade inferior ao valor de interesse, foram testadas misturas com substâncias em diferentes proporções em busca do ajuste destes valores. As substâncias a serem testadas teriam que ser miscíveis com o RTV615 e não impedir a seu processo de cura. O fluido de silicone (DOW CORNING® 200 FLUID, 350 CST) [58] apresentou estas propriedades. Foram feitos *phantoms* em diferentes concentrações (4%, 23% e 40%) do produto e suas propriedades medidas ao longo do tempo.

Devido à instabilidade do sistema de medição ao longo do tempo, principalmente no início dos experimentos, a incerteza das medições de atenuação foram grandes, o que dificulta a comparação e a interpretação dos dados. Entretanto, percebe-se claramente no último período testado, que a inclusão do fluido reduziu o valor da atenuação quando comparado com o silicone puro (Figura 30). O valor da atenuação parece reduzir proporcionalmente com aumento da concentração de 4%, 23% e 40% de fluido de silicone como pode ser visto na Figura 31. Porém, a inclusão de uma concentração do fluido de silicone maior que esta (p. ex. 50%) dificulta o processo de cura do RTV615 tornando-o viscoso e impossibilitando a sua aplicação.

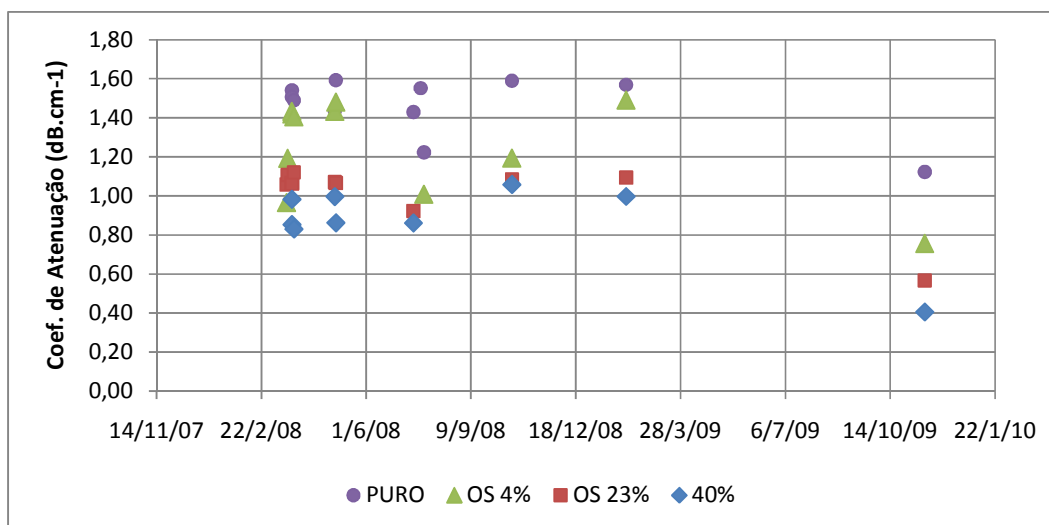


Figura 30. Gráfico da atenuação a 1MHz do silicone puro e misturado com óleo de silicone a 4%, 23% e 40% ao longo do tempo.

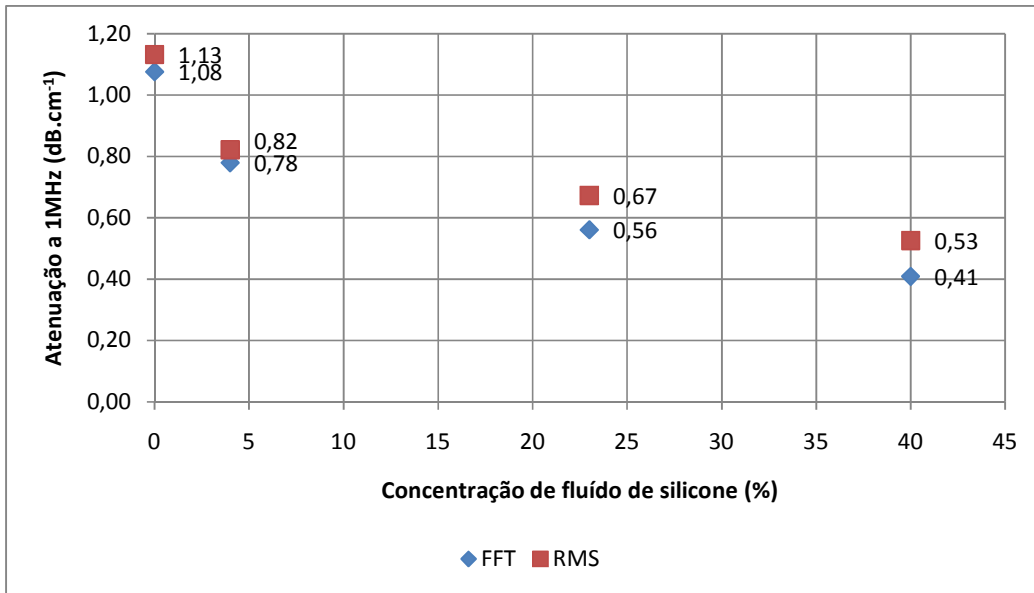


Figura 31. Gráfico da atenuação a 1 MHz (FFT e RMS) em função da concentração de fluido de silicone (silicone puro e misturado com óleo de silicone a 4%, 23% e 40%) no dia 16/11/2009.

Importante notar que o coeficiente de atenuação a 1 MHz do *phantom* Ph15 produzido em março de 2008 com o *phantom* Ph31 produzido agosto de 2010, usando o mesmo protocolo de fabricação (RTV615 + óleo de silicone 40%), apresenta valores médios bastante próximos (0,6 dB.cm<sup>-1</sup> para Ph15 e 0,5 dB.cm<sup>-1</sup> para Ph31) (Figura 32). Este fato será comentado mais a frente na discussão.

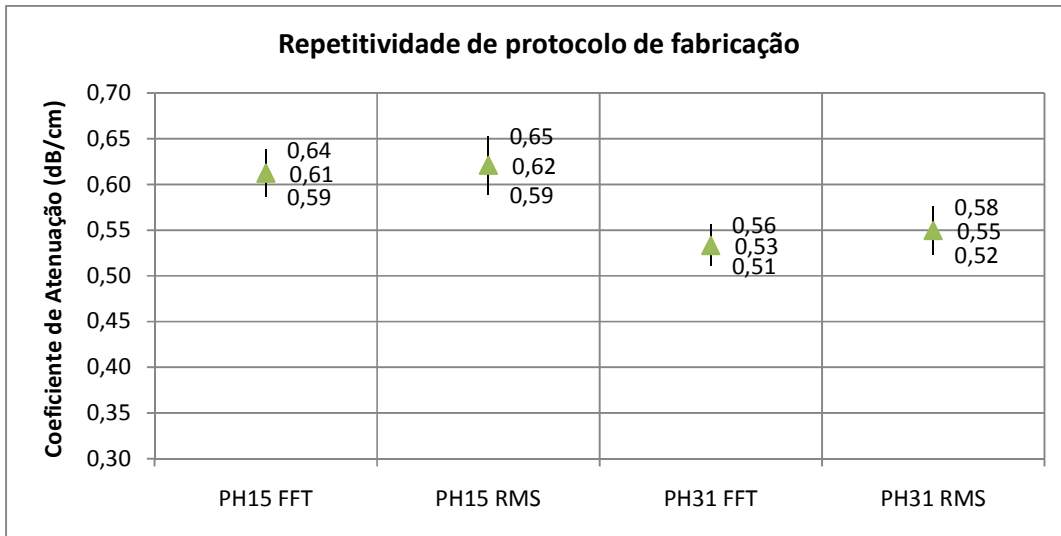


Figura 32. Coeficiente de atenuação dos phantom ph15 e ph31 a 1 MHz por FFT e RMS.

Comparando-se a velocidade longitudinal do silicone puro (ph11) pela técnica “*peak detected*” com a velocidade do *phantom* com 23% de fluido (ph14) usando-se a mesma técnica, percebe-se que não houve alteração significativa com relação ao valor médio das velocidades. O mesmo pode ser visto quando se compara as velocidades pela técnica “*correlação cruzada*” (Figura 33).

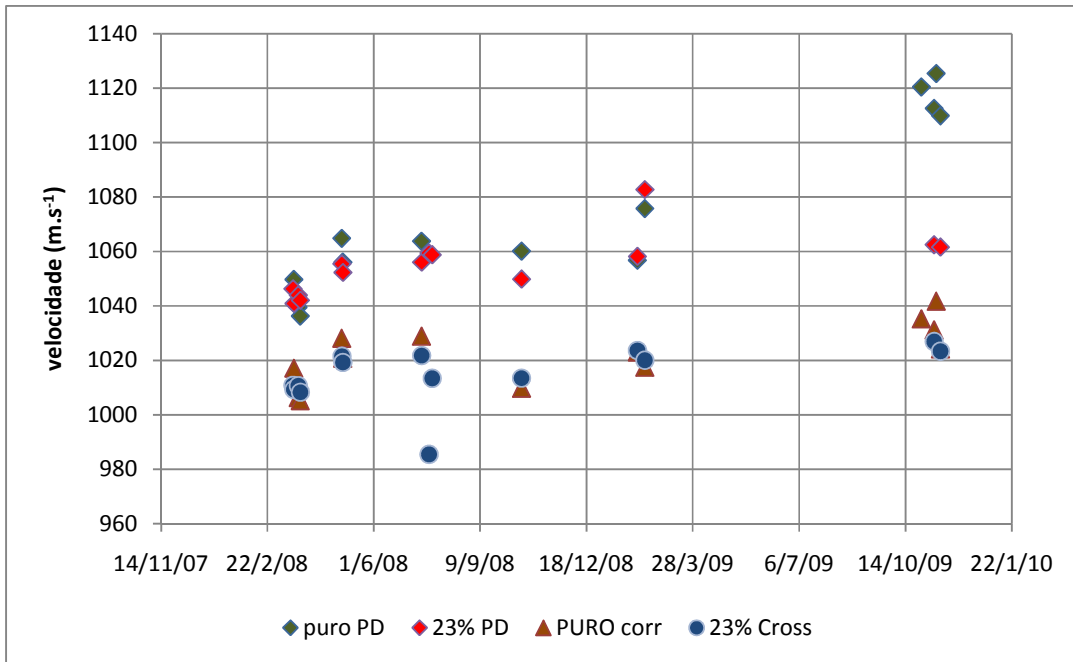


Figura 33. Gráfico da velocidade dos *Phantoms* RTV615 puro e com 23% de fluido de silicone pela técnica *peak detected* (PD) e correlação cruzada (Cross) ao longo do tempo.

### Silicone + Vaselina

Outro produto que misturado ao RTV615 obteve sucesso de cura e redução do valor médio da atenuação foi a vaselina líquida. Das concentrações testadas, a que apresentou melhor resposta foi a de 23%, onde se pôde notar a redução do valor médio da atenuação por FFT de  $1,08 \text{ dB.cm}^{-1}$  no RTV615 puro para  $0,46 \text{ dB.cm}^{-1}$  a 1 MHz no *phantom* misturado com vaselina (Figura 34). Deve-se chamar a atenção para o fato de que os *phantoms* misturados com vaselina em concentração superiores a esta, apresentam exsudação oleosa, provavelmente uma leve perda do produto misturado em excesso.

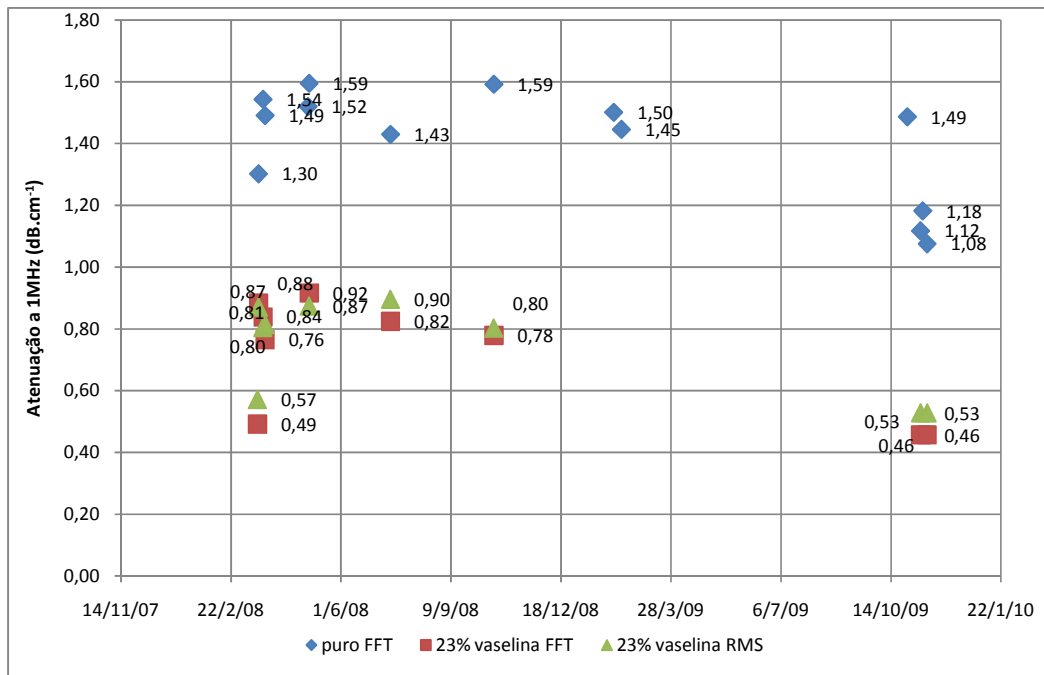


Figura 34. Gráfico da atenuação do *phantom* Ph12 (RTV615+vaselina 23%) em comparação com o Ph11(puro) a 1 MHz ao longo do tempo mensurado.

Os valores de velocidade longitudinal para o *phantom*, quando acrescentada a vaselina a 23% (1140 m.s<sup>-1</sup> pela técnica PD e 1100 m.s<sup>-1</sup> pela técnica Cross), parecem ter se elevado significativamente em relação ao *phantom* RTV615 puro (1040 m.s<sup>-1</sup>) durante a fase inicial da medição. Entretanto, a elevação do valor da velocidade do *phantom* puro nas últimas medições dificulta uma interpretação mais concreta a respeito desta elevação (Figura 35).



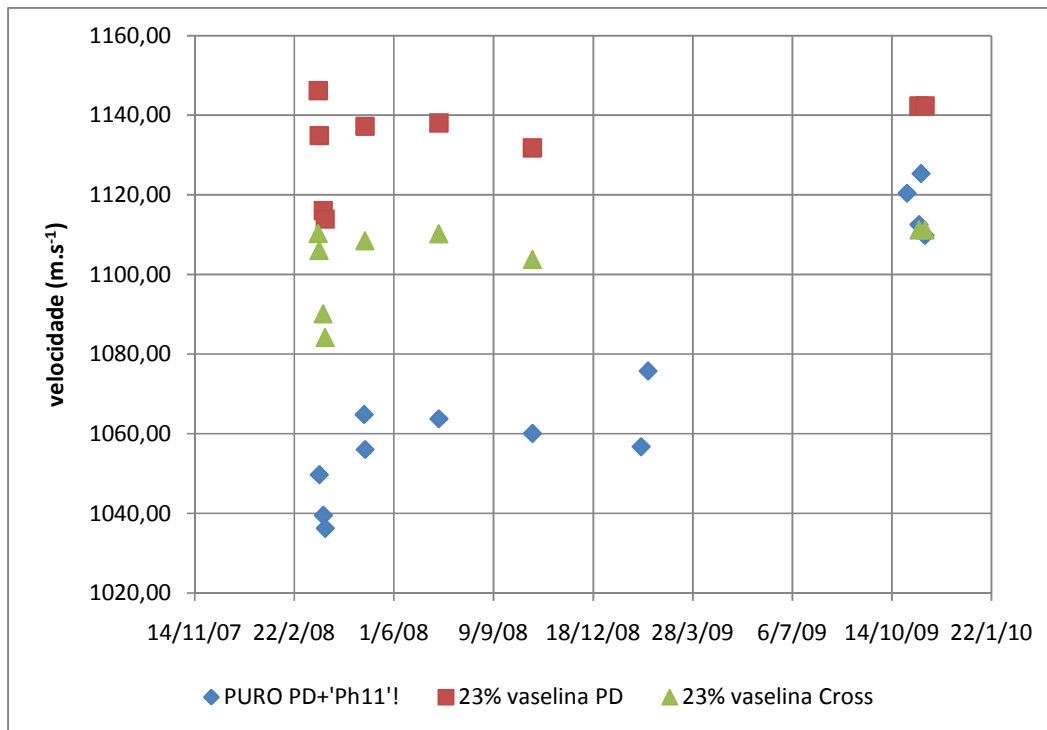


Figura 35. Gráfico da variação da velocidade longitudinal dos *phantoms* Ph11 (RTV615 puro) e Ph12 (RTV615 + 23% vaselina) ao longo do tempo.

### Silicone + Glicerina

A glicerina mostrou-se uma excelente substância complementar para promover a elevação da velocidade dos *phantoms* [32, 42]. Assim como nos *phantoms* descritos na literatura, a mistura de glicerina a 33% com o RTV615 também promoveu um aumento significativo na velocidade média do *phantom* (Figura 36) e elevou levemente os valores médios da atenuação (Figura 37). Uma observação importante é que a inserção da glicerina no produto RTV615 parece acelerar o processo de cura, tornando a solução muito viscosa. Isso dificulta a extração das bolhas de ar originadas pelo processo de mistura, comprometendo a homogeneidade do *phantom*. Maiores concentrações de glicerina foram testadas, mas os *phantoms* apresentaram coeficientes de atenuação muito elevados, provavelmente devido à presença de bolhas de ar não visíveis no interior do *phantom*.

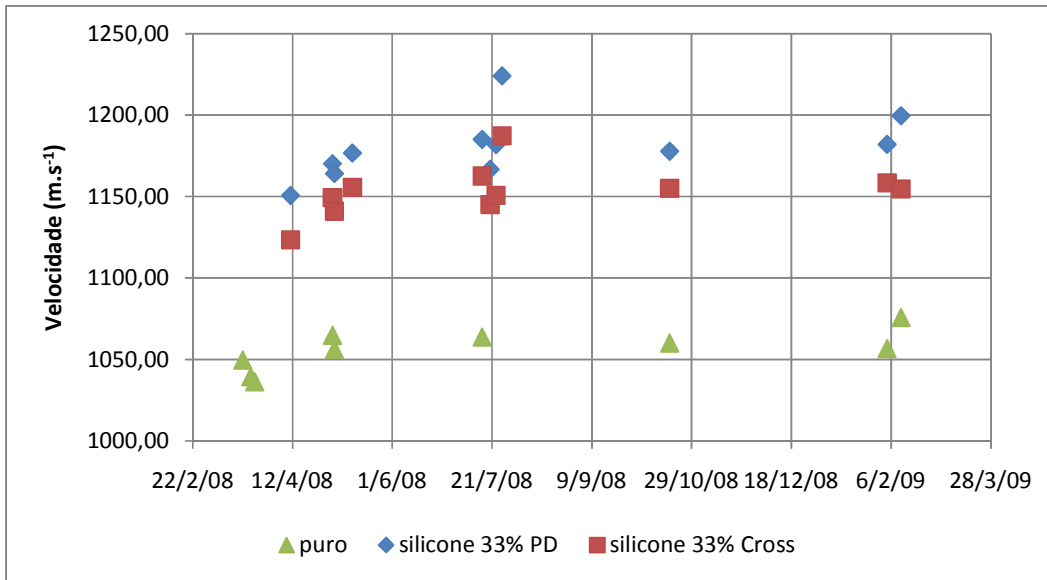


Figura 36. Gráfico da variação da velocidade do *phantom* ph20 (RTV615 + glicerina 33%) e ph11(RTV615) em função do tempo.

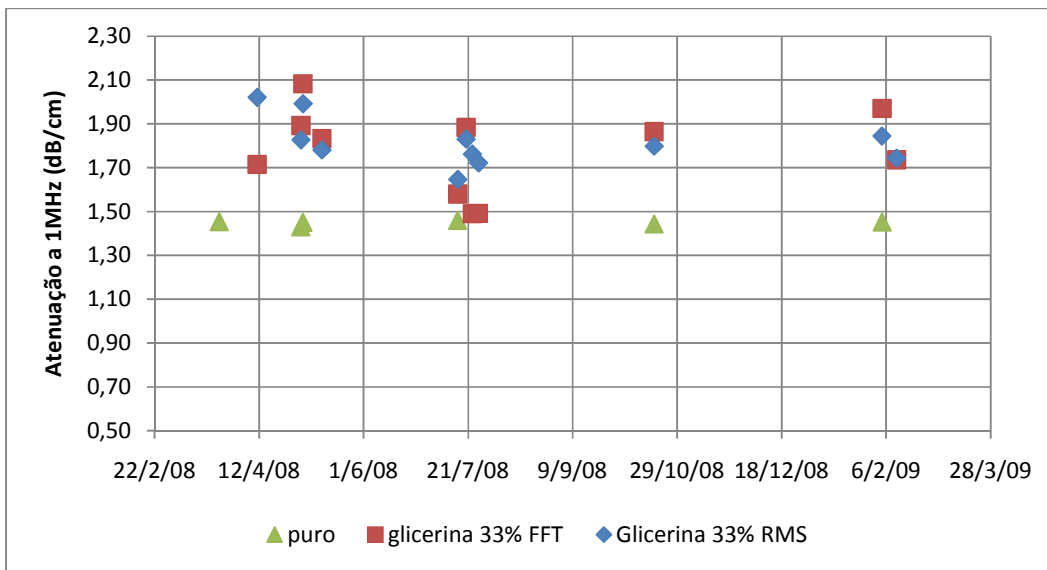


Figura 37. Gráfico da variação da atenuação a 1 MHz do *phantom* ph20 (RTV615 + glicerina 33%) e ph11(RTV615) em função do tempo.

Na Figura 38, nota-se que os valores de coeficiente de atenuação em função da frequência “ $\alpha(f)$ ” dos *phantoms* analisados se encontram entre 0,78 e 1,86  $\text{dB.cm}^{-1}\text{MHz}^{-1}$ . Pode-se observar que, em todos os casos, a adição dos líquidos (óleo de silicone, vaselina e glicerina) ao RTV615, antes do processo de cura, promoveu

alterações nas suas propriedades acústicas. Considerando os valores de coeficiente de atenuação, a adição de óleo de silicone a 40% fez com que este caísse de  $1,51 \text{ dB}\cdot\text{cm}^{-1}$  para  $0,78 \text{ dB}\cdot\text{cm}^{-1}$  (Figura 38). Um valor de  $0,98 \text{ dB}\cdot\text{cm}^{-1}$  foi obtido com o acréscimo de 23% de vaselina ao RTV615. Ao contrário dos dois primeiros líquidos, a adição de 33% de glicerina ao RTV615 aumentou o coeficiente de atenuação para  $1,86 \text{ dB}\cdot\text{cm}^{-1}$ .

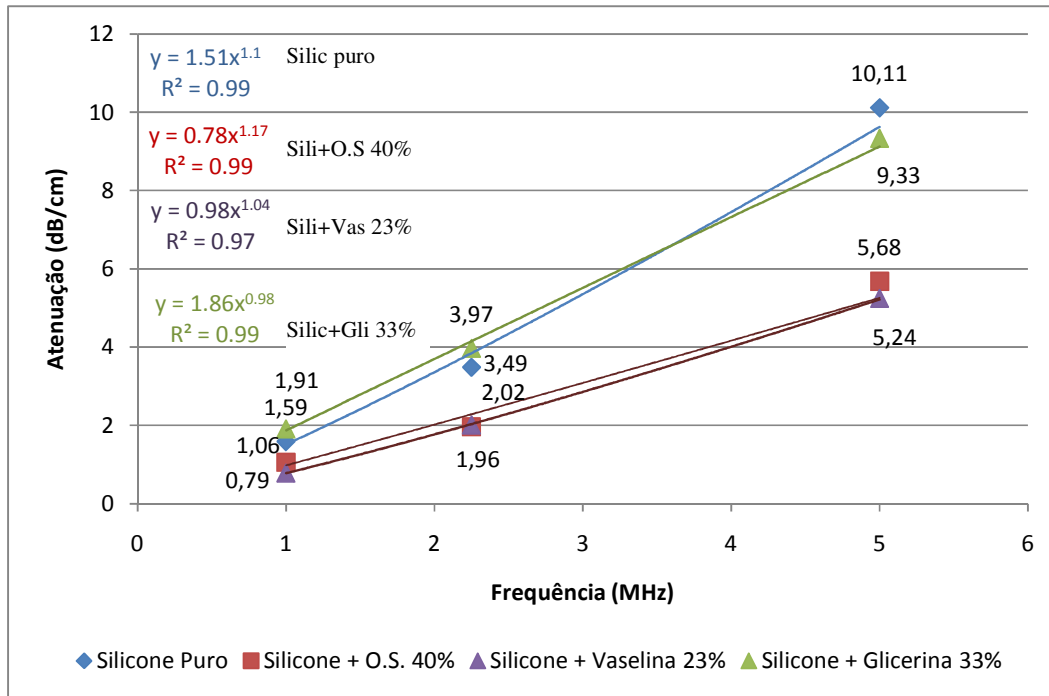


Figura 38. Gráfico da variação do coeficiente de atenuação em função da frequência do silicone RTV615 puro e misturado com diferentes produtos em determinadas proporções e suas respectivas regressões potenciais, No canto superior esquerdo encontram-se os valores  $\alpha_0$  e  $n$  dos ajustes das equações potenciais (do tipo  $Ax^n$ , com  $A$  constante).

Quanto à velocidade, o silicone puro apresenta valor em torno de  $1064 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  pelo método PD a 1 MHz. A adição de óleo de silicone não produziu alterações expressivas na velocidade. Entretanto, a adição de 23% de vaselina elevou-a para  $1150 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  e de 33% de glicerina para  $1229 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  a 1 MHz (Figura 39).

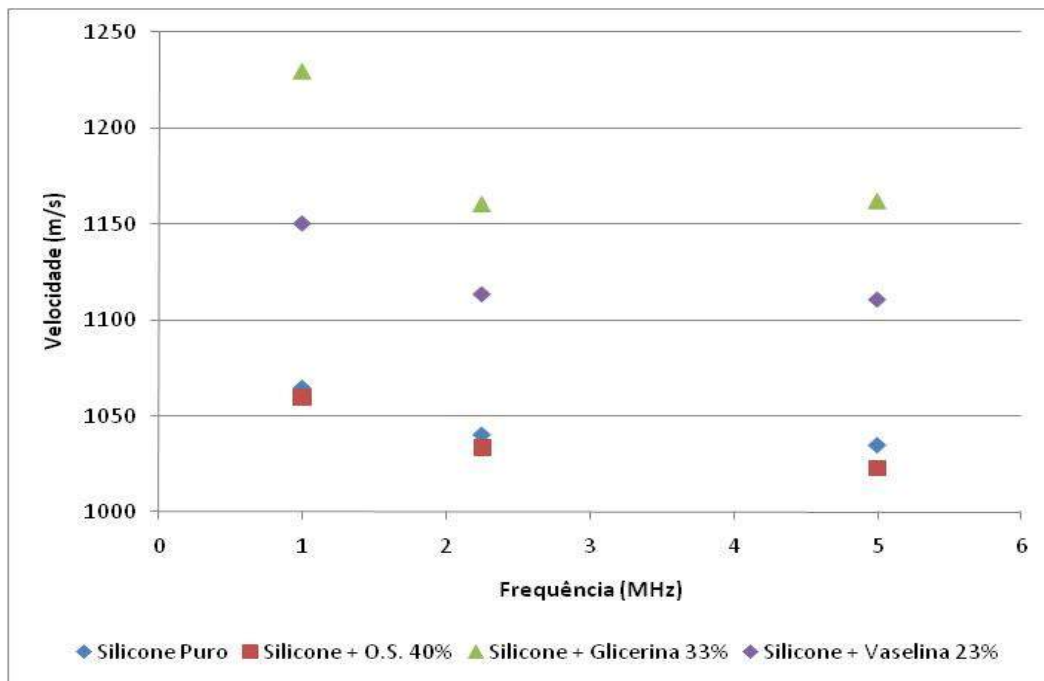


Figura 39. Gráfico da variação da velocidade em função da frequência do silicone RTV615 puro e misturado com diferentes produtos em determinadas proporções.

### 10.3 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DOS *PHANTOMS* DE SILICONE

Fazendo uma análise geral dos resultados dos *phantoms* a base de silicone, pode-se destacar que o RTV615 é um elastômero com baixo coeficiente de atenuação, quando comparado com os demais produtos a base de silicone. Apresenta algumas vantagens importantes como: transparência, podendo ser utilizado na fabricação de *phantoms* com camadas de cristais cromotérmicos para estudo de campo térmico, fácil moldagem, não exigindo processamentos complexos como extrusão e injeção, o que permite o estudo com termopares, boa miscibilidade para vários produtos, o que possibilita ajustar suas propriedades acústicas e térmicas e, homogeneidade e isotropia quanto à velocidade e atenuação. O silicone apresenta, entretanto, algumas desvantagens como: o preço elevado e burocracia na compra do produto (como declaração de renda anual da empresa adquirente), aparente instabilidade das propriedades acústicas ao longo do tempo e velocidade longitudinal menor em relação à dos tecidos biológicos moles. Para verificar as causas desta instabilidade, sugere-se, como continuação do trabalho, fazer uma análise comparada ao longo do tempo, com os *phantoms* Ph15 e Ph31 (RTV615 + óleo de silicone 40%) utilizando-se sempre o arranjo experimental que gerou melhores resultados.

#### 10.4 PHANTOMS A BASE DE PVCP

Dos *phantoms* a base de PVCP produzidos, 6 foram selecionados por apresentarem, por inspeção visual, faces mais paralelas e ausência de bolhas de ar. Os *phantoms* foram enumerados em ordem crescente, de acordo com sua data de fabricação a partir de Ph26. Como este material permite reciclagem, ou seja, uma vez solidificado, pode ser reaquecido a 200°C e se torna líquido novamente, sendo reaproveitado para outro molde, as propriedades acústicas de um *phantom* de PVCP puro reciclado (Ph28) também puderam ser avaliadas. O nome, a composição e sua concentração, assim como as respectivas espessuras de cada *phantom*, podem ser vistos na Tabela 27. A Figura 40 mostra as fotos destes *phantoms*.

Tabela 27. Composições e espessuras dos *Phantoms* a base de PVCP.

	<i>Phantom</i>	Composição	Espessura (cm)
A	<b>Ph26</b>	<b>PVCP puro</b>	2,20
B	<b>Ph27</b>	<b>PVCP + vaselina (5%)</b>	2,20
C	<b>Ph28</b>	<b>PVCP reciclado</b>	2,20
D	<b>Ph29</b>	<b>PVCP + PVC (9%)</b>	2,20
E	<b>Ph30</b>	<b>PVCP+ glicerina (10%)</b>	2,20
F	<b>Ph32</b>	<b>PVCP pela técnica MAVK</b>	1,20

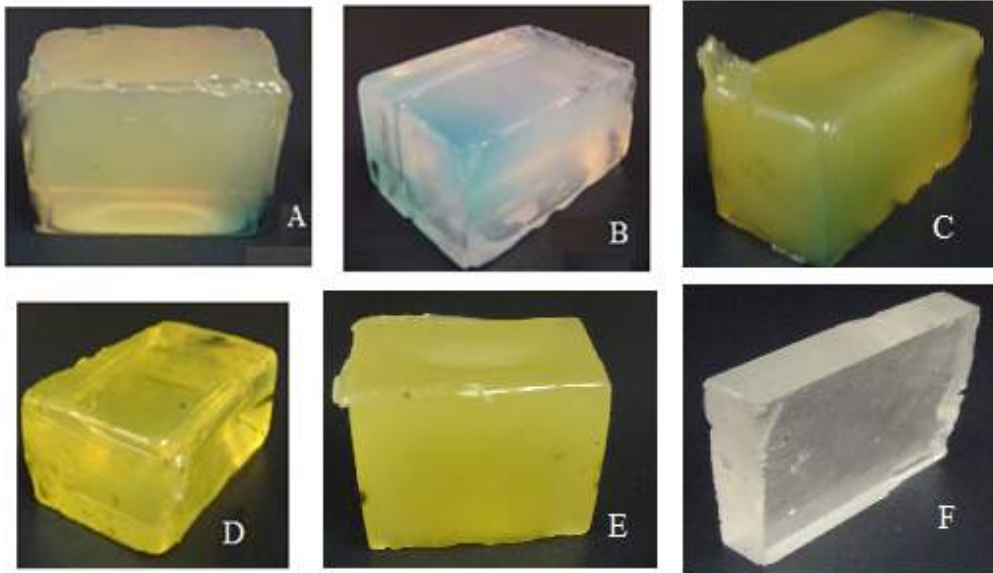


Figura 40. Fotos de *phantoms*: A) PVCP puro, B) PVCP + vaselina (5%), C) PVCP reciclado, D) PVCP + PVC (9%), E) PVCP+ glicerina (10%) e F) PVCP pela técnica MAVK.

## PVCP puro

Como o produto base de PVCP só foi adquirido em julho de 2009, as propriedades acústicas destes *phantoms* só puderam ser medidas a partir desta data. Inicialmente, confeccionou-se o *phantom* de PVCP puro (Ph26) que apresentou uma atenuação inicial em torno de  $0,36 \text{ dB}\cdot\text{cm}^{-1}$  (Figura 41), um pouco abaixo da faixa de valores para tecidos moles, de  $0,5$  a  $0,7 \text{ dB}\cdot\text{cm}^{-1}$  (Tabela 1). Entretanto, assim como no *phantom* de silicone puro, aparentemente este valor tende a aumentar ao longo do tempo, atingindo a faixa de interesse ( $0,63 \text{ dB}\cdot\text{cm}^{-1}$ ). Deve-se levar em consideração que a metodologia de medição do coeficiente de atenuação sofreu um refinamento ao longo do tempo e que estas medições foram feitas pela técnica transmissão/recepção TOCANDO. Uma análise recente do *phantom* de PVCP puro usando os três métodos (TOCANDO, AFASTADO APARENTE e AFASTADO REAL) pode ser visto na Tabela 28. Note que pelo método AFASTADO REAL a atenuação por RMS foi de  $0,49 \text{ dB}\cdot\text{cm}^{-1}$ .

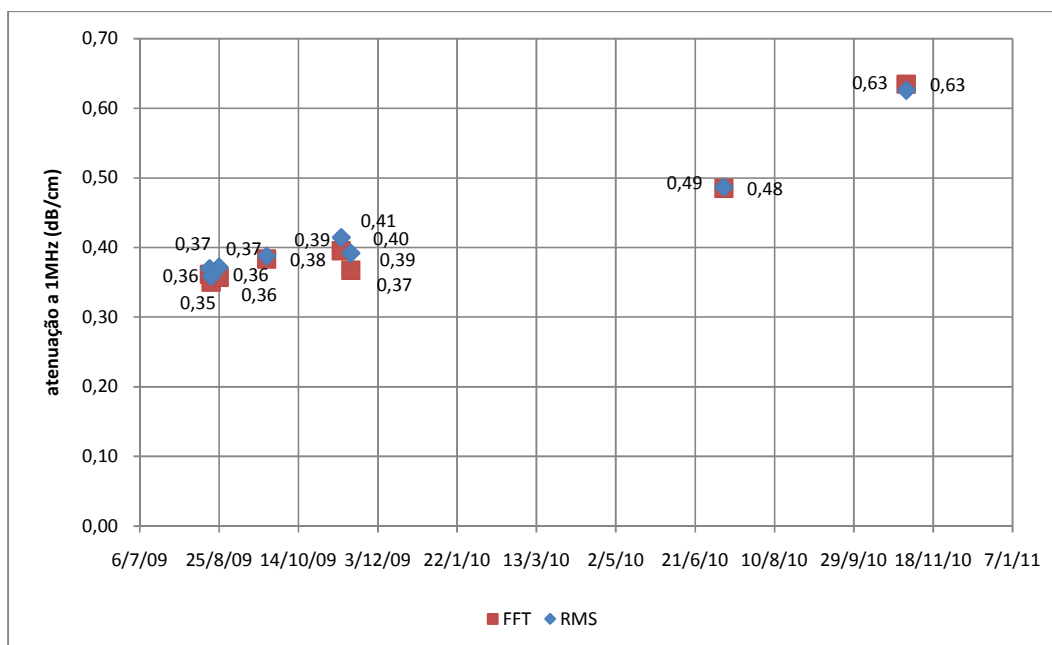


Figura 41. Gráfico da variação da atenuação a 1 MHz do *phantom* ph26 (PVCP puro) em função do tempo pela técnica transmissão/recepção TOCANDO.



Tabela 28. Valores referentes à atenuação (FFT e RMS) a 1 MHz, 20 ciclos, do *phantom* de PVCP puro medidos de acordo com a técnica de transmissão/recepção pelos métodos TOCANDO, AFASTADO APARENTE e AFASTADO REAL.

Ph26 1 MHz		TÉCNICA	TOCANDO	AFASTADO APARENTE	AFASTADO REAL
2,20 cm		Temperaturas	25	25	25
ATENUAÇÃO	FFT 1MHz	Média	0,63	0,68	0,59
		D.P.	0,01	0,01	0,01
		C.V.	0,02	0,01	0,02
		Incerteza	0,0045	0,0049	----
	RMS 1MHz	Média	0,63	0,68	0,49
		D.P.	0,01	0,01	0,01
		C.V.	0,02	0,01	0,02
		Incerteza	0,0044	0,0048	----

Analisando os valores da velocidade longitudinal referentes ao *phantom* ph26, pode-se observar que há uma pequena flutuação destes ao longo do tempo (Figura 42).

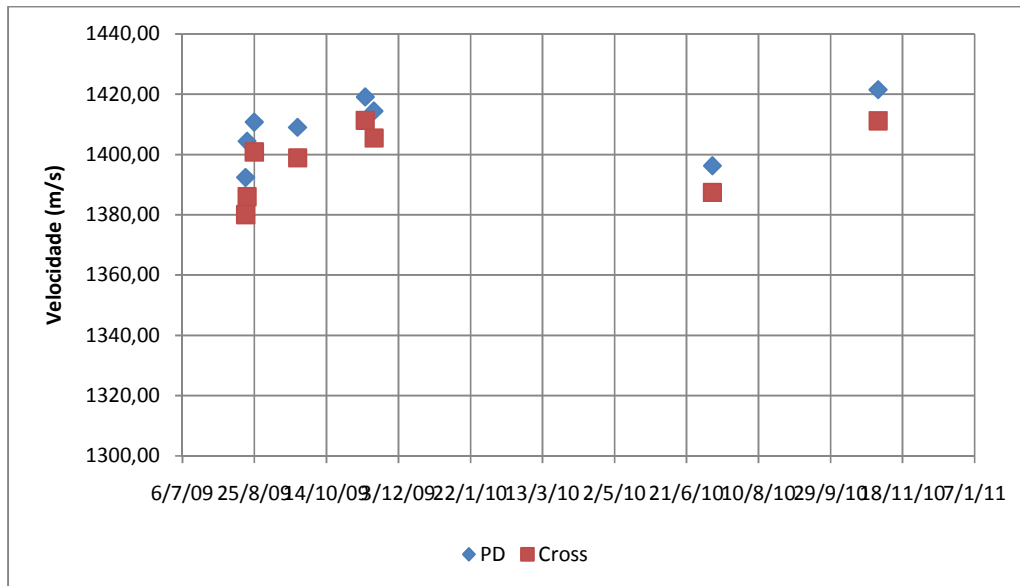


Figura 42. Variação da velocidade longitudinal do *phantom* de PVCP puro a 1 MHz ao longo do tempo.

A análise das propriedades acústica em função da temperatura pôde ser verificada colocando-se o *phantom* em um Banho Maria (Nova Ética ®) de temperatura controlada por 30 minutos. Após este período, os sinais foram adquiridos com os transdutores

dentro do sistema e em contato direto com as faces do *phantom*. Pode-se observar que ocorre um aumento do valor coeficiente de atenuação de  $0,49 \text{ dB}\cdot\text{cm}^{-1}$  a  $20^\circ\text{C}$  para  $0,54 \text{ dB}\cdot\text{cm}^{-1}$  a  $40^\circ\text{C}$  tanto por RMS quanto FFT (Figura 43), enquanto que a velocidade tende a reduzir de  $1424 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  a  $20^\circ\text{C}$  para  $1321 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  a  $40^\circ\text{C}$  (Figura 44).

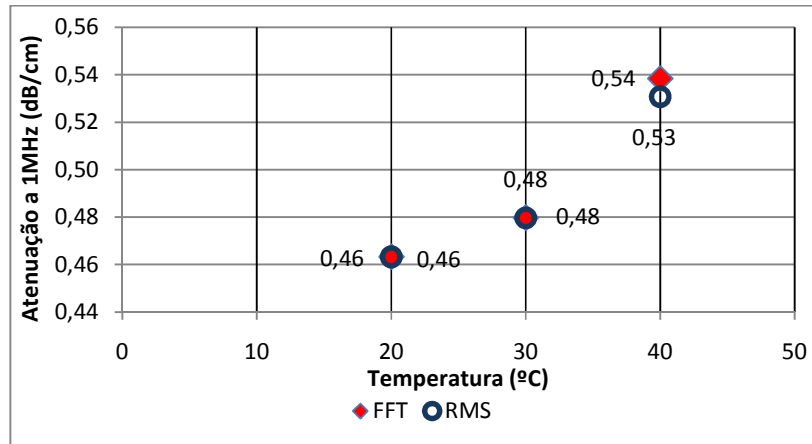


Figura 43. Gráfico da variação do coeficiente de atenuação do *phantom* de PVCP puro em função da temperatura.

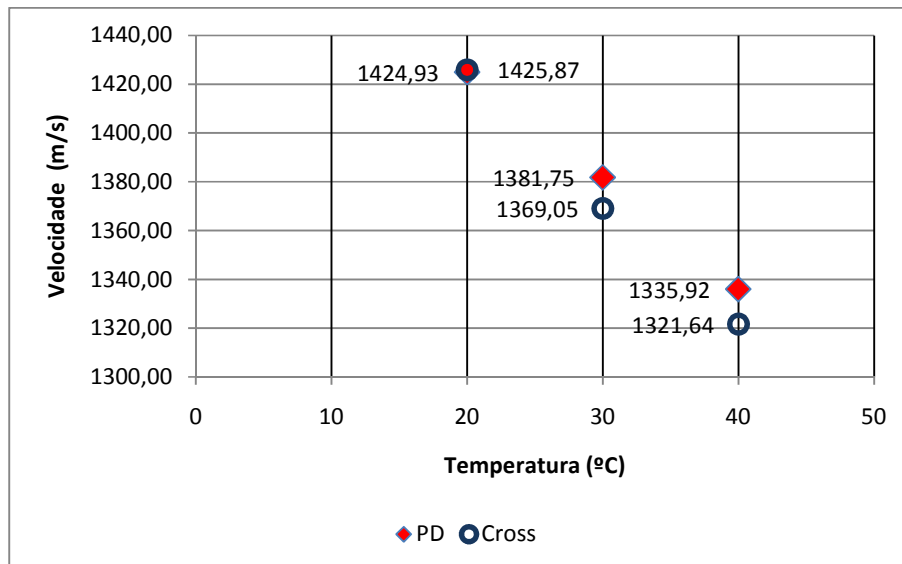


Figura 44. Gráfico da variação da velocidade do *phantom* de PVCP puro em função da temperatura.

## PVCP + Vaselina 5%

Para o *phantom* ph27 a base de PVCP e 5% de vaselina os resultados de atenuação (Figura 45) e velocidade longitudinal (Figura 46) parecem não oscilar ao longo do tempo a 1 MHz.

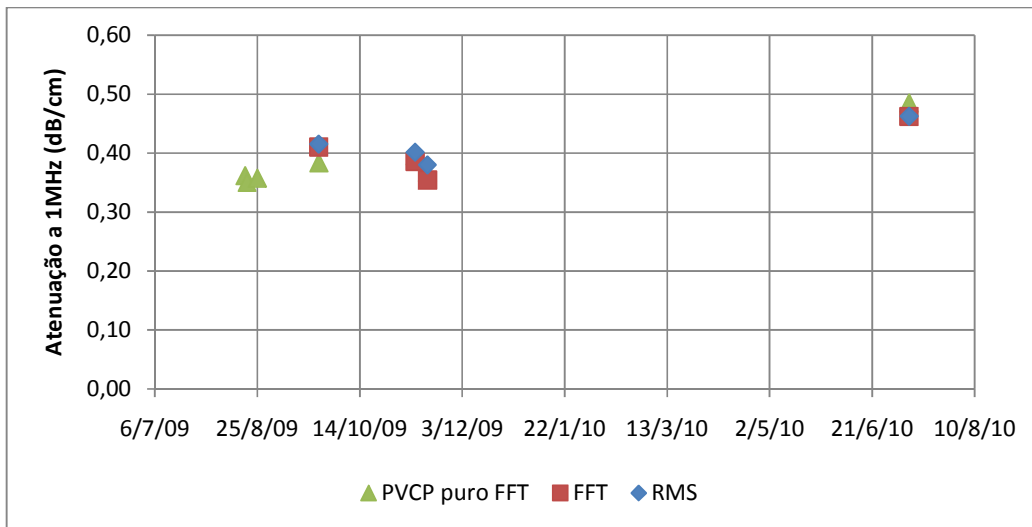


Figura 45. Gráfico da variação da atenuação a 1 MHz em função do tempo dos *phantom* de PVCP + 5% de vaselina comparado com o PVCP puro.

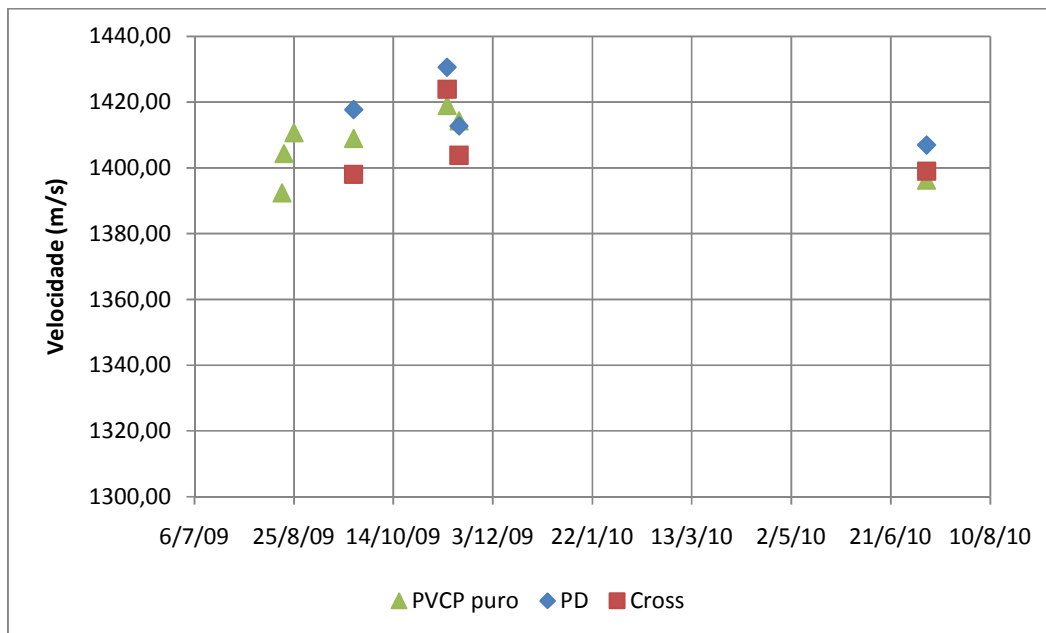


Figura 46. Gráfico da variação da velocidade a 1 MHz em função do tempo dos *phantom* de PVCP + 5% de vaselina comparado com o PVCP puro.

## PVCP Reciclado

O *phantom* reciclado (ph28) foi analisado em dois dias diferentes, não apresentando valores significativamente diferentes entre si. A velocidade longitudinal apresentou comportamento similar (Tabela 29).

Tabela 29. Tabela dos valores medidos de atenuação e velocidade do *phantom* de PVCP reciclado (ph28) pela técnica Transmissão/Recepção TOCANDO.

Ph26 1MHz		Data	25/9/09	16/11/09
2,20 cm		Temperaturas	20	20
ATENUAÇÃO	FFT	MÉDIA	0,42	0,44
		D.P.	0,11	0,08
		C.V.	25,83%	18,30%
		INCERTEZA	0,090	0,064
	RMS	MÉDIA	0,42	0,46
		D.P.	0,10	0,08
		C.V.	24,74%	17,03%
		INCERTEZA	0,089	0,063
VELOCIDADE	PD	MÉDIA	1413,19	1412,59
		D.P.	1,34	6,04
		C.V.	0,09%	0,43%
	Cross	MÉDIA	1403,98	1403,26
		D.P.	1,43	6,64
		C.V.	0,10%	0,47%

## PVCP + PVC 9%

A inclusão de pó de PVC a 9% no produto líquido (PVCP), antes do aquecimento a 150°C, tornou o *phantom* mais rígido fisicamente e lhe deu uma coloração amarelo-ouro (Figura 40 D). Além disso, o coeficiente de atenuação deste foi maior ( $0,81 \pm 0,07$  dB.cm<sup>-1</sup>, média de 4 dias) quando comparada com o *phantom* de PVCP puro, no mesmo período. Não foi possível observar diferenças significativas da velocidade longitudinal do *phantom* Ph29 comparada com a do *phantom* de PVCP puro, no mesmo período (Tabela 30).

Tabela 30. Valores das propriedades acústicas (atenuação e velocidade) do *phantom* Ph29 (PVCP + PVC 9%) medidas ao longo do tempo.

Ph29 1 MHz		Data	27/10/09	10/11/09	16/11/09	9/7/10
2,20 cm		Temperaturas	20	20	20	20
ATENUAÇÃO	FFT	MÉDIA	0,72	0,85	0,86	0,79
		D.P.	0,02	0,01	0,03	0,00
		C.V.	3,35%	1,64%	3,78%	0,51%
	RMS	MÉDIA	4,77	0,019	0,027	0,005
		D.P.	0,73	0,86	0,86	0,78
		C.V.	0,003	0,015	0,032	0,004
VELOCIDADE	PD	MÉDIA	0,45%	1,71%	3,77%	0,55%
		D.P.	4,51	0,020	0,027	0,0043
		C.V.	1390,13	1421,97	1422,49	1402,09
	Cross	MÉDIA	13,02	4,10	3,02	0,66
		D.P.	0,94%	0,29%	0,21%	0,05%
		C.V.	1380,94	1414,37	1413,16	1390,52

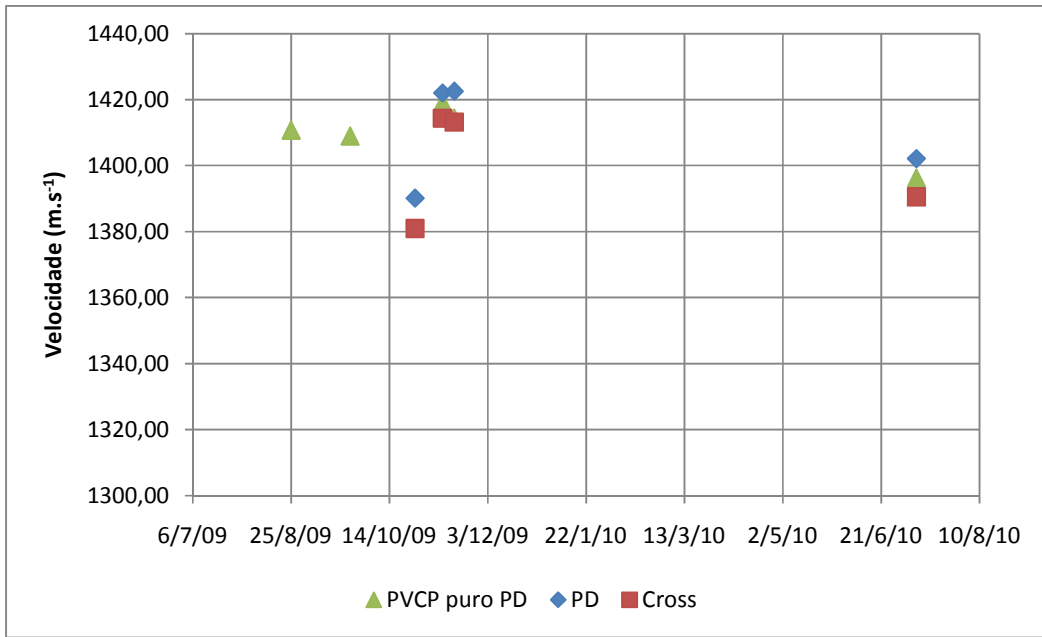


Figura 47. Gráfico da variação da velocidade longitudinal do *phantom* de PVCP + 9% de PVC (Ph29) ao longo do tempo comparado com o *phantom* de PVCP puro por PD.

### PVCP + glicerina 10%

Assim como na inclusão de pó de PVC a 9%, o acréscimo de glicerina 10% no produto líquido (PVCP), antes do aquecimento, eleva o valor do coeficiente de atenuação do *phantom* Ph30 (PVCP + glicerina 10%) para  $0,73 \pm 0,08 \text{ dB.cm}^{-1}$ , média dos 2 dias) quando comparado com o do *phantom* de PVCP. Este acréscimo de glicerina ao *phantom* não produziu diferenças significativas no valor da velocidade longitudinal durante o mesmo período (Tabela 31).

Tabela 31. Valores das propriedades acústicas (atenuação e velocidade) do *phantom* Ph30 (PVCP + glicerina 10%).

Ph30 1 MHz		Data	12/11/09	16/11/09
2,20 cm		Temperaturas	23	20
ATENUAÇÃO (dB.cm <sup>-1</sup> )	FFT 1MHz	MÉDIA	0,68	0,79
		D.P.	0,03	0,08
		C.V.	0,04	0,10
		INCERTEZA	0,11	0,060
	RMS 1MHz	MÉDIA	0,66	0,76
		D.P.	0,06	0,06
		C.V.	0,08	0,08
		INCERTEZA	0,11	0,059
VELOCIDADE (m.s <sup>-1</sup> )	PD	MÉDIA	1423,40	1420,33
		D.P.	11,27	7,89
		C.V.	0,01	0,006
	Cross	MÉDIA	1414,97	1410,79
		D.P.	14,56	9,22
		C.V.	0,01	0,007

## PVCP puro confeccionado pela técnica MAVK

Todos os *phantoms* a base de PVCP apresentados até agora foram confeccionados empregando-se a técnica tradicional em que se aquecia o produto base mexendo-o vigorosamente com um bastão de vidro em um recipiente a 150°C. Como esta técnica apresentava algumas desvantagens, conforme descrito no item 5.2, um *phantom* foi produzido utilizando a técnica MAVK (Ph32). Os *phantoms* confeccionados por esta técnica se apresentam mais flexíveis e translúcidos (Figura 40 F) do que os feitos pela técnica tradicional. A análise da atenuação deste *phantom* pôde ser realizada comparando as técnicas de transmissão/recepção TOCANDO, AFASTADO APARENTE e AFASTADO REAL. A Tabela 32 mostra que, em todos os casos, o valor da atenuação para este *phantom* foi inferior aos encontrados naqueles feitos pela técnica tradicional. Já os valores das velocidades longitudinais pelas três técnicas apresentaram-se um pouco inferior ( $1380 \text{ m.s}^{-1}$ ) aos da velocidade dos *phantoms* produzidos pela técnica tradicional.

Tabela 32. Valores das propriedades acústicas (atenuação e velocidade) do *phantom* ph32 (PVCP confeccionado pela técnica MAVK) medidos pelas três diferentes técnicas Transmissão/recepção TOCANDO, AFASTADO APARENTE e AFASTADO REAL.

Ph32 1 MHz 9/7/10		TÉCNICA	TOCANDO	AFASTADO APARENTE	AFASTADO REAL
2,20 cm		Temperaturas	20	20	20
ATENUAÇÃO	FFT	MÉDIA	0,26	0,30	0,17
		D.P.	0,01	0,02	0,02
		C.V.	0,05	0,06	0,11
		INCERTEZA	0,013	0,016	0,016
	RMS	MÉDIA	0,26	0,30	0,04
		D.P.	0,01	0,02	0,02
		C.V.	0,05	0,06	0,50
		INCERTEZA	0,013	0,016	0,016
VELOCIDADE	PD	MÉDIA	1390,34	1381,17	1381,17
		D.P.	0,28	0,24	0,24
		C.V.	0,00020	0,00017	0,00017
	Cross	MÉDIA	1381,79	1381,44	1381,44
		D.V.	0,00	0,78	0,78
		C.V.	0,00000	0,00056	0,00056



Diferentemente do *phantom* a base de RTV615, a análise do comportamento do valor do coeficiente de atenuação a 1 MHz ao longo do tempo, após a inserção do *phantom* de PVCP que estava em temperatura ambiente (25° C) no tanque acústico com água a uma temperatura um pouco inferior (19°C) não apresentou alterações significativas (Figura 48). A velocidade, por sua vez, apresenta um valor que decai levemente ao longo do tempo e que demora cerca de 30 minutos para se estabilizar (Figura 49). Isso significa que antes da análise do valor da velocidade, o *phantom* de PVCP puro deve estar pelo menos 30 minutos mergulhado no tanque, para se equiparar com a temperatura do meio de referência. Esta curva de comportamento térmico ao longo do tempo pode variar para os demais *phantoms* e deve ser estimada.

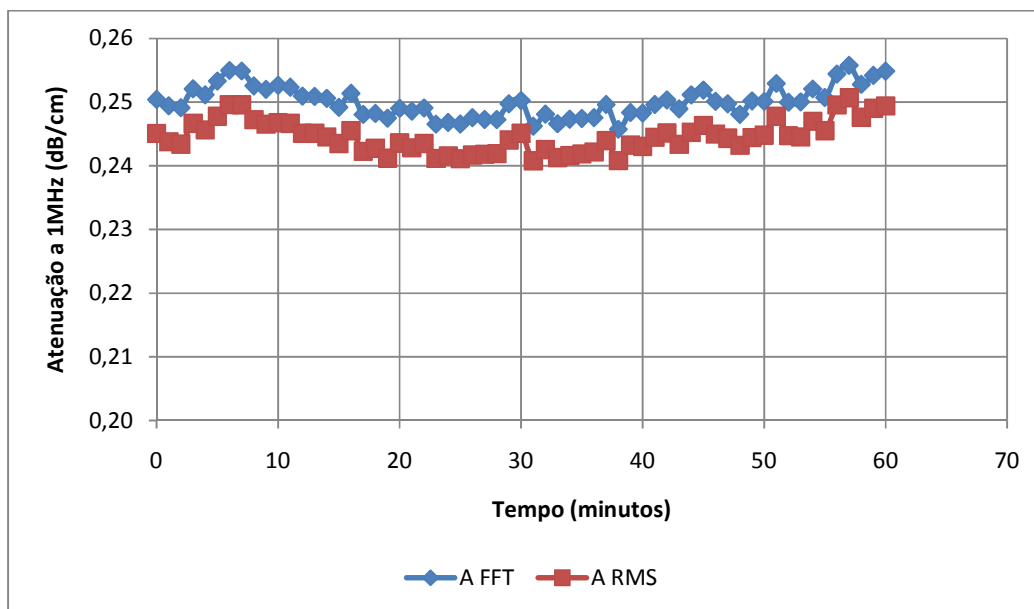


Figura 48. Gráfico do comportamento do valor da atenuação em função do tempo após a inserção do *phantom* de PVCP que estava em temperatura ambiente (25° C) no tanque acústico com água a uma temperatura um inferior (19°C).

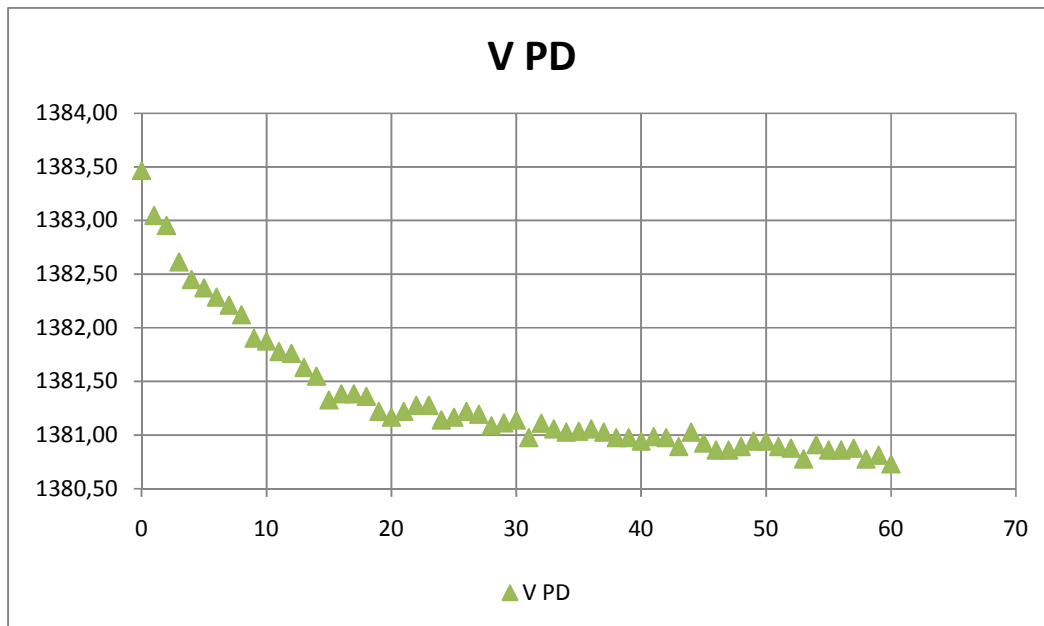


Figura 49. Gráfico do comportamento da velocidade do *phantom* PVCP puro confeccionado pela técnica MAVK ao longo do tempo assim que é introduzido na água para acomodação térmica medidos pela técnica Transmissão/recepção AFASTADO Peak Detected.

O coeficiente de atenuação, em função da frequência, do PVCP puro ( $0,37 \text{ dB.cm}^{-1}\text{MHz}^{-1}$ ) é inferior à faixa de valores de interesse. Buscou-se então aumentar este valor, misturando o PVCP ainda líquido com outros produtos (vaselina a 5% ou glicerina a 10% ou pó de PVC a 9%). Observou-se um aumento desejado para o *phantom* com glicerina e também com pó de PVC (Figura 50). A medição da velocidade em função da frequência para estes materiais, não apresentou um padrão (Figura 51). Novas medições devem ser realizadas para se confirmar este resultado.

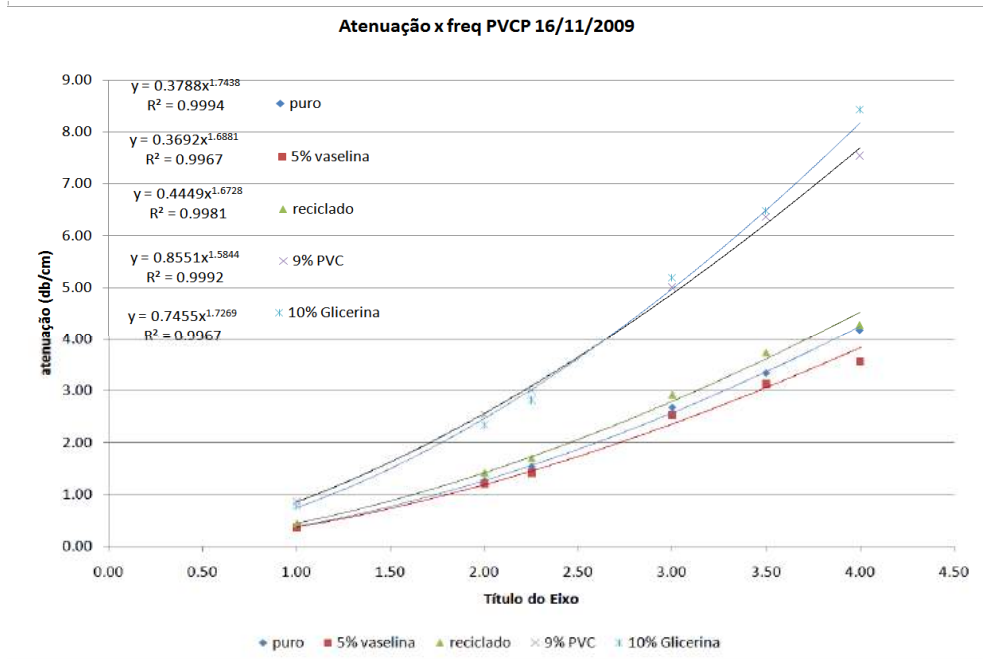


Figura 50. Gráfico da variação do coeficiente de atenuação em função da frequência do PVCP puro, reciclado e misturado com diferentes produtos em determinadas proporções e suas respectivas regressões potenciais (do tipo  $Ax^n$ , com  $A$  constante).

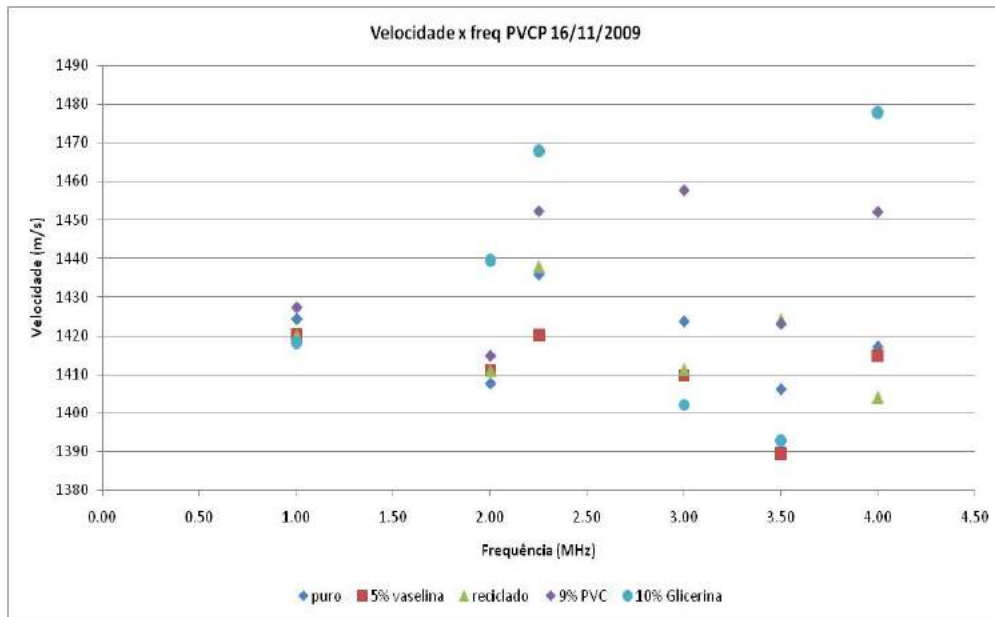


Figura 51. Gráfico da velocidade em função da frequência do PVCP puro, reciclado e misturado com diferentes produtos em determinadas proporções.

## 10.5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DOS *PHANTOMS* DE PVCP

Os *phantoms* à base de PVCP apresentaram uma discreta oscilação do coeficiente de atenuação ao longo do tempo sem uma tendência aparente.

Pode-se perceber a variação tanto da velocidade quanto da atenuação do *phantom* em função da temperatura. Embora as medições tenham sido feitas em uma faixa de temperatura pequena, em torno de 19°C a 25°C, deve-se tomar o cuidado de se medir os valores destas propriedades com menor variação possível e deixando os *phantoms* mergulhados no meio de referência (água) por, pelo menos, 30 minutos antes de se realizar as medições.

O acréscimo de PVC ou glicerina ao PVCP permitiu um aumento no valor do coeficiente de atenuação para dentro da faixa de interesse, porém não possibilitaram um aumento significativo no valor da velocidade. Um *phantom* à base de PVCP com inclusão de DOP (Dioctil Fitalato) foi estudado observando-se uma redução no valor do coeficiente de atenuação, indicando as possibilidades de sua aplicação.

## 11 RESULTADOS E DISCUSSÕES SOBRE PROPRIEDADES TÉRMICAS DOS PHANTOMS

Conforme descrito no item INTRODUÇÃO, para que se possa utilizar os *phantoms* no estudo do campo térmico, estes devem mimetizar também, as propriedades térmicas dos tecidos biológicos, das quais, as avaliadas neste estudo são: (a) **Calor específico ( $J.g^{-1}.K^{-1}$ )** e (b) **Condutividade térmica ( $W.m^{-1}.K^{-1}$ )**.

Devido a problemas técnicos dos aparelhos e ao acúmulo de serviço nas instituições de pesquisa capacitadas para se avaliar as propriedades térmicas dos *phantom*, não foi possível se medir experimentalmente o calor específico e a condutividade térmica dos *phantoms* a base de silicone RTV 615. Porém, foi possível obter as propriedades térmicas do produto puro pelo documento de descrição técnica fornecida pelo fabricante [59]. A condutividade térmica encontrada foi de  $0,2 W.m^{-1}.K^{-1}$ , um pouco menor do que a do tecido biológico, já o calor específico foi de  $12,56 J.g^{-1}.^{\circ}C^{-1}$  (Tabela 33).

Medições das propriedades térmicas do PVCP usando o DSC (TA®) pelo método de modulação quasi-isotérmica em passos de  $10^{\circ}C$ , na faixa de  $6,85^{\circ}C$  a  $46,85^{\circ}C$  (280-320 K) foram feitas no *Oak Ridge National Laboratory* (EUA) [60]. A condutividade térmica do PVCP puro foi estimada em  $0,062-0,065 W.m^{-1}.K^{-1}$ , muito inferior aos  $0,47 W.m^{-1}.K^{-1}$  dos tecidos biológicos. Estudos preliminares feitos com inclusão de  $0,10 g.ml^{-1}$  de pó de grafite mostram uma elevação da condutividade térmica para  $0,21 W.m^{-1}.K^{-1}$  (Tabela 33). O calor específico do PVCP puro foi estimado como tendo comportamento linear na faixa entre  $1,6$  a  $1,7 J.g^{-1}.^{\circ}C^{-1}$  (Figura 52), um valor um pouco inferior aos  $2,67 J.g^{-1}.^{\circ}C^{-1}$  de interesse (Tabela 33).

Tabela 33. Propriedades térmicas do RTV615 de acordo com o documento de descrição técnica fornecida pelo fabricante, do PVCP medidos por DSC e dos tecidos biológicos.

PROPRIEDADES TÉRMICAS	UNIDADE	RTV615	PVCP	TECIDO BIOLÓGICO
Faixa de temperatura aplicável	$^{\circ}C$	-60 a 204	6,85 a 46,85	----
Condutibilidade térmica	$W.m^{-1}.K^{-1}$	0,2	0,062 - 0,065	0,47 - 0,56
Calor específico	$J.g^{-1}.^{\circ}C^{-1}$	12,56	1,6 a 1,7	2.67

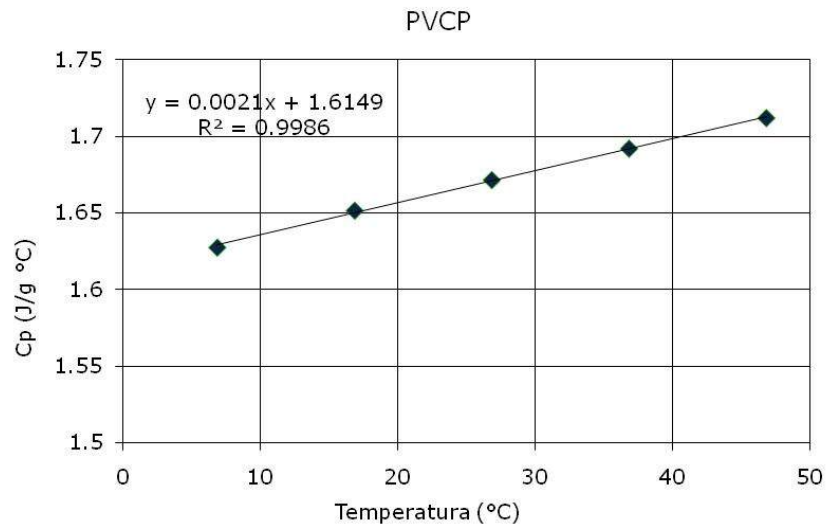


Figura 52. Gráfico da variação do calor específico do PVCP em função da temperatura, utilizando DSC como técnica de medição.

## 12 DISCUSSÃO GERAL

O trabalho foi iniciado a partir de materiais de uso comum da área de *phantoms*, usando a experiência prévia do Laboratório de Ultra-som (LUS/PEB/COPPE/UFRJ). As técnicas de medição de atenuação e velocidade longitudinal empregadas neste trabalho foram as comumente descritas na literatura, exceto aquelas pelo método TOCANDO descrita anteriormente. São poucos os trabalhos que fazem uma comparação inter-laboratorial destas ou apontam a melhor entre elas [41, 39].

Foram produzidos e testados mais de 32 *phantoms*, frutos de misturas de variados materiais, sendo escolhidos, como os mais adequados, os constituídos à base de silicone e PVC. O valor encontrado para o coeficiente de atenuação do RTV615 puro está de acordo com o descrito na literatura [56], podendo mimetizar pele e músculo quanto a esta propriedade. Porém, a velocidade longitudinal deste, se encontra distante dos valores ideais, o que compromete também o valor da impedância acústica. A densidade encontrada de  $1,02 \text{ g.cm}^{-3}$ , está próxima à da gordura, músculo e tecidos moles. Quanto aos valores das propriedades térmicas, o calor específico do silicone puro ( $12,56 \text{ J.g}^{-1}.\text{°C}^{-1}$ ) é de 3 a 4 vezes maior do que o dos tecidos biológicos. Já o valor da condutividade térmica se encontra próximo ao da pele e gordura [11].

A mistura de óleo de silicone 40%, assim como de vaselina 23%, com RTV615 trouxe o coeficiente de atenuação para dentro da faixa de valores dos tecidos moles e da gordura, no entanto, não houve aumento desejado na velocidade de propagação. Os *phantoms* puro e com óleo de silicone preservaram sua transparência, o que pode ser de interesse para aplicações no estudo do campo térmico, utilizando-se os cristais cromotérmicos.

A adição de glicerina ao RTV615 promoveu aumento da velocidade e do coeficiente de atenuação, sendo promissor para mimetizar *phantoms* de músculo. Os valores das propriedades acústicas foram medidos ao longo de 21 meses e parece ter havido diferenças significativas dos valores no final deste período, o que precisa ser confirmado, pois a metodologia de medição das propriedades do phantom sofreu refinamento no mesmo período. Vale a pena notar que o preço de mercado do RTV615 é em torno de R\$ 200,00 por litro, além disso, há restrições quanto à compra do produto,

como por exemplo, necessidade de se apresentar comprovantes de renda anual da firma adquirente.

O PVCP puro apresenta atenuação e velocidade pouco inferiores aos valores dos tecidos moles, e, apesar do elevado desvio-padrão indicado por Spirou et al (2005) para o coeficiente de atenuação, os resultados aqui apresentados confirmam os valores descritos [38]. Este produto é promissor para mimetizar a gordura, pois seu coeficiente de atenuação, velocidade, impedância acústica e densidade se encontram próximos aos respectivos valores deste tecido. O calor específico do PVCP ( $1,65 \text{ J.g}^{-1}.\text{C}^{-1}$ ) é aproximadamente 60% inferior ao da gordura e a condutividade térmica, quase 3 vezes menor.

Como o PVCP pode ser facilmente misturado com outras substâncias, este, apresenta maior versatilidade para o ajuste dos valores das propriedades acústicas. O acréscimo de pó de PVC elevou o coeficiente de atenuação para dentro da faixa dos valores dos tecidos moles e músculo, mas, pouco alterou os valores de velocidade. O mesmo aconteceu com a inserção de glicerina ao produto. O preço de mercado do PVCP é em torno de R\$ 50,00 por litro e não há restrições para aquisição.

Como estes são os primeiros resultados para ambos os produtos, é importante que novas misturas sejam testadas em diferentes concentrações e analisadas ao longo do tempo, utilizando-se uma técnica padronizada e validada para se confirmar os resultados.



Tabela 34. Propriedades acústicas e térmicas dos tecidos e dos *phantoms*.

PHANTOM	Coef. de atenuação		Velocidade $v$ (m.s <sup>-1</sup> )	Impedância $Z$ (MRays)	Densidade $\rho$ (g,cm <sup>-3</sup> )	Calor específico $c$ (J.g <sup>-10</sup> C <sup>-1</sup> )	Condutividade térmica $k$ (W.m <sup>-10</sup> C <sup>-1</sup> )
	$\alpha$ (dB.cm <sup>-1</sup> MHz <sup>-1</sup> )	$n$					
<b>PELE</b>	1,04 a 1,50	----	1498	1,87	1,2	3,59	0,23
<b>GORDURA</b>	0,51	1	1460	1,35	0,96	2,67	0,19
<b>MÚSCULO</b>	1,47	1,1	1595	1,65	1,04	3,64	0,55
<b>TECIDOS MOLES</b>	0,5 a 0,7	-----	1540 – 1590	1,54	1	4,18	0,6
<b>SILICONE PURO</b>	1,51	1,1	1064	1,09	1,02	12,56*	0,20*
<b>SILICONE +VASELINA40%</b>	0,78	1,2	1064	1,04	0,98	---	---
<b>SILICONE +VASELINA23%</b>	0,98	1	1140	---	---	---	---
<b>SILICONE + GLICERINA 33%</b>	1,86	1	1180	---	---	---	---
<b>PVCP PURO</b>	0,38	1,7	1420	1,42	1,00	1,65	0,06
<b>PVCP + VASELINA5%</b>	0,38	1,7	1420	---	---	---	---
<b>PVCP+ PVC9%</b>	0,85	1,6	1420	---	---	---	---
<b>PVCP+GLICERINA10%</b>	0,75	1,7	1420	---	---	---	---

\* Propriedade térmica retirada do documento de descrição técnica do produto.

## 13 CONCLUSÕES

Este trabalho propôs-se a caracterizar as propriedades acústicas de novos materiais visando a confecção de *phantoms* ultrassônicos que pudessem ser mais estáveis e livres de contaminação biológica. Para cumprir este objetivo, foram montadas três linhas de ação, para as quais pode-se obter as seguintes conclusões:

a) Quanto à pesquisa de novos materiais que mimetizam diferentes tecidos (pele, gordura e músculo) com propriedades acústicas e térmicas dentro da faixa de valores de interesse.

O RTV615 tem potencial para mimetizar pele e músculo quanto ao coeficiente de atenuação e sua condutividade térmica é similar à da pele e gordura. A velocidade longitudinal inferior à dos tecidos biológicos não produz alterações significativas nos resultados para aplicações de *phantoms* com pequenas dimensões.

O RTV615 misturado com óleo de silicone ou vaselina em determinadas proporções, pode ser utilizado para mimetizar a atenuação média dos tecidos moles. O RTV615 e suas misturas apresentaram comportamento linear da atenuação em função da frequência compatíveis com os dos tecidos biológicos na faixa de frequências estudada.

O PVCP é um produto promissor para mimetizar a gordura quanto às suas propriedades acústicas.

O PVCP misturado com glicerina ou PVC mimetizam o valor médio do coeficiente de atenuação dos tecidos moles. Maiores concentrações podem produzir *phantoms* de músculo e pele.

Nenhum dos *phantoms* analisados sofreu o ataque de agentes biológicos.

Outras concentrações e outros produtos devem ainda ser testados, tomando como base o silicone e o PVCP e seus valores verificados ao longo de um período maior, a fim de ampliar as aplicações potenciais.

b) Quanto à repetitividade dos protocolos de fabricação dos *phantoms*.

A repetitividade dos protocolos de fabricação dos *phantoms* RTV615 com 23% e 40% de óleo de silicone pôde ser confirmada. O mesmo deve ser feito com os demais *phantoms*.

c) Quanto à incerteza metrológica de diferentes técnicas de medição das propriedades acústicas (velocidade longitudinal e atenuação).

Este é o primeiro trabalho que estima a incerteza metrológica de sistemas experimentais de medição, por transmissão/recepção, da atenuação e velocidade acústicas de *phantoms* biológicos de acordo com o Guia de Expressão da Incerteza de Medidas (JCGM 100:2008) [43].

A expressão da incerteza auxiliou no aprimoramento da técnica de medição dos parâmetros indicando que a maior fonte de incerteza.

Das técnicas avaliadas para medição do coeficiente de atenuação, a transmissão/recepção AFASTADO APARENTE apresentou menor valor de incerteza. Os valores obtidos pela técnica AFASTADO REAL parecem estar subestimados e precisam ser confirmados, até o presente momento, o valor da incerteza por este método não pôde ser estimado.

O aumento do número de ciclos do sinal emitido reduz a incerteza dos valores e a estimação da atenuação por FFT e RMS mostraram-se equivalentes.

A técnica de medição da velocidade longitudinal que apresentou menor valor de incerteza foi a transmissão/recepção TOCANDO, porém, deve-se tomar cuidado com a medição da espessura de *phantoms* maleáveis.

## SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Durante a realização desta tese, surgiram vários tópicos que por diferentes motivos, não foram incorporados à mesma, mas que são de fundamental importância para a continuidade do trabalho. São eles:

Validar a metodologia de medição com um material de referência padrão e estável sob temperatura controlada para definir o erro de medição<sup>3</sup>.

Repetição dos experimentos com o arranjo experimental que apresentou a menor incerteza.

Estender o tempo de avaliação das propriedades dos *phantoms*, para avaliar um eventual limite de sua estabilidade.

Medir as propriedades térmicas dos demais *phantoms*.

Analisar a repetitividade dos outros sete protocolos de fabricação dos *phantoms* (apenas dois protocolos tiveram sua repetitividade comprovada).

---

<sup>3</sup> Erro de Medição: Diferença entre o **valor medido** de uma **grandeza** e um **valor de referência**.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. MILLER, L. H., 2003. Disponível em: <[http://www.acmp.org/meetings/lakegeorge\\_2003/presentations/miller.ppt](http://www.acmp.org/meetings/lakegeorge_2003/presentations/miller.ppt)>. Acesso em: 16 mai 2006.
2. RICKEY, D. W. et al. A Wallless Phantom for Doppler Ultrasound Studies. **Ultrasound in Medicine & Biology**, v. 21, n. 9, 1995. 1163-1176.
3. MADSEN, E. L. et al. Tissue Mimicking Materials for Ultrasound Phantoms. **Medical Physics**, v. 5, n. 5, 1978. 391-394.
4. KATO, H.; ISHIDA, T. Development of an agar phantom adaptable for simulation of various tissues in the range 5-40 MHz. **Phys. Med. Biol.**, v. 32, n. 2, 1987. 221-226.
5. BURLEW, M. M. et al. A New Ultrasound Tissue-Equivalent Material. **Radiology**, n.134, 1980. 517-520.
6. BROWNE, J. E. et al. Assessment of the Acoustic Properties of Common Tissue-mimicking Test Phantoms. **Ultrasound in Med. & Biol.**, v. 29, n. 7, 2003. 1053-1060.
7. MARSILI, I. et al. Novos Materiais para a Confecção de Phantoms Biológicos Ultra-Sônicos, João Pessoa, 2004. 1639-1642.
8. CARDONA, M. A. R. et al. Phantoms para Ultra-som com Perfil para a Velocidade de Propagação da Onda. In: **ANAIS DO CBEB 2000**, Florianópolis – SC, 2000. 1111-1115.
9. MADSEN, E. L.; ZAGZEBSKI, J. A.; GHILARDI-NETTO, T. An Anthropomorphic torso section phantom for ultrasonic imaging. **Med Phys.**, v.7, n. 1, 1980. 43 – 50.
10. BACON, D. R.; SHAW, A. Experimental validation of predicted temperature rises in tissue mimicking Materials. **Phys. Med. Biol.**, v. 38, 1993. 1647-1659.
11. GOSS, S. A.; JOHNSTON, R. L.; DUNN, F. Compilation of Empirical Ultrasonic Properties of Mammalian Tissue II. **Journal of Acoustic Soc Am.**, 68 (1), 1980. 93-108.
12. LIN, W. L. et al. Theoretical Study of Temperature Elevation at Muscle/bone Interface During Ultrasound Hyperthermia. **Medical Physics**, 27 (5), 2000. 1131- 40.
13. FELONENKO, E. A.; KHOKHLOVA, V. A. Effect of acoustic nonlinearity on heating of biological tissue by high-intensity focused ultrasound. **Acoustical Physics**, v. 47, n. 4, 2001. 468-75.
14. MAKOV, Y. N. Thermal fields and thermal doses in ultrasonic surgery: a model of a gaussian focused beam. **Acoustical Physics**, v. 47, n. 3, 2001. 333-40.
15. MAGGI, L. E. et al. Software didático para modelagem do padrão de aquecimento dos tecidos irradiados por ultra-som fisioterapêutico. **Revista Brasileira de Fisioterapia**, São Carlos, v. 12, n. 3, mai./jun 2008. 204-14.
16. DENG, Z. S.; LIU, J. Analytical study on bioheat transfer problems with spatial or transient heating on skin surface or inside biological bodies. **J Biomech Eng.**, v. 124, n. 6, Dec 2002. 638-49.

17. MADSEN, E. L. et al. Ultrasonically tissue-mimicking liver including the frequency dependence of backscatter. **Med. Phys.**, v.9, n. 5, 1982. 703-10.
18. CHIN, R. B. et al. A reusable perfusion supporting tissue-mimicking material for ultrasound hyperthermia phantom. **Med. Phys.**, v. 17, n. 3, 1990. 380 – 390.
19. MADSEN, E. L. et al. Ultrasound Focal lesion detectability phantoms. **Med. Phys.**, v. 18, n. 6, 1991. 1171 – 1180.
20. CLARKE, A. J. et al. A Phantom For Quantitative Ultrasound of Trabecular Bone. **Phys. Med. Biol.**, v. 39, 1994. 1677-1687.
21. FRAYNE, R. et al. A Geometric Accurate Vascular Phantom For Comparative studies of x-ray, ultrasound, and magnetic resonance vascular imaging; construction and geometrical verification. **Med. Phys.**, v. 20 n.2, Mar/Apr 1993. 415-25.
22. MADSEN, E. L.; FRANK, G. R.; DONG, F. Liquid or Solid Ultrasonically Tissue-Mimicking Materials with Very Low Scatter. **Ultrasound in Med. & Biol.**, v. 24, n. 4, 1998. 535–542.
23. BOUCHARD, L. S.; BRONSKILL, M. J. “Magnetic Resonance Imaging of Thermal Coagulation Effects in a Phantom For Calibrating Thermal Therapy Devices. **Med Phys**, v. 27, 2000. 1141–45.
24. LAFON, C. et al. Gel Phantom for Use in High-Intensity Focused Ultrasound Dosimetry. **Ultrasound in Med. & Biol.**, v. 31, n. 10, 2005. 1383–89.
25. WU, J. Tofu as a Tissue-Mimicking Material. **Ultrasound in Med. & Biol.**, Vol. 27, No. 9, 2001. 1297–1300.
26. D’SOUZA, W. D. et al. Tissue mimicking materials for a multi-imaging modality prostate phantom. **Med. Phys.**, v. 28, n. 4, April 2001.
27. PROKOP, A. F. et al. Polyacrylamide Gel As An Acoustic Coupling Medium For Focused Ultrasound Therapy. **Ultrasound in Med. & Biol.**, v. 29, n. 9, 2003. 1351–1358.
28. MADSEN, E. L. et al. Tissue-Mimicking Oil-in-Gelatin Dispersions for Use in Heterogeneous Elastography Phantoms. **Ultrasonic Imaging**, v. 25, 2003. 17- 38.
29. SURRY, K. J. M. et al. Poly(vinyl alcohol) cryogel phantoms for use in ultrasound and MR imaging. **Phys. Med. Biol.**, v. 49 n. 55, 2004. 55 29–46.
30. AIUM TECHNICAL STANDARDS COMMITTEE. METHODS FOR SPECIFYING ACOUSTIC. Methods for specifying acoustic properties of tissue mimicking phantoms and objects, Stage I, 1995.
31. TAKEGAMI, K. et al. Polyacrylamide Gel Containing Egg White as New Model For Irradiation Experiments Using Focused Ultrasound. **Ultrasound in Med. & Biol.**, v. 30, n. 10, 2004. 1419-22.
32. SATO, S. Y.; VIEIRA, C. R. S.; PEREIRA, W. C. A. Materiais Mimetizadores de Tecido para Confeção de Phantoms para Ultra-Som Diagnóstico. **ANAIS DO CBEB’2000**, 2000. 1105 – 10.
33. MANO, E. B.; MENDES, L. C. **Introdução a Polímeros**. 2ª. ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher

- Ltda, 1999.
34. GUITIÁN, R. Evolução dos conceitos de polímero e de polimerização.. **Acessado em: 17/11/2006.** <http://allchemy.iq.usp.br/pub/metabolizando/word-2/evolucao.doc>.
  35. BHOWMICK, A. K.; STEPHENS, H. L. **Handbook of Elastomers: new developments and technology.** New York: Marcel Dekker, INC, 1988.
  36. HARPER, C. A. **Handbook of Plastics and Elastomers.** 1ª. ed. Baltimore, Maryland: McGraw-Hill Book Company, 1975.
  37. SALMAN, K. D. **Desenvolvimento de Poli(cloreto de vinila)-PVC para utilização no tratamento radioterápico de pacientes com câncer.** Campina SP: [s.n.], 1995.
  38. SPIROU, G. M. et al. Optical and acoustic properties at 1064 nm of polyvinyl chloride-plastisol for use as a tissue phantom in biomedical optoacoustics. **Physics in Medicine and Biology**, v. n. 50, p. 141-153, 2005.
  39. MADSEN, E. L. et al. Interlaboratory Comparison of Ultrasonic Backscatter, Attenuation, and Speed Measurements. **J Ultrasound Med**, 18, 1999.
  40. ZELL, K. et al. Acoustical properties of selected tissue phantom materials for ultrasound imaging. **PHYSICS IN MEDICINE AND BIOLOGY**, n. 52, p. N475–N484, October 2007. ISSN 0031-9155. doi:10.1088/0031-9155/52/20/N02.
  41. MADSEN, E. L. et al. Interlaboratory Comparasion of Ultrasonic Attenuation and Speed Measurements. **J. Ultrasound Med.**, 5, 1989. 569-576.
  42. QUEIROGA, R. L. B. **CONSTRUÇÃO DE UM PHANTOM SINTÉTICO COM PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS E ULTRA-SÔNICAS SIMILARES ÀS DO TECIDO BIOLÓGICO HUMANO EM 1,0 E 2,8 MHz,** Rio de Janeiro, 2007.
  43. JCGM 100:2008. **Evaluation of measurement Guide to the expression of uncertainty in measurement.** [S.l.]: JCGM 2008, 2008.
  44. INMETRO. Guia para a expressão da incerteza de medição, Rio de Janeiro-RJ, 2003.
  45. WEAST, R. C. **CRC Handbook of Chemistry and Physics.** 84. ed. New York: CRC, 2003-2004.
  46. AGILENT. Osciloscópio de armazenamento digital Séries 6000. **Manual do usuário, ref. 071-1823-00.**
  47. CANEVAROLO JR, S. V. Técnicas de caracterização de polímeros. 1ª ed. ed. São Paulo, SP: Artliber, 2004.
  48. HALLIDAY, D.; RESNICK, R. In: HALLIDAY, D.; RESNICK, R. **Fundamentos de Física 2: Gravitação, ondas e termodinâmica.** 3ª. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, v. 2, 1991. Cap. 20, p. 182 - 183.
  49. BLAINE, R. L.; MARCUS, S. M. Derivation of temperature-modulated DSC thermal conductivity

- equations. **Journal of thermal analysis**, v.54, 1998. 467-76.
50. HAINES, P. J. **Principles of thermal analysis and calorimetry**. 1ª. ed. Reino Unido: The Royal Society of chemistry, 2002.
51. LUCAS, E. F.; SOARES, B. G.; MONTEIRO, E. E. C. **Caracterização de polímeros: determinação de peso molecular e análise térmica**. 1ª. ed. Rio de Janeiro: E-Papers, 2001.
52. HALLIDAY, D.; RESINICK, R. Calor e a Primeira Lei da Termodinâmica. In: HALLIDAY, D.; RESINICK, R. **Fundamentos de Física 2: Gravitação, Ondas e Termodinâmica**. 3. ed. Rio de Janeiro - RJ: Livros Técnicos e Científicos, v. 2, 1991. Cap. 20, p. 188-189.
53. PARKER, W.; JENKINS, R.; BUTLER. Flash Method of Determining Thermal Diffusivity, Heat Capacity and Thermal Conductivity. **Journal of Applied Physics**, v. 32, n. 9, 1961. 1679-84.
54. 1461-01, A. S. E. **Standard Test Method for Thermal Diffusivity by the Flash Method**. West Conshohocken, PA: ASTM, 2001.
55. COSTA, R. M. Corpo de Prova de Resina Epóxi com Propriedades Termo-cromáticas para Avaliação Qualitativa do Feixe Ultra-sônico Aplicado em Fisioterapia. **Dissertação de mestrado, COPPE/UFRJ**, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2009.
56. ONDA CORPORATION. **Acoustic Properties of Rubbers**. Onda Corporation. [S.l.]. 2003. <http://www.ondacorp.com/>.
57. SOUZA, A. et al. Expressão de incertezas de medição de parâmetros acústicos de phantoms ultrassônicos”. In: **Anais do XXI Congresso Brasileiro de Engenharia Biomédica**, Salvador/Ba, 16 - 20 nov 2008.
58. DOWCORNING. DOW CORNING® 200 FLUID, 350 CST. **DOWCORNING**, 2011. Disponível em: <<http://www4.dowcorning.com/DataFiles/090007b2814ca582.pdf>>. Acesso em: 12 JAN 2011.
59. G.E. RTV615 High Strength Transparent Silicone Rubber Compound. **GE**, 2008. ISSN ISO-8859-1. Disponível em: <[http://www.dcproducts.com.au/RTV\\_Silicone\\_Solutions/Tech\\_Data\\_Sheets/RTV615-tds.pdf](http://www.dcproducts.com.au/RTV_Silicone_Solutions/Tech_Data_Sheets/RTV615-tds.pdf)>. Acesso em: 19 Jan 2011.
60. ORNL. OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY (ORNL). **High Temperature Materials Laboratory (HTML)**, 2011. Disponível em: <<http://html.ornl.gov/index.shtml>>. Acesso em: 16 MAR 2011.
61. JCGM 200:2008. **Vocabulário Internacional de Metrologia – Conceitos fundamentais e gerais e termos associados (VIM)**. INMETRO. Rio de Janeiro, p. 26. 2008. (JCGM 200:2008).