

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS  
Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação

Patrícia Cardoso de Andrade

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE TERMOMETRIA POR ULTRASSOM  
PARA MONITORAMENTO DE TEMPERATURA EM MATERIAIS**

Goiânia

2017

---

**TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES  
ELETRÔNICAS DE TESES E  
DISSERTAÇÕES NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG**

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei nº 9610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou *download*, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

**1. Identificação do material bibliográfico:**      **Dissertação**      **Tese**

**2. Identificação da Tese ou Dissertação:**

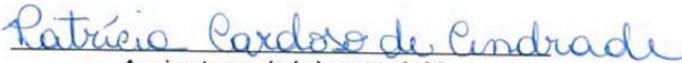
Nome completo do autor: **Patrícia Cardoso de Andrade**

Título do trabalho: **Desenvolvimento de um Sistema de Termometria por Ultrassom para Monitoramento de Temperatura em Materiais**

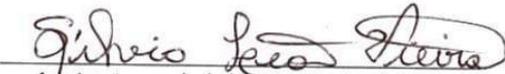
**3. Informações de acesso ao documento:**

Concorda com a liberação total do documento  SIM      NÃO<sup>1</sup>

Havendo concordância com a disponibilização eletrônica, torna-se imprescindível o envio do(s) arquivo(s) em formato digital PDF da tese ou dissertação.

  
Assinatura do(a) autor(a)<sup>2</sup>

Ciente e de acordo:

  
Assinatura do(a) orientador(a)<sup>2</sup>

Data: 14 / 06 / 2017

---

<sup>1</sup>Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. A extensão deste prazo suscita justificativa junto à coordenação do curso. Os dados do documento não serão disponibilizados durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente
- Submissão de artigo em revista científica
- Publicação como capítulo de livro
- Publicação da dissertação/tese em livro

<sup>2</sup>A assinatura deve ser escaneada.

Patrícia Cardoso de Andrade

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE TERMOMETRIA POR ULTRASSOM  
PARA MONITORAMENTO DE TEMPERATURA EM MATERIAIS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Federal de Goiás, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia da Computação.

Área de Concentração: Engenharia da Computação.

Orientador: Prof. Dr. Sílvio Leão Vieira.

Goiânia

2017

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Cardoso de Andrade, Patrícia  
DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE TERMOMETRIA  
POR ULTRASSOM PARA MONITORAMENTO DE TEMPERATURA  
EM MATERIAIS [manuscrito] / Patrícia Cardoso de Andrade. - 2017.  
68 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Dr. Silvio Leão Vieira.  
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Escola  
de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC), Programa  
de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação, Goiânia,  
2017.

Bibliografia. Anexos. Apêndice.  
Inclui siglas, fotografias, abreviaturas, símbolos, gráfico, tabelas,  
lista de figuras, lista de tabelas.

1. Termometria. 2. Monitoramento de Temperatura. 3. Ultrassom.  
4. Processamento de sinais. 5. Termopares. I. Leão Vieira, Dr. Silvio,  
orient. II. Título.

CDU 62:61



### Ata de Dissertação de Mestrado

Ata da sessão de julgamento da Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica e de Computação, área de concentração Engenharia de Computação, da candidata **Patrícia Cardoso de Andrade**, realizada em 05 de maio de 2017.

Aos cinco dias do mês de maio de dois mil e dezessete, às 14h00min, na sala G8, bloco "G" da Escola de Engenharia Elétrica e de Computação (EMC), Universidade Federal de Goiás (UFG), reuniram-se os seguintes membros da Comissão Examinadora designada pela Coordenadoria do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e de Computação: Os Doutores Prof. Dr. Sílvio Leão Vieira – Orientador (IF/UFG), Prof. Dr. Antonio Adilton Oliveira Carneiro – USP e Prof. Dr. Lucas Nonato de Oliveira - IFG, para julgar a Dissertação de Mestrado de **Patrícia Cardoso de Andrade**, intitulada "**Desenvolvimento de um Sistema de Termometria por Ultrassom para Monitoramento de Temperatura em Materiais**", apresentada pela Candidata como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre, em conformidade com a regulamentação em vigor. O Professor Doutor Sílvio Leão Vieira – Orientador (UFG) Presidente da Comissão abriu a sessão e apresentou a candidata que discorreu sobre seu trabalho, após o que, foi arguida pelos membros da Comissão na seguinte ordem: Antonio Adilton Oliveira Carneiro e Lucas Nonato de Oliveira. A parte pública da sessão foi então encerrada e a Comissão Examinadora reuniu-se em sessão reservada para deliberar. A Comissão julgou então que a candidata, tendo demonstrado conhecimento suficiente, capacidade de sistematização e argumentação sobre o tema de sua Dissertação, foi considerada **aprovada** e deve satisfazer as exigências listadas na Folha de Modificação de Dissertação de Mestrado, em anexo a esta Ata, no prazo máximo de 60 dias, ficando o professor orientador responsável por atestar o cumprimento dessas exigências. Os membros da Comissão Examinadora descreveram as justificativas para tal avaliação em suas respectivas Folhas de Avaliação, anexas a esta Ata. Nada mais havendo a tratar, o presidente da Comissão declarou encerrada a sessão. Nos termos do Regulamento Geral dos Cursos de Pós-graduação desta Universidade, a presente Ata foi lavrada, lida e, julgada conforme, segue assinada pelos membros da Comissão supracitados e pela candidata. Goiânia, 05 de maio de 2017.

#### Comissão Examinadora Designada:

Sílvio Leão Vieira  
Prof. Dr. Sílvio Leão Vieira – Orientador (IF/UFG) (Avaliação: Aprovada)

Antonio Adilton Oliveira Carneiro  
Prof. Dr. Antonio Adilton Oliveira Carneiro – USP (Avaliação: Aprovado)

Lucas Nonato de Oliveira  
Prof. Dr. Lucas Nonato de Oliveira - IFG (Avaliação: Aprovado)

\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Wesley Pacheco Calixto – IFG (Avaliação: \_\_\_\_\_)

\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Marcus Fraga Vieira – UFG (Avaliação: \_\_\_\_\_)

#### Candidata:

Patrícia Cardoso de Andrade  
Patrícia Cardoso de Andrade

Este estudo é dedicado às pessoas apaixonadas pela ciência e que se empenham em completá-la com dedicação, vigor e carinho.

—*Patrícia Cardoso*

## AGRADECIMENTOS

Ao Ser Criador do Universo, por tê-lo criado com suas inúmeras complexidades para que pudéssemos ter o prazer de deslumbrarmos suas ciências.

À minha mãe, *Sandra Aparecida*, por sempre acreditar em meu potencial, a qual fez o melhor possível para garantir que eu tivesse ótima formação, não somente científica, mas também formação humana e capacidade de discernimento.

Ao meu marido, *Leandro Tolentino*, pelo apoio e companheirismo.

Ao meu irmãozinho, *Tobias Expedito*, por sempre ser tão amável comigo, de forma que nas horas difíceis sempre tinha carinho e amor para doar.

Ao meu orientador, *Sílvio Leão Vieira*, pela dedicação, apoio e conselhos. Por me proporcionar trabalhar com a física e a computação voltada para a área biomédica e sempre me motivar a superar os problemas que deparamos no meio do caminho.

Aos colegas do *Laboratório de Ultrassom*, que se colocaram dispostos a me auxiliar.

Aos colegas do *Laboratório de Bioengenharia e Biomecânica*, que sempre foram simpáticos e solícitos a me auxiliar a superar qualquer desafio.

Ao Instituto de Física da Universidade Federal de Goiás – UFG pela infraestrutura.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás (FAPEG), edital 05/2012, num. 10267001199.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ), edital MCTI/CNPq 14/2014, num. 46229820140 pelo apoio financeiro e pela bolsa de Mestrado no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação da EMC/UFG.

Aos membros da banca examinadora, que dispuseram do seu tempo para avaliar este projeto.

*“Here are the most important, piece of advice that I’ve passed on to my children. One, remember to look up at the stars and not down at your feet. Two, never give up work. Work gives you meaning and purpose and life is empty without it. Three, if you are lucky enough to find love, remember it is rare, and don’t throw it away.”*

*— Stephen Hawking*

## RESUMO

Medir temperatura interna e/ou gradiente de temperatura em materiais é de fundamental interesse, tanto nas engenharias quanto nas ciências básicas, pois a temperatura está intimamente relacionada com as propriedades do material. O objetivo desse estudo foi desenvolver um sistema de termometria por ultrassom para monitoramento interno de gradiente de temperatura em materiais submetidos a fonte de calor. Conjuntamente, foi desenvolvido um algoritmo computacional responsável em estimar a distribuição de temperatura interna dos materiais. Para essa finalidade foi empregando um osciloscópio de baixo custo como sistema de aquisição de sinais ultrassônicos. Medições foram realizadas durante o regime de aquecimento e resfriamento de um bloco de alumínio. Um sistema de medição de temperatura por termopares foi utilizado para verificar e validar a distribuição de temperatura obtida pelo método de termometria por ultrassom. O desenvolvimento do algoritmo computacional responsável pela comunicação e coleta de dados propiciou medições de temperatura em tempo real. A comparação das medições de temperatura derivada de ambos os métodos apresentou concordância maior que 96%, com diferenças inferiores a  $0,70^{\circ}\text{C}$ . Portanto, conclui-se que a metodologia apresentada mostrou-se relevante dentro do contexto laboratorial para estimativa de temperatura interna de materiais aquecidos.

Palavras-chave: Termometria; Monitoramento de Temperatura; Ultrassom; Processamento de sinais; Termopares.

## ABSTRACT

Measuring internal temperature and/or temperature gradient in materials is of fundamental interest in both engineering and basic sciences because the temperature is closely related to the properties of the material. The purpose of this study was to develop an ultrasound thermometry system for internal temperature gradient monitoring of materials subjected to a heat source. A low cost oscilloscope was used as a system for the acquisition of ultrasonic signals. Jointly, was developed a computational algorithm responsible for estimating the internal temperature distribution of materials. For this purpose was used a low cost oscilloscope as a system for the acquisition of ultrasonic signals. Measurements were taken during the heating and cooling regimen of an aluminum block. A thermocouple temperature measurement system was used to verify and validate the temperature distribution obtained by the ultrasound thermometry method. The development of the computational algorithm responsible for communication and data collection provided real-time temperature measurements. The comparison of the temperature measurements derived from both methods showed agreement greater than 96%, with differences lower than  $0.70^{\circ}\text{C}$ . The methodology presented was relevant within the laboratory context to estimate the internal temperature of heated materials.

Keywords: Thermometry; Monitoring Temperature; Ultrasound; Signal Processing; Thermocouples.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1_ Ilustração do tempo de trânsito na amostra e sua respectiva representação gráfica.....	11
Figura 3.2_ Modelo do arranjo experimental para caracterização do alumínio.....	13
Figura 3.3_ Modelo do bloco de alumínio utilizado neste estudo.....	13
Figura 3.4_ Modelo do arranjo experimental para caracterização do <i>phantom</i> de gelatina e o bife bovino. ....	14
Figura 3.5_ Representação esquemática do sistema de caracterização de tecidos moles e as respectivas formas de ondas na presença da amostra e sem ela. ....	16
Figura 3.6_ Malha computacional. ....	18
Figura 3.7_ Modelo de análise utilizado para estimar a distribuição de temperatura no bloco de alumínio. ....	20
Figura 3.8_ Modelo de esquemático de grades escalonadas para o método de diferenças finitas. ....	21
Figura 3.9_ Fluxograma da análise inversa para determinar a distribuição da temperatura. ....	24
Figura 3.10_ Diagrama esquemático da montagem experimental utilizada. ....	25
Figura 3.11_ Modelo experimental para aquecimento do alumínio.....	27
Figura 3.12_ Modelo experimental para aquecimento e resfriamento do alumínio ...	27
Figura 4.1_ Arranjo experimental para caracterização do alumínio. ....	28
Figura 4.2_ Bloco de alumínio utilizado nesta pesquisa.....	29
Figura 4.3_ Curva de calibração do alumínio.....	30
Figura 4.4_ <i>Phantom</i> de gelatina utilizado este estudo.....	31
Figura 4.5_ Amostra de bife bovino utilizada neste estudo. ....	31
Figura 4.6_ Arranjo experimental para caracterização do <i>phantom</i> de gelatina e o bife bovino. ....	32
Figura 4.7_ Curva de calibração do <i>phantom</i> de gelatina. ....	33
Figura 4.8_ Avaliação da resposta da velocidade do som no bife bovino em função da temperatura. ....	35
Figura 4.9_ Curva de calibração do bife bovino. ....	36
Figura 4.10_ Arranjo experimental para aquecimento do alumínio. ....	38

Figura 4.11_ Perfis da temperatura ao longo do comprimento do bloco sob regime de aquecimento para cada passo temporal. ....	39
Figura 4.12_ Temperatura do bloco na superfície aquecida e na superfície oposta, obtida pelo método de termometria por ultrassom e pelo sistema de termopares ....	40
Figura 4.13_ Diferença de temperatura medição pelo sistema de termopares e o de termometria por ultrassom.....	42
Figura 4.14_ Curva de correlação entre as medições realizadas na superfície aquecida do bloco e estimadas pelo método de termometria por ultrassom e pelo sistema de termopares. ....	43
Figura 4.15_ Arranjo experimental para aquecimento e resfriamento do alumínio. ..	44
Figura 4.16_ Perfis da temperatura ao longo do comprimento do bloco sob regime de aquecimento e resfriamento para cada passo temporal no bloco de alumínio.....	45
Figura 4.17_ Perfis da temperatura ao longo do comprimento do bloco sob regime de aquecimento para cada passo temporal no bloco de alumínio .....	46
Figura 4.18_ Perfis da temperatura ao longo do comprimento do bloco sob regime de resfriamento para cada passo temporal no bloco de alumínio .....	47
Figura 4.19_ Temperatura do bloco na superfície aquecida e na superfície oposta, obtida pelo método de termometria por ultrassom e pelo sistema de termopares ....	48
Figura 4.21_ Diferença de temperatura medida pelo sistema de termopares e o de termometria por ultrassom durante o processo de aquecimento e resfriamento.....	50
Figura 4.22_ Curva de correlação entre as medições realizadas na superfície aquecida do bloco e estimadas pelo método de termometria por ultrassom e pelo sistema de termopares, durante o aquecimento. ....	51
Figura 4.23_ Curva de correlação entre as medições realizadas na superfície aquecida do bloco e estimadas pela TUS e TTP, durante o resfriamento. ....	52
Figura A.1_ Painel frontal do Gerador Ultrassônico de Pulso/Eco 5072PR. ....	63
Figura A.2_ Painel traseiro do Gerador Ultrassônico de Pulso/Eco 5072PR. ....	64
Figura B.1_ Painel frontal do osciloscópio Tektronix TDS2024C .....	65
Figura C.1_ Corte dos ecos.....	66

## LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1_ Parâmetros ajustados no gerador de pulsos ultrassônicos. ....	29
Tabela 4.2_ Velocidade do som na água para em diferentes temperaturas .....	34
Tabela 4.3_ Parâmetros ajustados no gerador de pulsos ultrassônicos. ....	34
Tabela 4.4_ Velocidade do som na água para a caracterização do bife bovino. ....	36
Tabela 4.5_ Ajuste do gerador ultrassônico para a caracterização do bife bovino....	37
Tabela 4.6_ Ajuste do gerador ultrassônico na TUS no bloco de alumínio. ....	38
Tabela 4.7_ Temperatura para a superfície aquecida do bloco de alumínio em diferentes instantes de tempo. ....	41
Tabela 4.8_ Variação de temperatura em cada passo no tempo medido na superfície aquecida do bloco de alumínio. ....	43
Tabela 4.9_ Temperatura para a superfície aquecida do bloco de alumínio em diferentes instantes de tempo durante o processo de aquecimento e resfriamento..	49
Tabela 4.10_ Variação em módulo da temperatura em cada passo no tempo medido na superfície aquecida do bloco de alumínio. ....	52
Tabela B.1_ Configurações específicas do TDS2024C. ....	65
Tabela D.1_ Velocidade do som na água pura. ....	67

## LISTA DE ABREVIACOES

<b><math>\mu</math>s</b>	Micro Segundos
<b>BNC</b>	Conector Bayonet Neill Concelman
<b>DAQ</b>	Data Acquisition
<b>EDPs</b>	Equações Diferenciais Parciais
<b>FTCS</b>	Forward Time Central Space
<b>GS</b>	Giga Samples
<b>HPF</b>	High Pass Filter
<b>LPF</b>	Low Pass Filter
<b>MDF</b>	Método das Diferenças Finitas
<b>MHz</b>	Mega Hertz
<b>MS</b>	Mega Samples
<b>ms</b>	Mili Segundos
<b>NI</b>	National Instruments
<b>P/E</b>	Pulso/Eco
<b>PRF</b>	Pulse Repetition Frequency

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b><math>D</math></b>	Largura do meio
<b><math>dt</math></b>	Diferença temporal entre o sinal registrado antes e depois de colocar a amostra entre o transdutor e placa refletora
<b><math>F</math></b>	Distância de campo próximo
<b><math>f</math></b>	Frequência do transdutor
<b><math>i</math></b>	Índices correspondentes às coordenadas espaciais
<b><math>L</math></b>	Comprimento do meio
<b><math>N</math></b>	Número de pontos espaciais da rede
<b><math>n</math></b>	Índices correspondentes às coordenadas temporais
<b><math>r</math></b>	Fator de convergência/Critério de estabilidade de Von Neumann
<b><math>R^2</math></b>	Constante de determinação obtida a partir da regressão linear
<b><math>T</math></b>	Temperatura
<b><math>t_L</math></b>	Tempo de trânsito
<b><math>t_{sd}</math></b>	Tempo de propagação do ultrassom entre as interfaces frontal e traseira da amostra
<b><math>t_{wd}</math></b>	Tempo de viagem do som que passa pela distância $D$ sem a amostra presente.
<b><math>v</math></b>	Velocidade do ultrassom em função da temperatura
<b><math>v_0</math></b>	Velocidade do ultrassom na água
<b><math>\beta</math></b>	Constante experimental
<b><math>\xi</math></b>	Constante experimental (sensibilidade inversa)
<b><math>\Delta t</math></b>	Intervalo de tempo na rede
<b><math>\Delta x</math></b>	Intervalo espacial na rede

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
<b>2 TERMOMETRIA</b> .....	<b>6</b>
2.1. TÉCNICAS DE TERMOMETRIA .....	6
2.2. TERMOMETRIA POR ULTRASSOM .....	9
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>11</b>
3.1. TEMPO DE TRÂNSITO .....	11
<b>3.1.1 Princípio da medição do tempo de trânsito da onda ultrassônica</b> .....	<b>11</b>
3.2. CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS .....	12
<b>3.2.1 Alumínio</b> .....	<b>12</b>
<b>3.2.2 Phantom de Gelatina e Bife Bovino</b> .....	<b>14</b>
3.3. MÉTODO DE TERMOMETRIA POR ULTRASSOM.....	17
<b>3.3.1 Método das diferenças finitas</b> .....	<b>17</b>
<b>3.3.2 Modelo de condutividade térmica</b> .....	<b>19</b>
<b>3.4.1 Modelagem do sistema</b> .....	<b>20</b>
<b>3.4.2 Condições de contorno</b> .....	<b>22</b>
<b>3.4.3 Fluxograma da análise inversa</b> .....	<b>23</b>
<b>3.4.4 Arranjo experimental</b> .....	<b>25</b>
<b>3.4.5 Validação do método de termometria por ultrassom</b> .....	<b>26</b>
<b>3.4.6 Sistema de aquecimento</b> .....	<b>26</b>
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>28</b>
4.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS .....	28
<b>4.1.1 Caracterização do alumínio</b> .....	<b>28</b>
<b>4.1.2 Caracterização do <i>phantom</i> de gelatina</b> .....	<b>30</b>
<b>4.1.3 Caracterização do bife bovino</b> .....	<b>34</b>
4.2. TERMOMETRIA POR ULTRASSOM .....	37
<b>4.2.1 TUS no alumínio</b> .....	<b>37</b>
<b>4.2.2 TUS em simulador de tecido mole</b> .....	<b>53</b>
<b>5 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS</b> .....	<b>55</b>
<b>6 TRABALHOS PUBLICADOS E SUBMETIDOS</b> .....	<b>56</b>
<b>7 BIBLIOGRAFIA</b> .....	<b>57</b>
<b>APÊNDICE</b> .....	<b>60</b>
A. TEMPERATURA NA SUPERFÍCIE AQUECIDA.....	60
<b>ANEXOS</b> .....	<b>63</b>
A. GERADOR ULTRASSÔNICO DE PULSO/ECO 5072PR.....	63
B. OSCILOSCÓPIO TEKTRONIX TDS2024C .....	65

C. CORRELAÇÃO CRUZADA .....	66
VELOCIDADE DO SOM NA ÁGUA.....	67

## 1 INTRODUÇÃO

Medir temperatura interna e/ou gradiente de temperatura em materiais é de fundamental interesse, tanto nas engenharias quanto nas ciências básicas, pois a temperatura está intimamente relacionada com as propriedades do material. Na indústria, por exemplo, para ter controle na produção de algum material é importante saber a temperatura interna e a distribuição do calor no interior do material. A temperatura está intimamente relacionada com as propriedades do material e o gradiente de temperatura durante o processo de fabricação influencia diretamente a produtividade e a qualidade dos produtos finais. (IHARA; TAKAHASHI, 2009).

Na medicina é de extrema importância o monitoramento térmico durante o tratamento de patologias empregando técnicas de hipertermia, técnica que aplica quantidade suficiente para elevar a temperatura corporal local, capaz de provocar morte celular. Durante esses procedimentos, é necessário ter controle da temperatura ao longo do processo de aquecimento da região afetada, para que se garanta segurança e eficácia no tratamento da doença. Dessa forma, assegura-se que somente as células anormais sejam afetadas, sem grandes danos as células saudáveis (RIEKE; BUTTS PAULY, 2008).

Em princípio, qualquer elevação de temperatura superior a 6°C acima da temperatura corporal normal (isto é, a uma temperatura  $T \geq 43^{\circ}\text{C}$ ) certamente causará danos ao tecido. Com base em experimentos *in vitro*, a exposição a uma temperatura de 43°C durante 240 minutos é letal (AZARI, 2010).

O monitoramento da temperatura é realizado hoje por meio de técnicas como o uso de termopares, sensores guiados por fibras ópticas, nanotermometria de luminescência, radiação por infravermelho, ressonância magnética, fotoacústica, e ultrassom (IHARA; TAKAHASHI, 2009), (LEWIS; STARUCH; CHOPRA, 2015), (DEL ROSAL *et al.*, 2016).

As técnicas baseadas em termopar convencional e com sondas guiadas por fibra óptica são amplamente utilizadas, no entanto são técnicas invasivas e nem sempre é possível obter a distribuição espacial da temperatura devido à limitação da instalação desses sensores térmicos dentro do material (IHARA; TAKAHASHI, 2009).

A nanotermometria de luminescência (NL) é baseada no uso de nanopartículas luminescentes inseridas no material que se quer aferir a temperatura. Uma variedade de moléculas fluorescentes, polímeros e nanopartículas foram exploradas para fins de termometria, desde tinturas orgânicas e proteínas fluorescentes até uma ampla gama de nanopartículas, incluindo nanocristais de conversão ascendente e de conversão descendente com base em terras raras, NPs metálicos e pontos quânticos semicondutores. Esta constitui técnica não invasiva, no entanto, não tem sido tão amplamente explorada, pois a penetração da luz nos tecidos é limitada a algumas centenas de micrômetros (DEL ROSAL *et al.*, 2016).

A técnica de termometria por radiação de infravermelho é conhecida como um método alternativo para a medição da temperatura, permitindo o monitoramento térmico sem que haja contato com o meio. No entanto, este método é dificultado pela diferente emissividade e reflexão da radiação infravermelha por outras fontes de calor, fornecendo imprecisão para a medição. Outro fator limitante dessa técnica é a profundidade do monitoramento. Devido ao baixo poder de penetração das ondas infravermelhas, em materiais densos, o que a torna ineficaz para medições da temperatura interna (IHARA *et al.*, 2013).

A ressonância magnética (RM) é amplamente explorada para o monitoramento de temperatura interna de tecidos biológicos. Em ambiente clínico, a RM é extremamente útil para realizar o controle da fonte de calor, principalmente em tratamentos que empregam hipertermia por ultrassom (RIEKE; BUTTS PAULY, 2008), evitando que a temperatura não exceda limites críticos no local sob aquecimento. Esta possui algumas qualidades que a torna atrativa, tais como: capacidade de obtenção de imagem em qualquer plano de digitalização, boa resolução espacial e temporal, não usa radiação ionizante, possibilidade de construção de mapas de temperatura *in vivo*, e o monitoramento em tempo real (RIEKE; BUTTS PAULY, 2008). Contudo, a técnica de RM não é compatível para estudo de certos tipos de materiais, como os metais. E o custo dessa técnica é de cerca de setenta e cinco vezes o custo da técnica aqui proposta.

A fotoacústica é outra técnica que pode ser usada para monitoramento térmico de forma não invasiva, a qual emprega transdutor de ultrassom (MHz) e laser pulsado de nanosegundos. Assim, ao se irradiar certa região de tecido com o laser o meio absorve e emite pulsos acústicos que são detectados pelo transdutor

(PAVAN; CARNEIRO; EMELIANOV, 2012). Embora a fotoacústica possua tais vantagens, seu uso é considerado pouco prático, pois requer uma mesa óptica para ser executada. Assim, dificultando sua aplicação em ambientes diversificados de medição. Além disso, a instrumentação empregada na termometria por fotoacústica possui cerca de duas vezes o valor da técnica aqui proposta.

A técnica de ultrassom se destaca dentre as inúmeras que podem ser empregadas para monitorar temperatura de um objeto. Devido à capacidade para sondar o interior de materiais espessos, e a sua elevada sensibilidade à temperatura faz dela forte candidata (IHARA; TAKAHASHI, 2009), (IHARA *et al.*, 2013), (TAKAHASHI; IHARA, 2008). Além de ser uma técnica de medição não invasiva, não destrutiva, possível de poder empregar equipamento portátil, ser compatível com todos os tipos de materiais e com custo relativo muito inferior a todas as demais técnicas aqui mencionadas.

Entre os diversos procedimentos abordados, o método de análise inversa acoplada com o método de diferenças finitas (MDF) tem se mostrado promissor (IHARA; TAKAHASHI, 2009), (IHARA *et al.*, 2013), (KOSUGI; IHARA; MATSUYA, 2012a). Essa metodologia permite a estimativa da distribuição de temperatura por meio da solução da equação de condução de calor.

As técnicas de termometria anteriormente apresentadas possuem muitas particularidades que as tornam distintas. No entanto, um ponto em comum é que todas necessitam de um sistema de aquisição de dados (DAQ). Porém, esses sistemas possuem custo relativo elevado. Por exemplo, uma DAQ para aquisição de sinais de ultrassom custa, no mínimo, três vezes mais que um osciloscópio de uso geral.

Hoje em dia, diversos setores industriais e científicos necessitam realizar de alguma forma o monitoramento de temperatura de processos químicos, metalúrgicos e biomédicos. No entanto, são raros os achados no mercado de dispositivos móveis capazes de sondar temperatura no interior de matérias de forma não invasiva e não destrutiva. Com base nessas necessidades é proposto o presente estudo que visa desenvolver tecnologias de natureza portátil para monitoramento de temperatura baseado em ultrassom pulso/eco explorando em laboratório a potencialidade de um instrumento de medição, tal como o osciloscópio, para aquisição de dados. Tendo

em mente que para o desenvolvimento dessa nova tecnologia seria de fundamental importância o emprego de instrumentos de baixo custo.

Para isso é desenvolvido uma rotina computacional de processamento de sinais ultrassônicos para quantificar a temperatura interna de materiais e uma sub-rotina para realizar a comunicação em tempo real com um osciloscópio e com um sistema de termometria por termopares, este usado para a validação das medições obtidas pelo sistema de termometria por ultrassom. A investigação do comportamento da velocidade do som nos materiais submetidos ao estresse térmico é realizada com o objetivo de obtenção da curva de calibração do sistema. O sistema de termometria ultrassônica é testado em materiais metálicos, objeto simulador de tecido biológico (*phantoms*) e em tecido biológico (*ex vivo*).

Os resultados futuros dessa investigação poderão contribuir para a consolidação de um novo dispositivo termométrico que pode vir a ser útil em diversas aplicações. Por exemplo, na indústria, no campo de ensaios não destrutivos no monitoramento de componentes ou processos submetidos a intensos estresses térmicos, bem como na área biomédica, auxiliando em procedimentos de terapia térmica (hipertermia), com mínima invasão para o tratamento de doenças localizadas.

Com o intuito de melhor esclarecer os tópicos discutidos nessa dissertação, o estudo aqui proposto foi estruturado nas próximas seções da seguinte forma: Na Seção 1 foi descrito os objetivos e a motivação deste trabalho. Na Seção 2 foi elaborada uma revisão literária das principais técnicas de termometria existentes e discutidos detalhadamente diversos métodos de termometria por ultrassom, também foi apresentado o método das diferenças finitas para solução do problema de condução do calor. Na Seção 3 foi descrito os materiais e métodos empregados no monitoramento térmico por ultrassom pulso/eco e posterior validação do método por termopares, também foi descrito como os materiais amostrados foram caracterizados. Na Seção 4 foram apresentados os resultados da caracterização dos materiais e da termometria por ultrassom, bem como a análise e discussão dos mesmos. Na Seção 5, foi apresentada a conclusão do estudo e as perspectivas futuras. Na Seção 6, foi apresentado os trabalhos já publicados e submetidos.

## 2 TERMOMETRIA

### 2.1. TÉCNICAS DE TERMOMETRIA

Medições de temperatura tornaram-se uma das questões mais fundamentais e importantes nos campos da ciência dos materiais e engenharia. Isto é basicamente porque as propriedades materiais, tais como comportamentos mecânicos, elétricos e químicos, estão relacionadas à temperatura e muitas vezes mostram uma dependência da temperatura. No desenvolvimento de materiais e fabricação, é fortemente necessário monitorar a distribuição de temperatura e sua variação transitória do material a ser processado a altas temperaturas. Isso porque o estado de temperatura no material exerce influência crucial na qualidade e produtividade dos produtos finais (KOSUGI; IHARA; MATSUYA, 2012a), (ULIANA; PAVAN, 2014).

Em sistemas *in vivo* é imperativo que a medição da temperatura durante um procedimento de hipertermia forneça uma estimativa precisa da região no tecido que irá sofrer ablação. Imagens térmicas *in vivo* também podem ser usadas para monitorar áreas sensíveis, protegendo-as contra danos não desejados, aumentando assim a segurança do tratamento. Assim, por meio de aquecimento controlado, células cancerígenas podem ser destruídas. Ao mesmo tempo, danos mínimos são causados ao tecido saudável circundante. A termometria também pode ser usada como ferramenta de diagnóstico precoce contra algumas doenças, incluindo os processos inflamatórios ou o desenvolvimento de tumores malignos (LEWIS; STARUCH; CHOPRA, 2015), (DEL ROSAL *et al.*, 2016), (RIEKE; BUTTS PAULY, 2008).

Como descrito, atualmente existem várias técnicas de termometria, entre elas as que empregam sensores de temperatura invasivos geralmente caem em duas classes: termopares e fibra óptica. Os termopares e as sondas guiadas por fibra óptica não permitem muitas vezes a obtenção da distribuição espacial da temperatura, pois são limitadas à instalação (IHARA; TAKAHASHI, 2009). Medições de temperatura em tecido biológico são precisas apenas na localização espacial do sensor, impedindo a estimativa da distribuição espacial devido ao fluxo sanguíneo

heterogêneo e absorção de energia (LEWIS; STARUCH; CHOPRA, 2015).

O sensor invasivo ideal não modularia o campo de terapia térmica e seria insensível às tensões devido à expansão térmica ou ao movimento do paciente. Além disso, o sensor invasivo cria uma discrepância entre a temperatura na sonda e o tecido circundante (MORRIS *et al.*, 2008). Já as sondas de fibra óptica são geralmente insensíveis à interferência eletromagnética ambiental, mas podem ser influenciadas pela luz no caso da terapia térmica a laser (DAVIDSON *et al.*, 2005).

A nanotermometria de luminescência (NL) é baseada no uso de nanopartículas luminescentes, cujas propriedades de emissão são dependentes da temperatura na faixa de temperatura fisiológica (10-50°C). Os nanotermômetros luminescentes são capazes de detectar variações de intensidade, posição de pico, anisotropia de polarização, tempo de vida de fluorescência ou forma de banda. A NL constitui uma técnica que pode ser implementada utilizando uma fonte de luz para excitação óptica de nanotermômetros e um sistema apropriado para monitorar, em tempo real, a sua luminescência. No entanto, a NL não tem sido tão amplamente explorada para aplicações *in vivo* e *in vitro*, devido a maioria dos termômetros luminescentes ter comprimentos de onda de excitação e emissão na faixa do espectro visível, onde a penetração da luz nos tecidos é limitada a algumas centenas de micrômetros. Portanto, a utilização dessas sondas visíveis como nanotermômetros *in vivo* tem sido restrita a pequenos organismos semitransparentes, como larvas de moscas. (DEL ROSAL *et al.*, 2016)

A técnica de radiação de infravermelho não necessita de contato com o meio, contudo possui alguns problemas durante a medição da temperatura, devido as diferentes emissividades do meio, podendo sofrer interferência na medição por outras fontes de calor, além disso, esta técnica possui um limite de profundidade para monitoramento da temperatura (IHARA *et al.*, 2013).

A fotoacústica é usada como uma técnica de monitoramento de temperatura. Ela é considerada uma técnica híbrida, pois combinam ultrassom com outra modalidade de imagem para produzir um sistema de imagem com desempenho aumentado. Na fotoacústica é usado ultrassom de baixo contraste combinado com técnicas de imagem ótica de baixa resolução (LEWIS; STARUCH; CHOPRA, 2015). Na fotoacústica, um breve, mas intenso pulso de luz com duração de nanosegundo é produzido por um *laser*. Devido à absorção óptica diferenciada, pequenos

aumentos de temperatura no tecido levam à expansão térmica e à geração subsequente de uma onda acústica. Os receptores de ultrassom podem ser sincronizados com os pulsos do Laser, de forma que as ondas fotoacústicas podem ser detectadas. A reconstrução das fontes das ondas fotoacústicas pode ser conseguida pelo escaneamento de um transdutor focalizado (PAVAN; CARNEIRO; EMELIANOV, 2012), (ULIANA; CARNEIRO; PAVAN, 2014).

Clinicamente, a técnica padrão empregada atualmente para a medição não-invasiva de temperatura *in vivo* é a ressonância magnética (RM). As vantagens da técnica para a termometria é que ela propicia medições quantitativas de temperatura no corpo sem a necessidade de uma calibração a priori no tecido alvo, é não invasiva, não ionizante, e pode ser adquirida em múltiplos planos ou volumes (LEWIS; STARUCH; CHOPRA, 2015). As resoluções espaciais, temporais e de temperatura são aceitáveis para terapias térmicas clínicas, tais como hipertermia e ablação térmica. O método de termometria por RM permite a medição de mudanças de temperatura relativas no corpo com uma resolução de alguns milímetros, resolução temporal de segundos e uma precisão de temperatura de aproximadamente 1°C em tecido biológico mole. No entanto, a técnica não conseguiu medir a temperatura na gordura (LEWIS; STARUCH; CHOPRA, 2015).

A principal desvantagem da RM é o custo e a falta de portabilidade associada ao método, bem como a necessidade de projetar sistemas de terapia personalizada para trabalhar dentro do forte campo magnético do tomógrafo (RIEKE; BUTTS PAULY, 2008), (DE SENNEVILLE et al., 2007). Outro fator não atrativo na RM é a inviabilidade de poder fazer monitoramento da temperatura em qualquer tipo de material.

Investigações sobre a tomografia computadorizada para a termometria datam de pouco tempo após a introdução clínica da modalidade na década de 1970, esforços tem sido feitos para minimizar a radiação ionizante nessa técnica (SACCOMANDI; SCHENA; SILVESTRI, 2013). No entanto, é duvidoso que esta abordagem terá vantagens sobre a termometria ultrassônica, mesmo na fase de desenvolvimento (LEWIS; STARUCH; CHOPRA, 2015).

O ultrassom também é uma técnica não invasiva bastante explorada para monitorar temperatura interna de um meio, pois ele é compatível com todos os tipos de materiais e possui um valor comercial menor que muitas das técnicas citadas

anteriormente, além de ser um equipamento de pequeno porte. Na seção seguinte foi discutido em detalhes o uso da termometria por ultrassom em diversas aplicações.

## 2.2. TERMOMETRIA POR ULTRASSOM

O ultrassom é usado para caracterizar vários meios, principalmente quando estes são impenetráveis por radiação eletromagnética não ionizante. É necessária a geração de ondas ultrassônicas por transdutores e a recepção dessas após terem passado por todo ou parte do objeto sob avaliação. A diminuição da amplitude da onda determina a atenuação, enquanto o atraso da propagação da onda ultrassônica especifica a velocidade do som no meio. Estes parâmetros diferem para vários materiais e também dependem das condições ambientais tais como a temperatura. A dependência da temperatura com a velocidade do ultrassom no meio foi relatada pela primeira vez por Alfred M. Mayer em 1873 (AFANEH *et al.*, 2011).

Experimentalmente, um dos primeiros autores a empregar ultrassom para monitoramento de temperatura foi Gilbert e colaboradores, em 1985, durante um tratamento por criogenia de carcinoma hepatocelular (GILBERT *et al.*, 1985). Neste estudo foi observado que durante o processo de resfriamento o tecido resfriado aparecia nas imagens de ultrassom modo brilho (Modo-B) mais brilhante que o tecido normal. Também foi observado que a região que foi resfriada aparecia ecogênica em relação ao tecido que não foi tratado.

Quanto a disposição espacial do posicionamento dos transdutores essas técnicas podem empregar: a) imagem de cavitação passiva, b) ultrassom de transmissão, c) ultrassom pulso/eco.

A imagem de cavitação passiva é um método que emprega matrizes de transdutores de ultrassom para produzir imagens de emissões acústicas proveniente do fenômeno de cavitação passiva. Esse método vem sendo explorado no monitoramento em tempo real de ablação térmica por ultrassom.

Ultrassom de transmissão é um método que emprega ultrassom contínuo ou pulsado, emitido por um transdutor e outro transdutor que não faz parte do conjunto transmissor recebe os sinais. Nesse método são empregados dois transdutores de ultrassom um emissor e outro receptor.

Desde então, vários métodos específicos de termometria por ultrassom têm sido propostos. Por exemplo: Imagem modo-brilho (modo-B); Imagem de Nakagami; Rastreamento de *speckle* e imagens de deformações térmicas; Elastografia; Termometria por ondas transversais; Movimento harmônico local; Emissão acústica estimulada; Contraste de fase e termoacústica; Tomografia por ultrassom; Monitoramento passivo (LEWIS; STARUCH; CHOPRA, 2015); e Detecção do tempo de trânsito (time-of-flight) (JIA et al., 2016).

A técnica de imagem modo-brilho se baseia na emissão ondas ultrassônicas longitudinais de alta frequência, ao se propagarem dentre dois meios de diferentes impedâncias as ondas são refletidas de volta ao transdutor e então é formada a imagem. Quanto maior a diferença de impedância entre os dois meios, maior será a intensidade da reflexão. Tecidos com menor densidade refletem menos som e geram imagens mais escuras. Já, tecidos mais densos formam pontos mais brilhantes na imagem (PEQUENO et al., 2009).

O ultrassom por imagiamento Nakagami é um modo recentemente desenvolvido de imagem que mapeia espacialmente usando um parâmetro da função de densidade de probabilidade, envelope backscatter. Pesquisadores exploraram o potencial do uso da imagem Nakagami para superar o método das imagens tradicionais em modo B (ZHANG et al, 2012).

As imagens por elastografia consistem nas propriedades mecânicas dos tecidos moles, que são dependentes com a temperatura e as propriedades elásticas apresentam alterações com a temperatura (SAPIN-DE BROSES, PERNOT, TANTER, 2011). A dependência da temperatura é não-linear, ocorrendo uma grande transição quando os tecidos sofrem coagulação térmica (SHAHMIRZADI et al, 2014). Vários grupos investigaram a possibilidade de explorar esta propriedade física do tecido para monitorizar ou controlar uma terapia de ablação térmica, com ultrassom e ressonância magnética. A imagiologia da propagação da onda de cisalhamento nos tecidos é possível tanto com ressonância magnética como com ultrassom (GENNISSON et al, 2013). No caso do ultrassom isto pode ser conseguido gerando deslocamentos de tecido remotamente no tecido através do princípio de força de radiação ou de estimulação mecânica de baixa frequência. Um método desenvolvido para este tipo de imagem é referido como imagem de onda de cisalhamento supersônica.

Ultrassom pulso/eco é um método de diagnóstico em que são transmitidos pulsos de ultrassom de curta duração na região a ser estudada, e os sinais de eco resultantes do espalhamento e reflexão são detectados e apresentados. Nesse caso, apenas um único elemento transdutor é usado para emitir e receber os sinais (JIA *et al.*, 2016), (KOSUGI; IHARA; MATSUYA, 2012b), (SUN; YING, 1999).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

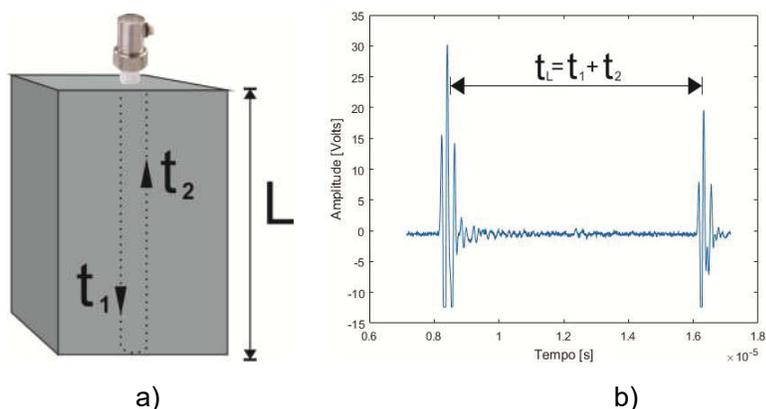
O método de termometria por ultrassom consiste em se empregar ultrassom pulso/eco conjuntamente com uma análise inversa acoplada com o cálculo unidimensional das diferenças finitas, com o objetivo de quantificar temperatura de materiais. Primeiramente o método será aplicado para o controle da distribuição de temperatura de uma placa de alumínio sob aquecimento. Em seguida pretende-se aperfeiçoar o método para ser aplicado em tecido biológico e *ex vivo*.

#### 3.1. TEMPO DE TRÂNSITO

##### 3.1.1 Princípio da medição do tempo de trânsito da onda ultrassônica

O tempo de trânsito do ultrassom pulso/eco ( $t_L$ ) representa o atraso temporal para que a onda percorra uma distância de duas vezes o comprimento da amostra ( $L$ ). Ou seja, o tempo de ida do sinal ultrassônico até a extremidade do material ( $t_1$ ), mais o tempo volta ( $t_2$ ), conforme representado na Figura 3.1.

Figura 3.1\_ Ilustração do tempo de trânsito na amostra e sua respectiva representação gráfica.



Fonte: Próprio autor.

O princípio de medição de temperatura por ultrassom baseia-se na dependência da velocidade do som no meio com a temperatura (JIA *et al.*, 2016). Logo, o  $t_L$  na direção de propagação da distribuição da temperatura pode ser determinado por

$$t_L = 2 \int_0^L \frac{1}{v(T)} dx \quad (3.1)$$

em que  $L$  representa o comprimento do meio e  $v(T)$  é a velocidade do ultrassom em função da temperatura.

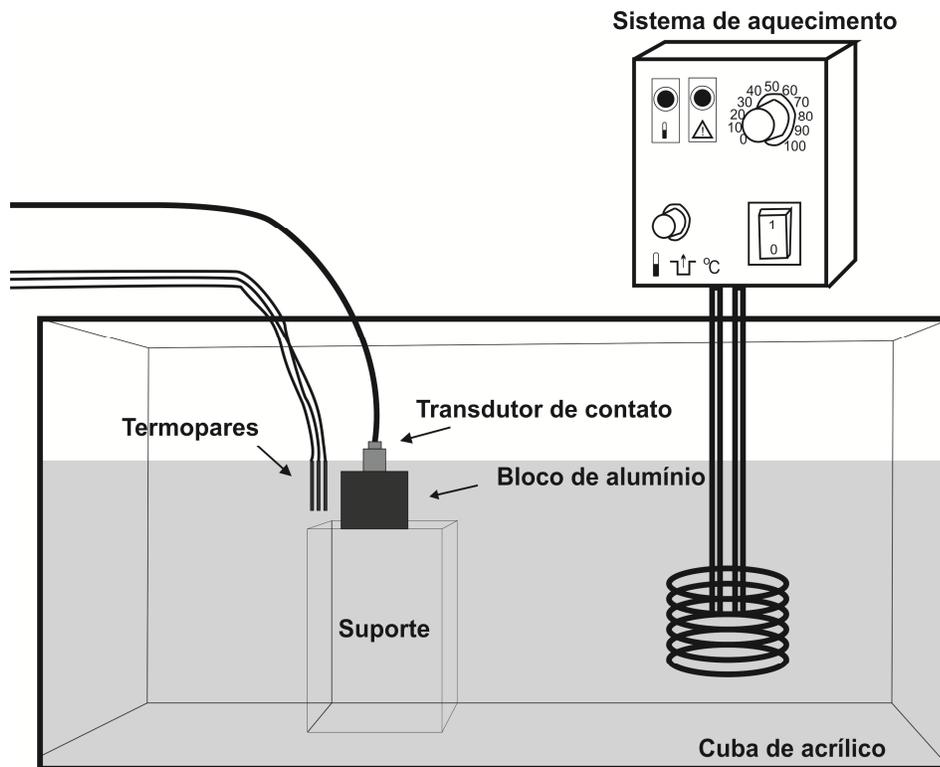
### 3.2. CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS

A resposta do sistema de termometria ultrassônica foi avaliada empregando-se materiais, tais como alumínio, gelatina bovina para simular tecido biológico (*phantoms*) e bife bovino (*ex vivo*).

#### 3.2.1 Alumínio

O arranjo experimental proposto para a obtenção da curva da velocidade *versus* temperatura e da constante experimental  $\xi$  foi montado conforme Figura 3.2. Para a obtenção da temperatura utilizou-se de: Uma cuba de acrílico de  $(34,80 \pm 0,05)$  cm de comprimento,  $(20,80 \pm 0,05)$  cm de altura e  $(19,00 \pm 0,05)$  cm de largura, tendo paredes de  $(1,00 \pm 0,05)$  cm de espessura; Água de torneira; Um aquecedor termostático de imersão (A100, Lauda-Brinkmann, Lauda, Königshofen, Alemanha); Sistema de termometria e conjunto de três termopares. A temperatura média aferida pelo conjunto de termopares foi usada como temperatura do sistema. Para a obtenção da velocidade utilizou-se de um transdutor ultrassônico de contato (V110-RM, Panametrics, MA, USA, de 5,0 MHz, emissor/receptor de ondas longitudinais e diâmetro de 12,7 mm), conectado a um gerador/receptor de pulsos ultrassônicos (*Pulser/Receiver*) (5072PR, Olympus, PA, USA) via cabo coaxial apropriado (Detalhes do instrumento vide Anexo A). Os sinais provenientes desse instrumento foram visualizados e adquiridos por um osciloscópio (TDS2024C, Tektronix, OR, USA) (Anexo B).

Figura 3.2\_ Modelo do arranjo experimental para caracterização do alumínio.

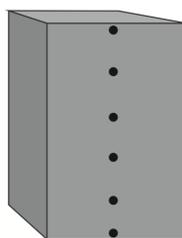


Fonte: Próprio autor.

O transdutor foi acoplado à superfície de um bloco de alumínio estrutural (Liga 7004) de  $(4,500 \pm 0,005)$  cm de comprimento,  $(2,500 \pm 0,005)$  cm de largura e  $(3,100 \pm 0,005)$  cm de espessura,

Figura 3.3. Então, o alumínio foi totalmente submerso em água. Em seguida variou-se a temperatura do sistema e cinco medições de temperatura foram coletadas. A cada medição foi esperado tempo suficiente para o sistema entrar em equilíbrio térmico.

Figura 3.3\_ Modelo do bloco de alumínio utilizado neste estudo.



Fonte: Próprio autor.

A velocidade do ultrassom no meio foi dado por:

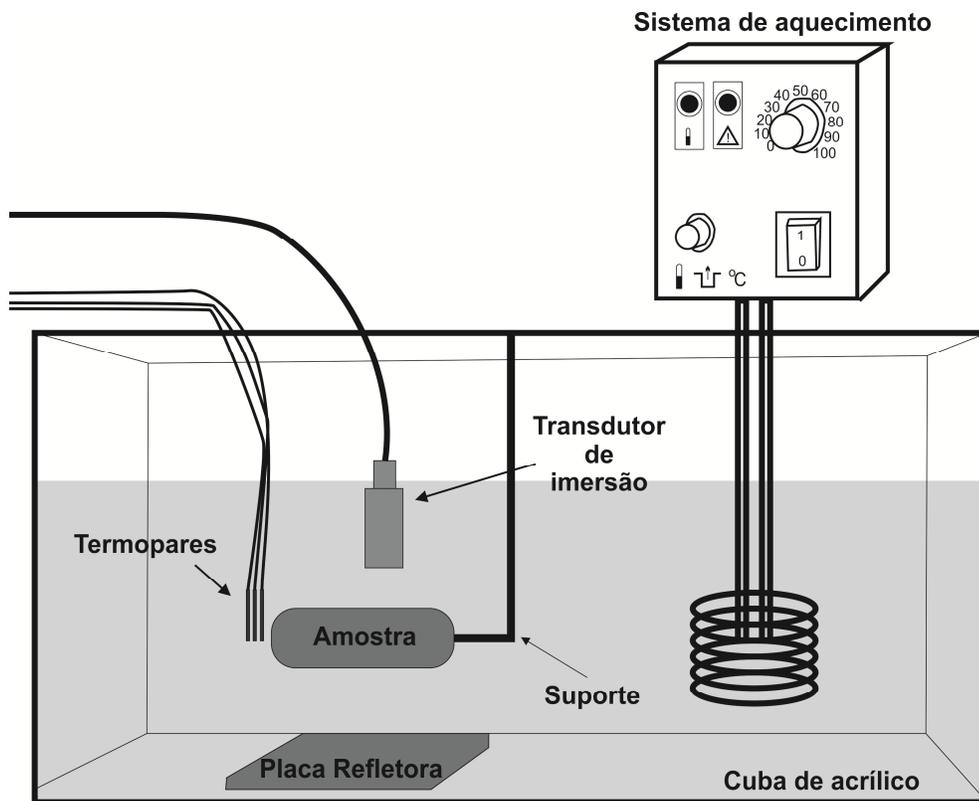
$$v = \frac{2D}{t_L} \quad (3.2)$$

em que  $D$  é a largura do meio.

### 3.2.2 *Phantom* de Gelatina e Bife Bovino

O modelo do arranjo experimental proposto para a obtenção da curva de resposta da velocidade é apresentado na Figura 3.4.

Figura 3.4\_ Modelo do arranjo experimental para caracterização do *phantom* de gelatina e o bife bovino.



Fonte: Próprio autor.

O modelo experimental para a caracterização do *phantom* de gelatina e do bife bovino foi baseado no mesmo modelo empregado para a caracterização do bloco de alumínio estrutural, com exceção do transdutor. Nesse acaso, foi usado um

transdutor ultrassônico de imersão (V110-RM, Panametrics, MA, USA, de 5,0 MHz, emissor/receptor de ondas longitudinais e diâmetro de 0,25 polegadas). Adicionalmente, foi empregado outro osciloscópio (DSO1052B, Agilent Technologies, 2 canais, Largura de banda e entrada de 50MHz, Taxa de amostragem de 1 GS/s) para ajudar na visualização de outra parte do sinal, que será especificada abaixo. Também foi usada uma placa refletora colocada no fundo da cuba de acrílico.

Inicialmente a velocidade de propagação do som na água era medição sem a amostra de *phantom* ou de bife. A velocidade de propagação do ultrassom na água foi obtida através da Equação de Marczak que relaciona a dependência da temperatura ( $T$ ) da água com a velocidade de propagação do ultrassom neste meio ( $v_0$ ), conforme a (3.3).

$$v_0 = 1,402385 \cdot 10^3 + 5,038813T - 5,799136 \cdot 10^{-2}T^2 + 3,287156 \cdot 10^{-4}T^3 - 1,398845 \cdot 10^{-6}T^4 + 2,787860 \cdot 10^{-9}T^5 \quad (3.3)$$

Marczak (1997) combinou três conjuntos de medições experimentais, Del Grosso e Mader (1972), Kroebel e Mahrt (1976) e Fujii e Masui (1993) e produziu um polinômio de quinta ordem baseado na Escala Internacional de Temperatura de 1990. Intervalo de validade: 0-95 ° C à pressão atmosférica (LABORATORY, 2000).

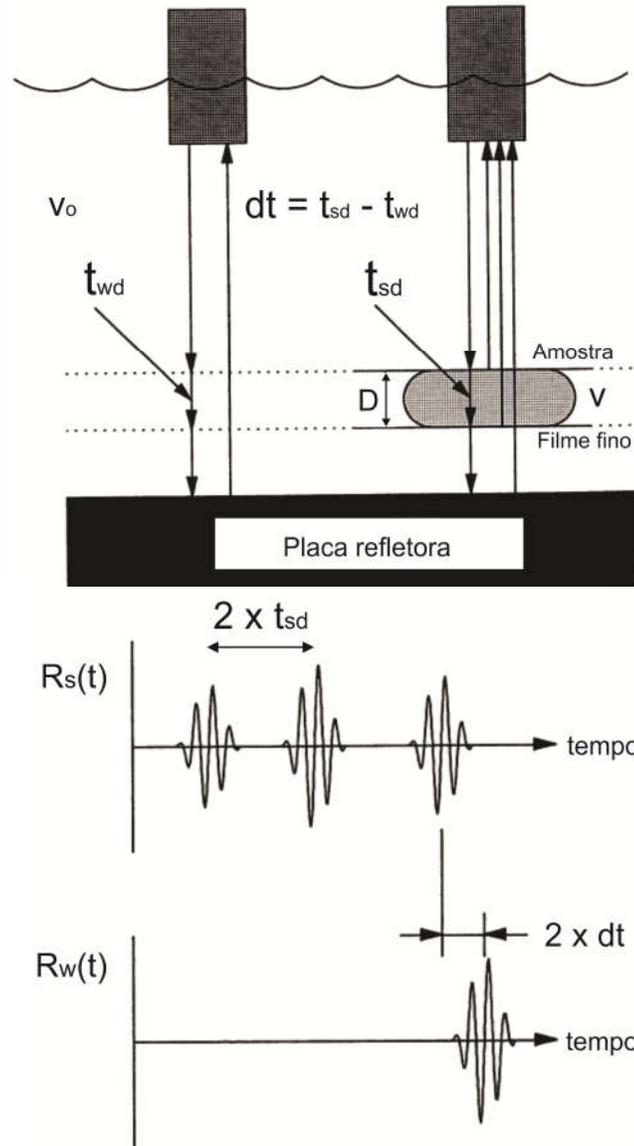
O transdutor gera um pulso ultrassônico que é transmitido na água até atingir a superfície refletora no fundo da cuba de acrílico e emiti um eco de volta ao transdutor. O sinal é amostrado pelo osciloscópio (TDS2024C), que estava operando em alta resolução, em seguida é registrado em tempo real no computador por meio de um algoritmo de processamento de sinais, usado para obtenção de  $dt$ . Com o osciloscópio DSO1052B foi possível visualizar os dois sinais ultrassônicos provindos da reflexão das duas extremidades da amostra, para a obtenção do tempo  $t_{sd}$ , este foi inserido manualmente no algoritmo.

Em seguida foi colocada a amostra entre o transdutor e a placa refletora, conforme mostra a Figura 3.4. As formas de ondas dos sinais com e sem amostra podem ser vistas na

Figura 3.5. A distância do transdutor à placa refletora foi de 10,0 cm e a distância do transdutor à amostra de 4,0 cm. A distância estimada de campo próximo para esse transdutor foi de aproximadamente 3,3 cm. Dessa forma, a

amostra ficou posicionada fora da zona de campo próximo do transdutor. As amostras foram mantidas totalmente submersas e a cada medição era esperado tempo suficiente para o sistema entrar em equilíbrio térmico.

Figura 3.5\_ Representação esquemática do sistema de caracterização de tecidos moles e as respectivas formas de ondas na presença da amostra e sem ela.



Fonte: Traduzida e adaptada de (HACHIYA; OHTSUKI; TANAKA, 1994). Em que  $R_s$  é o sinal ultrassônico com a amostra na frente da placa refletora e  $R_w$  é o sinal ultrassônico sem a amostra.

A velocidade do som no *phantom* de gelatina e no bife bovino foi obtida de forma a eliminar a imprecisão da espessura da amostra, conforme o método descrito

em (HACHIYA; OHTSUKI; TANAKA, 1994). Para isso a largura da amostra ( $D$ ), foi escrito em termos da velocidade do ultrassom na água ( $v_0$ ), do tempo de propagação do ultrassom entre a interface frontal e traseira da amostra ( $t_{sd}$ ), e da diferença temporal ( $dt$ ) entre o sinal registrado antes e depois de colocar a amostra entre o transdutor e placa refletora, conforme (3.4),

$$D = vt_{sd} = v_0 t_{wd} = v_0(t_{sd} - dt), \quad (3.4)$$

sendo  $t_{wd}$  o tempo de viagem do som ao longo da distância  $D$  sem a amostra presente.

A diferença temporal  $dt$  foi obtida pelo método de correlação cruzada dos sinais (Anexo C), antes e depois de inserir a amostra entre o transdutor e a placa refletora, conforme (3.5).

$$dt \equiv t_{sd} - t_{wd}, \quad (3.5)$$

A velocidade do ultrassom na amostra de tecido mole pode ser obtida reescrevendo a (3.6), assim

$$v = v_0(1 - dt/t_{sd}) \quad (3.6)$$

### 3.3. MÉTODO DE TERMOMETRIA POR ULTRASSOM

#### 3.3.1 Método das diferenças finitas

Muitos problemas físicos podem ser formulados por meio de equações diferenciais em que aparecem funções de mais de uma variável, chamadas equações diferenciais parciais (EDPs) (BUTKOV, 1968). As EDPs são muito importantes nas ciências e nas engenharias, pois são aplicadas na solução de problemas como a propagação de uma onda em corda, na difusão de certas substâncias através de um meio contínuo, como na difusão de fumaça pelo ar, difusão de nêutrons em um reator nuclear, ou a difusão de um produto químico em um solvente. De forma geral as EDPs podem ser escritas na forma

$$G(x, t) = A \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + B \frac{\partial^2 T}{\partial x \partial t} + C \frac{\partial^2 T}{\partial t^2} + D \frac{\partial T}{\partial x} + E \frac{\partial T}{\partial t} + FT \quad (3.7)$$

em que A, B, C, D, E, F e G são funções de x e t. Quando A, B, C, D, E, F e G são constantes. Tem-se uma EDP de segunda ordem de coeficientes constantes (MELO, 2011).

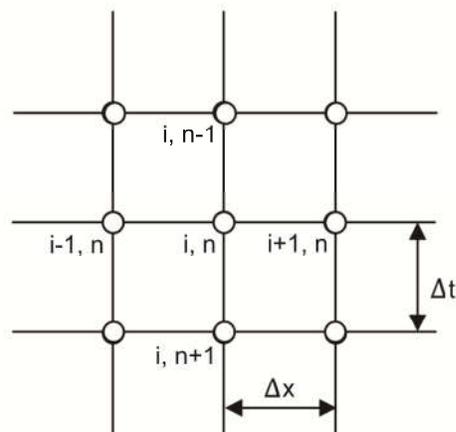
Através dos valores dos coeficientes dos termos de segunda ordem, A, B e C, as EDPs lineares de segunda ordem com coeficientes constantes podem ser classificadas da seguinte forma de acordo com a sua análise teórica, na descrição dos métodos numéricos e nas suas aplicações:

- a) São hiperbólicas se  $B^2 - AC > 0$ ;
- b) São parabólicas se  $B^2 - AC = 0$ ; e
- c) São elípticas se  $B^2 - AC < 0$ .

O Método das Diferenças Finitas (MDF) ou Método FTCS (*Forward Time Central Space*) (SCHERER, 2005) é um método numérico de cálculo de problemas de valor de fronteira bastante popular por causa da sua simplicidade e facilidade de implementação computacional. Uma das etapas para solução das EDPs através de um método numérico é discretizar a região onde se procura a solução.

Para a discretização define-se uma malha, que é um conjunto finito de pontos pertencentes ao domínio chamados nós da malha, conforme Figura 3.6, que representa uma malha cartesiana ortogonal em que qualquer ponto  $(x_i, t_n)$  fica representado na malha por  $(i, n)$  e os vizinhos a esse ponto vem representados por  $(x_{i\pm 1}, t_{n\pm 1})$  (MELO, 2011).

Figura 3.6\_ Malha computacional.



Fonte: Adaptado de (MELO, 2011).

O MDF baseia-se na aproximação das derivadas de primeira e de segunda ordem da função  $T(x,t)$  :

Diferença finita centrada da derivada 1ª ordem da função  $T(x,t)$ :

$$\frac{\partial T}{\partial x} \approx \frac{T(x_{i+1}, t_n) - T(x_{i-1}, t_n)}{x_{i+1} - x_{i-1}} = \frac{T_{i+1}^n - T_{i-1}^n}{2\Delta x} \quad (3.8)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} \approx \frac{T(x_i, t_{n+1}) - T(x_i, t_{n-1})}{t_{i+1} - t_{i-1}} = \frac{T_i^{n+1} - T_i^{n-1}}{2\Delta t} \quad (3.9)$$

Ou na forma de diferença progressiva da derivada de 1ª ordem da função  $T(x,t)$ :

$$\frac{\partial T}{\partial x} \approx = \frac{T_i^n - T_{i-1}^n}{x_{i+1} - x_i} = \frac{T_{i+1}^n - T_i^n}{\Delta x} \quad (3.10)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} \approx = \frac{T_i^n - T_i^{n-1}}{t_{i+1} - t_i} = \frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\Delta t} \quad (3.11)$$

Diferença finita da derivada de 2ª ordem da função  $T(x,t)$ :

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \approx \frac{T(x_{i-1}, t_n) - 2T(x_i, t_n) + T(x_{i+1}, t_n)}{(x_{i+1} - x_{i-1})^2} = \frac{T_{i-1}^n - 2T_i^n + T_{i+1}^n}{\Delta x^2} \quad (3.12)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial t^2} \approx \frac{T(x_i, t_{n-1}) - 2T(x_i, t_n) + T(x_i, t_{n+1})}{(t_{i+1} - t_{i-1})^2} = \frac{T_i^{n-1} - 2T_i^n + T_i^{n+1}}{\Delta t^2} \quad (3.13)$$

### 3.3.2 Modelo de condutividade térmica

A equação de condução de calor ou de difusão de calor é uma equação diferencial parcial parabólica de segunda ordem.

A condução de calor só pode ocorrer através de um meio material, sem que haja movimento do próprio meio, ocorre tanto em fluidos quanto em sólidos, sob efeito de diferenças de temperatura. Para investigar a distribuição de temperatura nas amostras, considerou-se o problema de condução de calor unidimensional com

difusividade térmica constante. Além disso, assumiu-se que não há qualquer fonte de calor no meio. Dessa forma, a equação de condução de calor é dada por

$$\frac{\partial T(x, t)}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T(x, t)}{\partial x^2} \quad (3.14)$$

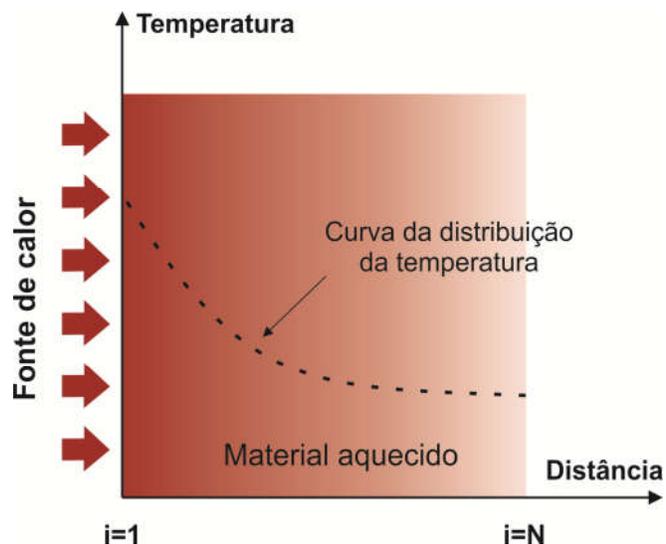
em que  $T$  é a temperatura,  $x$  a posição,  $t$  o tempo e  $\alpha$  é o coeficiente de difusividade térmica.

A distribuição de temperatura pode ser estimada através da resolução de (3.14) por meio de condições de contorno bem definidas. No entanto, em processos de aquecimento reais a condição de contorno nem sempre é mantida estável. Normalmente, tal condição de contorno não é simples de ser prevista e até mesmo de ser medição. Portanto, determinar a distribuição de temperatura a partir de (3.14) torna-se uma tarefa difícil. Dessa forma, uma das duas condições de contorno é obtida a partir do tempo de trânsito da onda ultrassônica. Enquanto a outra é dada por um termopar posicionado opostamente a superfície aquecida.

### 3.4.1 Modelagem do sistema

O MDF foi utilizado para analisar a condução de calor em um material de comprimento  $L$ . A Figura 3.7 esquematiza o material com apenas um lado aquecido, sendo a distribuição de temperatura unidimensional.

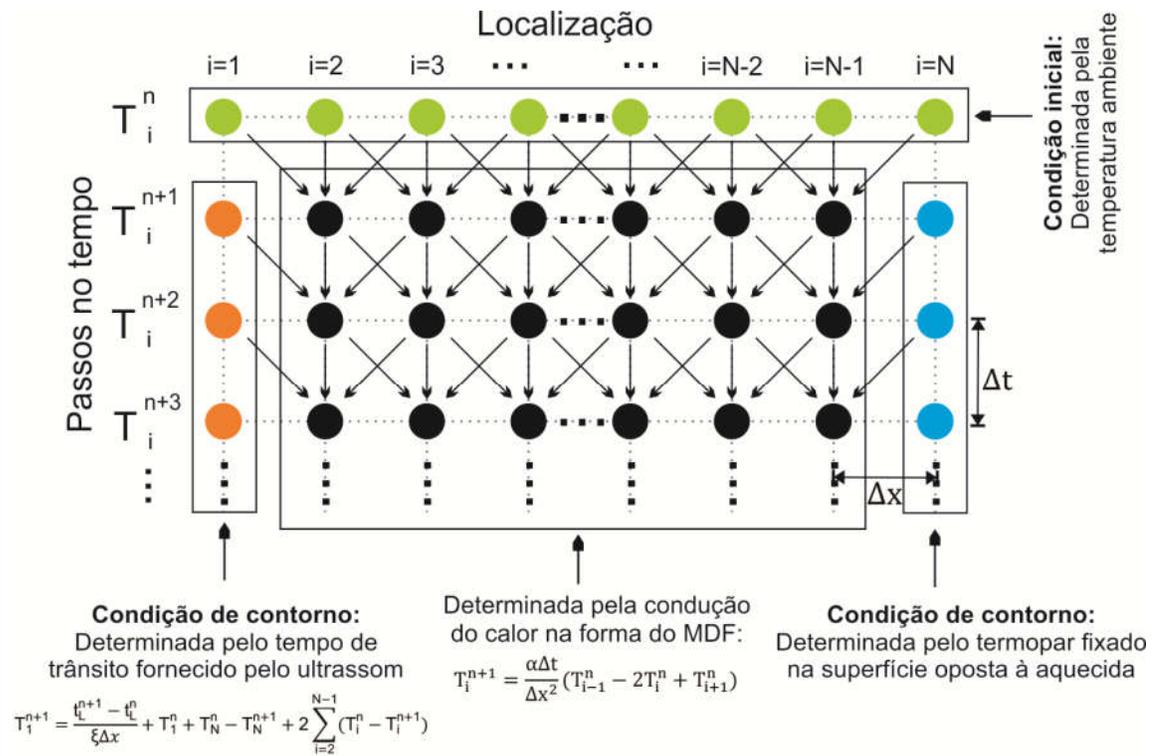
Figura 3.7\_ Modelo de análise utilizado para estimar a distribuição de temperatura no bloco de alumínio.



Fonte: Adaptada de (IHARA *et al.*, 2013).

A Figura 3.8 ilustra a esquematização do MDF unidimensional por meio do escalonamento de grade usado para determinação da temperatura do material. Em que  $i$  e  $n$  são índices correspondentes às coordenadas espaciais e temporais, respectivamente.  $N$  o número total de pontos espaciais da rede.  $T_i^n$  a temperatura de cada ponto  $i$  na rede no instante  $n$ .  $\Delta t$  o intervalo de tempo,  $\Delta x$  intervalo espacial na rede. O índice  $i = 1$  aplica-se a superfície aquecida e  $i = N$  a superfície oposta à superfície aquecida.

Figura 3.8\_ Modelo de esquemático de grades escalonadas para o método de diferenças finitas.



Fonte: Próprio autor.

O MDF consiste em definir a derivada em  $t$  na forma não simetrizada (*forward*) e as derivadas em  $x$  na forma simetrizada. Aplicando a equações de diferenças finitas de (3.11) e (3.12) em (3.14), tem-se

$$\frac{T_{i-1}^n - 2T_i^n + T_{i+1}^n}{\Delta x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\Delta t} \quad (3.15)$$

os índice  $i$  na variável  $T$  se referem à coordenada  $x_i$ , enquanto que os expoentes  $n$  se referem à variável temporal  $t^n$ . Resolvendo (3.15) em termos de  $T_i^{n+1}$  obtêm-se a equação de condutividade térmica

$$T_i^{n+1} = T_i^n + r(T_{i+1}^n + T_{i-1}^n - 2T_i^n) \quad (i = 2, \dots, N - 1) \quad (3.16)$$

$$r = \frac{\alpha \Delta t}{\Delta x^2} \quad (3.17)$$

em que o coeficiente  $r$  é o fator de convergência da equação (3.16). A condição de estabilidade numérica, ou, critério de estabilidade de Von Neumann é atendido para  $r \leq 1/2$ , ou seja,  $\alpha \Delta t / \Delta x^2 \leq 1/2$ . Este procedimento funciona bem se  $r \leq 1/2$ , mas se  $r \geq 1/2$  o resultado que se obtém é uma sequência cada vez maior de flutuações, divergente da solução correta de (3.14).

A resolução numérica de (3.16) determina-se o valor futuro  $T_i^{n+1}$  a partir dos valores conhecidos no tempo  $t^n$ . Desta forma, a solução de EDPs parabólicas requer o conhecimento não somente das condições de contorno em  $x$ , mas também dos valores iniciais em  $t = t_0$ .

No intervalo de tempo  $n=1$ , considera-se que apenas uma das faces do material está a uma dada temperatura  $T^1$ . A temperatura estimada dentro do material nos passos seguinte  $n+1$  se dá em intervalos de tempo muito curtos, da ordem poucos segundos.

### 3.4.2 Condições de contorno

A forma de se resolver a (3.16) é por recorrência, a condição inicial é dada por  $T_i^1$  para todo  $i$ , primeiro calcula-se  $T_i^{n+1}$ , para  $i = 2, \dots, N-1$ , e assim sucessivamente. As condições de contorno são dadas pelos valores de  $T_N^n$  (termopar) nos extremos do intervalo e pelo tempo de trânsito da onda ultrassônica no material amostrado. A temperatura  $T_1^{n+1}$  (zona aquecida) é desconhecida, a menos que sejam dadas as condições de contorno do problema.

Uma solução possível é estimar a temperatura  $T_1^{n+1}$  empregando o método de termometria por ultrassom de pulso/eco (TUS). Dessa forma, é possível acoplar o tempo de trânsito através do material ao cálculo das diferenças finitas. Escrevendo o tempo de trânsito, descrito pela (3.1), na forma numérica por meio da regra do trapézio obtém-se:

$$t_L = \Delta x \left( \frac{1}{v_1} + \frac{1}{v_N} \right) + 2\Delta x \sum_{i=2}^{N-1} \frac{1}{v_i} \quad (3.18)$$

Se a dependência da velocidade do ultrassom no meio for linear com a temperatura, na forma  $v(T) = aT + b$  [m/s], como é mostrado na Seção 4, para os materiais aqui trabalhados. Fazendo-se as devidas correções nos valores e nas unidades das constantes  $a$  e  $b$ , têm-se:

$$\frac{1}{v(T)} = \xi T + \beta \quad [\text{s/m}], \quad (3.19)$$

em que  $\xi$  e  $\beta$  são constantes obtidas experimentalmente, cujas unidades correspondentes são dadas em  $\text{s/m}^\circ\text{C}$  e  $\text{s/m}$ , respectivamente. Das (3.18) e (3.19), a temperatura da superfície aquecida, no intervalo de tempo  $n+1$ ,  $T_1^{n+1}$ , obtêm-se

$$T_1^{n+1} = \frac{t_L^{n+1} - t_L^n}{\xi \Delta x} + T_1^n + T_N^n - T_N^{n+1} + 2 \sum_{i=2}^{N-1} (T_i^n - T_i^{n+1}), \quad (3.20)$$

em que  $t_L^n$  e  $t_L^{n+1}$  são os tempos de trânsito médios nos passos temporais  $n$  e  $n+1$ , respectivamente, conforme desenvolvido no (Apêndice A). Se a velocidade não for linear com a temperatura, (3.7) deve ser reescrita de outra forma.

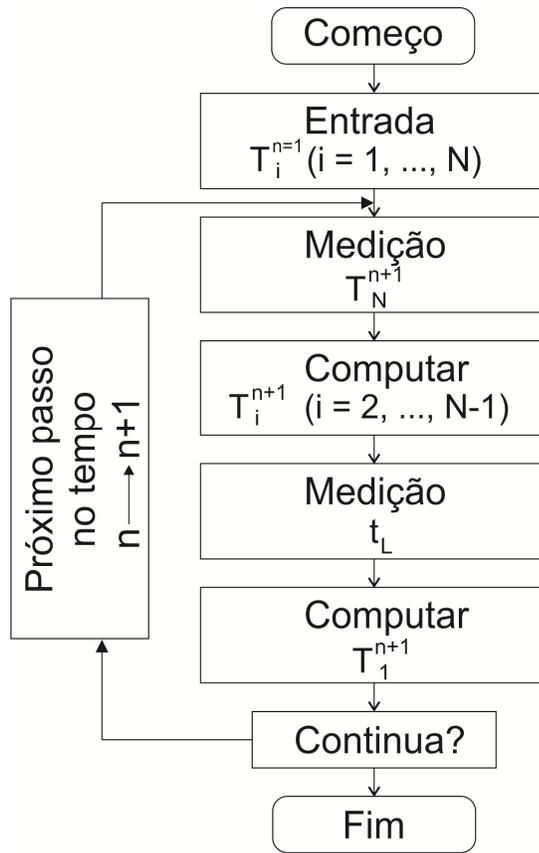
Para o estudo da termometria por ultrassom (TUS) o sinal ultrassônico foi tratado de modo a detectar o pico do primeiro eco e captar a diferença entre os deslocamentos deste pico durante o regime de aquecimento por meio de passos consecutivos no algoritmo. A medição do atraso temporal foi realizada em tempo real através de um programa computacional implementado pela autora, que se comunica diretamente com o osciloscópio.

Assim, conhecendo-se os tempos de trânsito da onda foi possível determinar a temperatura da face aquecida no intervalo de tempo  $n+1$ , em que  $T_1^{n+1}$  foi estimado a partir da (3.20), quando os tempos de trânsito  $t^n$  e  $t^{n+1}$  são obtidos. Uma vez que as temperaturas de todos os pontos da rede no passo de tempo  $n+1$ ,  $T_1^{n+1}, \dots, T_N^{n+1}$ , são determinados, pode-se avaliar a distribuição de temperatura no próximo passo de tempo  $n+2$ .

### 3.4.3 Fluxograma da análise inversa

A Figura 3.9 ilustra o fluxograma da análise inversa para determinar a distribuição da temperatura.

Figura 3.9\_ Fluxograma da análise inversa para determinar a distribuição da temperatura.



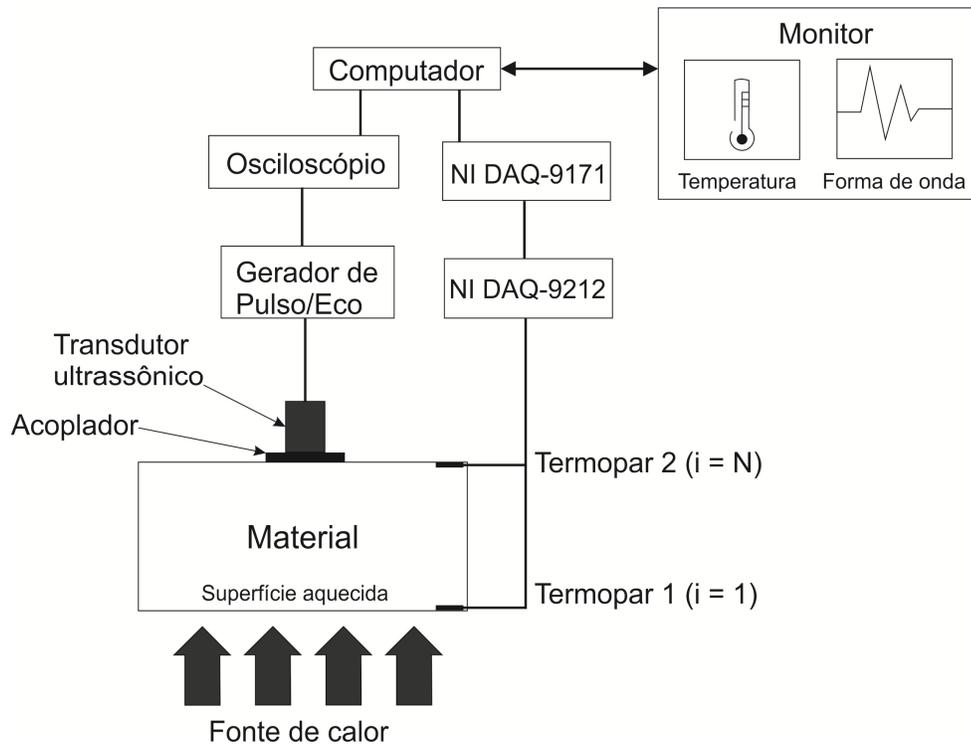
Fonte: Próprio autor.

Inicialmente o algoritmo do programa realizava a leitura da temperatura inicial do material, via termopar,  $T_i^1$ , em busca da condição inicial. Para a resolução do MDF proposto, a cada passo temporal foi necessário entrar com a primeira condição de contorno do problema,  $T_N^{n+1}$ , assim foi possível calcular o termos  $T_i^{n+1}$  ( $i = 2, \dots, N-1$ ). Em seguida, a segunda condição de contorno foi processada por meio do tempo de eco do sinal ultrassônico, adquirido pelo osciloscópio, e então computado conforme a (3.20). Assim, ao executar o número de passos temporais inicialmente ordenados, o programa finaliza a última aquisição de dados. Na sequência, interrompe o processo de estimativa das temperaturas do meio. Por fim, o computador armazenava os dados processados.

### 3.4.4 Arranjo experimental

O arranjo experimental proposto para esse método foi esquematizado conforme o diagrama de blocos da Figura 3.10.

Figura 3.10\_ Diagrama esquemático da montagem experimental utilizada.



Fonte: Próprio autor.

Esse arranjo foi composto por um transdutor ultrassônico de contato (V110-RM, Panametrics, MA, USA) de 5,0 MHz, emissor de ondas longitudinais e diâmetro de 12,7 mm. O transdutor foi acoplado a superfície do material amostrado, mediante gel acoplador a base de água (Biogel, Biomed, SP, Brasil). O transdutor foi conectado ao gerador/receptor de pulsos ultrassônicos e os sinais provenientes desse instrumento foram visualizados e adquiridos pelo osciloscópio.

Medições foram realizadas durante o regime de aquecimento do material com o osciloscópio na base de tempo de 5 ns. O processamento do sinal ultrassônico foi realizado empregando uma rotina desenvolvida em ambiente que tinha a finalidade de comunicar com o osciloscópio e em seguida processar os sinais. Durante todo o processo de medição os dados adquiridos puderam ser visualizados em tempo real

para análise. Para minimizar flutuações e ruídos foram realizadas 128 medições do sinal ultrassônico. A partir da obtenção do valor médio foi possível minimizar a imprecisão nas medições do tempo de trânsito.

#### **3.4.5 Validação do método de termometria por ultrassom**

Os termopares foram escolhidos como meio para a validação do método de TUS devido ao seu baixo custo e precisão (LEWIS; STARUCH; CHOPRA, 2015), (DEL ROSAL *et al.*, 2016).

Um sistema de medição de temperatura por termopares (National Instruments, TX, EUA) (TTP) foi utilizado para verificar e validar a distribuição de temperatura obtida pelo método de termometria por ultrassom. Esse sistema de medição é composto por dois termopares (MTK-01, Minipa, SP, Brasil), tipo K, faixa de medição de -40 a 204 °C, precisão de  $\pm 2,2^{\circ}\text{C}$ , os quais foram acoplados às superfícies do material. Os termopares foram previamente calibrados de fábrica e subsequentemente aferidos empregando banho termostático (Banho termostático em aço inoxidável (ECO E S/G, Lauda-Brinkmann, Lauda, Königshofen, Alemanha), precisão de  $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ . Deste processo observou-se que as diferenças de temperatura do banho termostático com o sistema de termopares foram em média de  $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ .

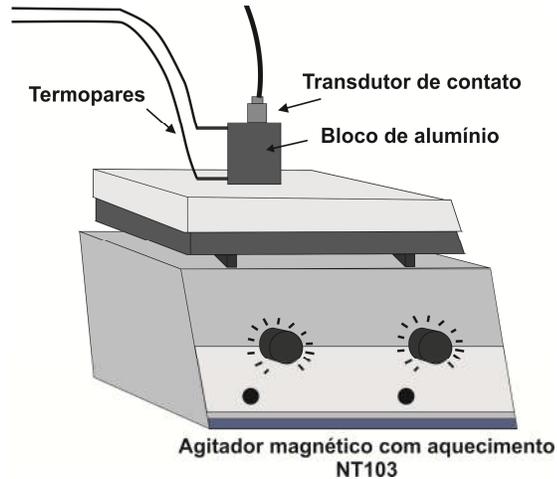
Os termopares foram interligados ao módulo de condicionamento de sinais (NI DAQ-9212) integrado ao módulo de comunicação (NI DAQ-9171), estando este conectado a um computador via cabo USB. O sistema de medição por termopares encontra-se ilustrado na forma de digrama de blocos na Figura 3.10. Em que, o “Termopar 1” foi fixado na extremidade da superfície aquecida, enquanto o “Termopar 2” foi posicionado na superfície oposta. Este último forneceu uma das condições de contorno do estudo.

#### **3.4.6 Sistema de aquecimento**

Inicialmente é proposto um método de aquecimento em que o alumínio teve uma de suas faces aquecida diretamente por meio de uma pirocerâmica emissora de raios infravermelhos de 500 W, por um agitador magnético com aquecimento (NT 103, Novatecnica, SP, Brasil). Opostamente à face aquecida foi posicionado o

transdutor de ultrassom Figura 3.11. As demais faces foram envoltas com isopor para prevenir transferência de calor para o meio.

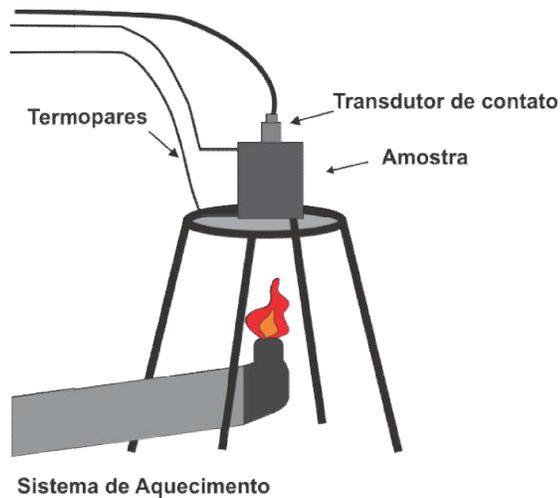
Figura 3.11\_ Modelo experimental para aquecimento do alumínio.



Fonte: Próprio autor.

Um segundo modelo de aquecimento é proposto com uma fonte de calor constante, por meio do uso de um maçarico, conforme ilustra o modelo apresentado na Figura 3.12, este modelo foi utilizado tanto para o aquecimento e resfriamento do alumínio.

Figura 3.12\_ Modelo experimental para aquecimento e resfriamento do alumínio



Fonte: Próprio autor.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

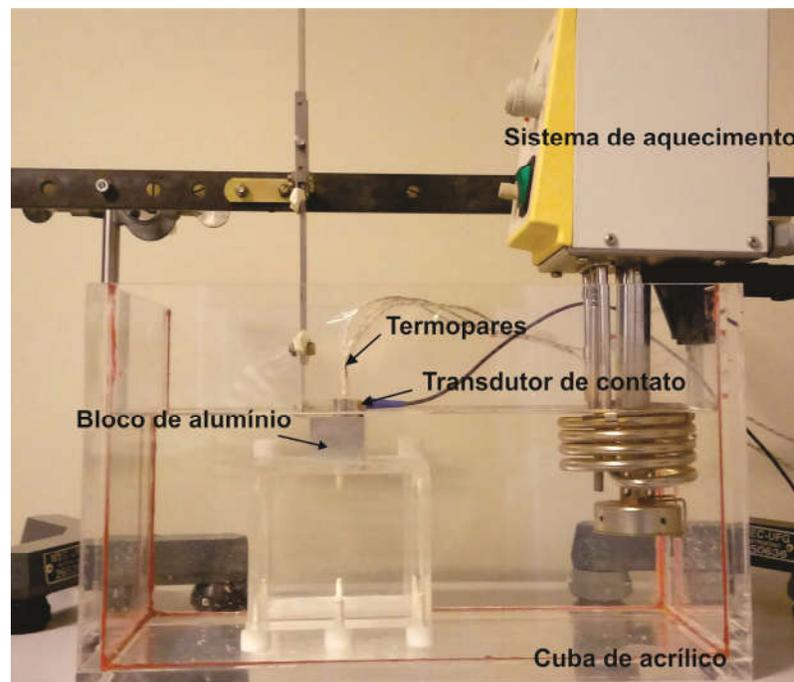
### 4.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

A caracterização dos materiais proveniente das respostas da velocidade em função da temperatura é de grande importância, pois é necessária para o procedimento analítico do modelo adotado seguir o pressuposto de linearidade entre a velocidade de propagação do ultrassom no meio e a temperatura, para que a temperatura na superfície aquecida obedeça a (3.7). Conhecendo-se a curva de calibração do sistema de medição pode-se determinar o valor da constante experimental  $\xi$ , característica de cada material.

#### 4.1.1 Caracterização do alumínio

O arranjo experimental para a caracterização do alumínio é mostrado na Figura 4.1.

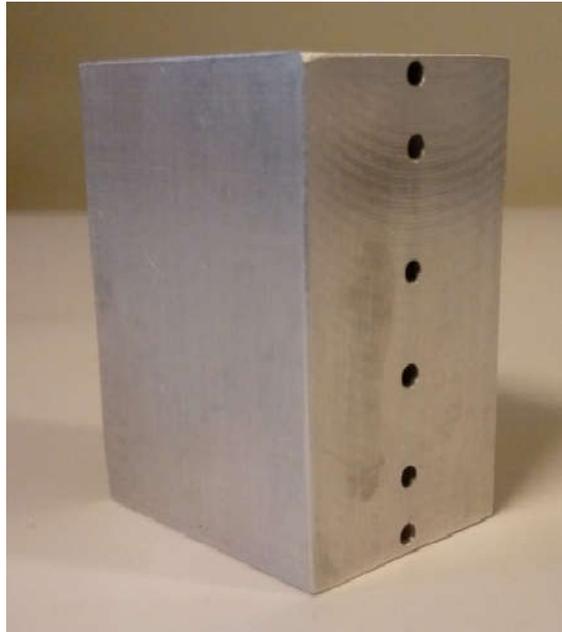
Figura 4.1\_ Arranjo experimental para caracterização do alumínio.



Fonte: Próprio autor.

O bloco de alumínio usado para a caracterização e para as medidas da TUS é ilustrado pela foto da Figura 4.2.

Figura 4.2\_ Bloco de alumínio utilizado nesta pesquisa.



Fonte: Próprio autor.

Nos ensaios empregando o bloco de alumínio, os parâmetros ajustados no gerador ultrassônico encontram-se representados na Tabela 4.1

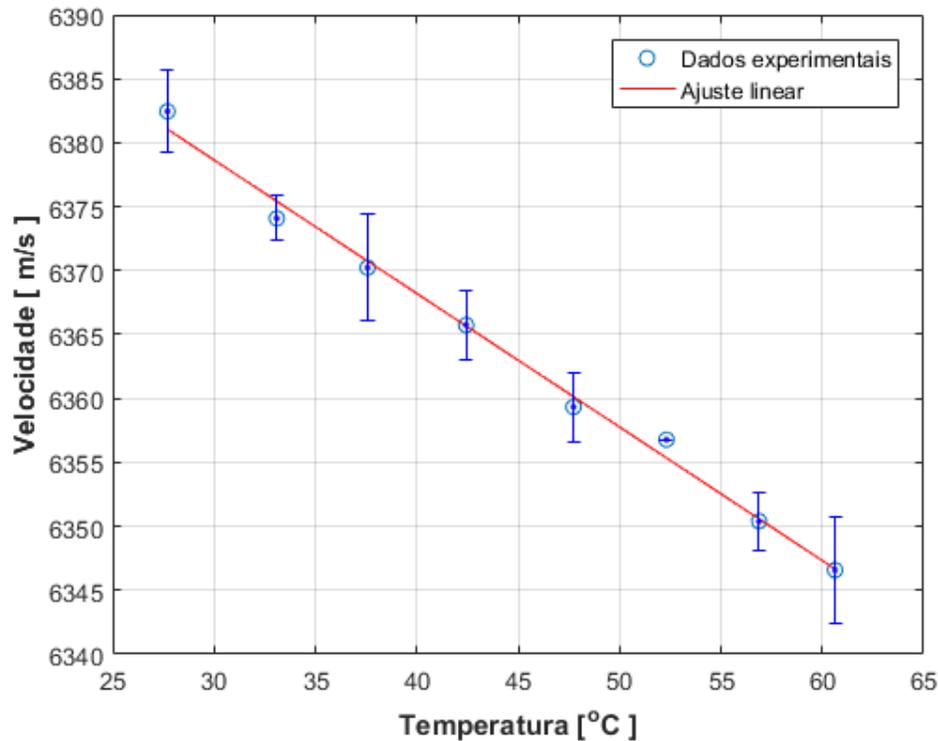
Tabela 4.1\_ Parâmetros ajustados no gerador de pulsos ultrassônicos.

PRF (Hz)	Amortecimento ( $\Omega$ )	Amplitude de energia do pulso ( $\mu$ joules)	Ganho (dB)	HPF (MHz)	LPF (MHz)
1K	50	52	38	1	10

Fonte: Próprio autor

A Figura 4.3 apresenta os dados da velocidade em função da temperatura, obtidos por meio de um ajuste linear. Do ajuste linear pode-se verificar que a velocidade do som no alumínio descreveu um comportamento perfeitamente linear, como também apresentado em (FUJII; KAWASHIMA, 1995). Por meio de uma regressão linear obteve-se a constante de determinação ( $R^2 = 0.9968$ ). Esse valor numérico representa uma excelente correlação entre os dados experimentais e o ajuste linear.

Figura 4.3\_ Curva de calibração do alumínio.



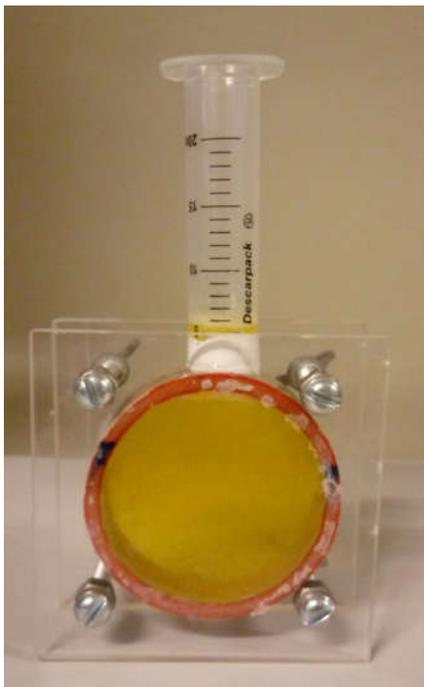
Fonte: Próprio autor.

A equação obtida com o ajuste linear, representado da reta da na Figura 4.3, é dada por  $v(T) = -1,04T + 6410,00$  (m/s). O valor de  $\xi$  foi de  $2,655 [10^{-10} \text{ (s/(cm}^\circ\text{C))}]$ . No entanto, sabe-se que a dependência da difusividade térmica não é um fator crucial que afeta a precisão da estimativa da temperatura (KOSUGI; IHARA; MATSUYA, 2012b).

#### 4.1.2 Caracterização do *phantom* de gelatina

O *phantom* de gelatina foi feito utilizando-se de 150 ml de água, 15 g de gelatina e 4,5 ml de formaldeído, este utilizado para permitir que a gelatina suporte altas temperaturas sem modificar seu estado físico. Uma solução homogênea de gelatina foi obtida misturando-se a água à temperatura de 50°C com a gelatina, após a mistura homogenia atingir uma temperatura de 40°C foi adicionado o formaldeído. Então, esse material foi introduzido em porta amostra cilíndrico de PVC de 7,5 cm de diâmetro e 2,5 cm de largura, conforme Figura 4.4, e deixado em uma geladeira (CRB36AB, Consul, SP, Brasil) por 24 horas.

Figura 4.4\_ *Phantom* de gelatina utilizado este estudo.



Fonte: Próprio autor.

O bife bovino fresco, obtido de um frigorífico local, foi cortado na altura do recipiente e envolto com uma fina camada de gelatina. Esse material foi mesmo utilizado na preparação do *phantom* e serviu para que o bife não entrasse em contato direto com a água e não modificasse sua estrutura física. Na Figura 4.5 é ilustrado o porta amostra contendo a porção de bife bovino no seu interior.

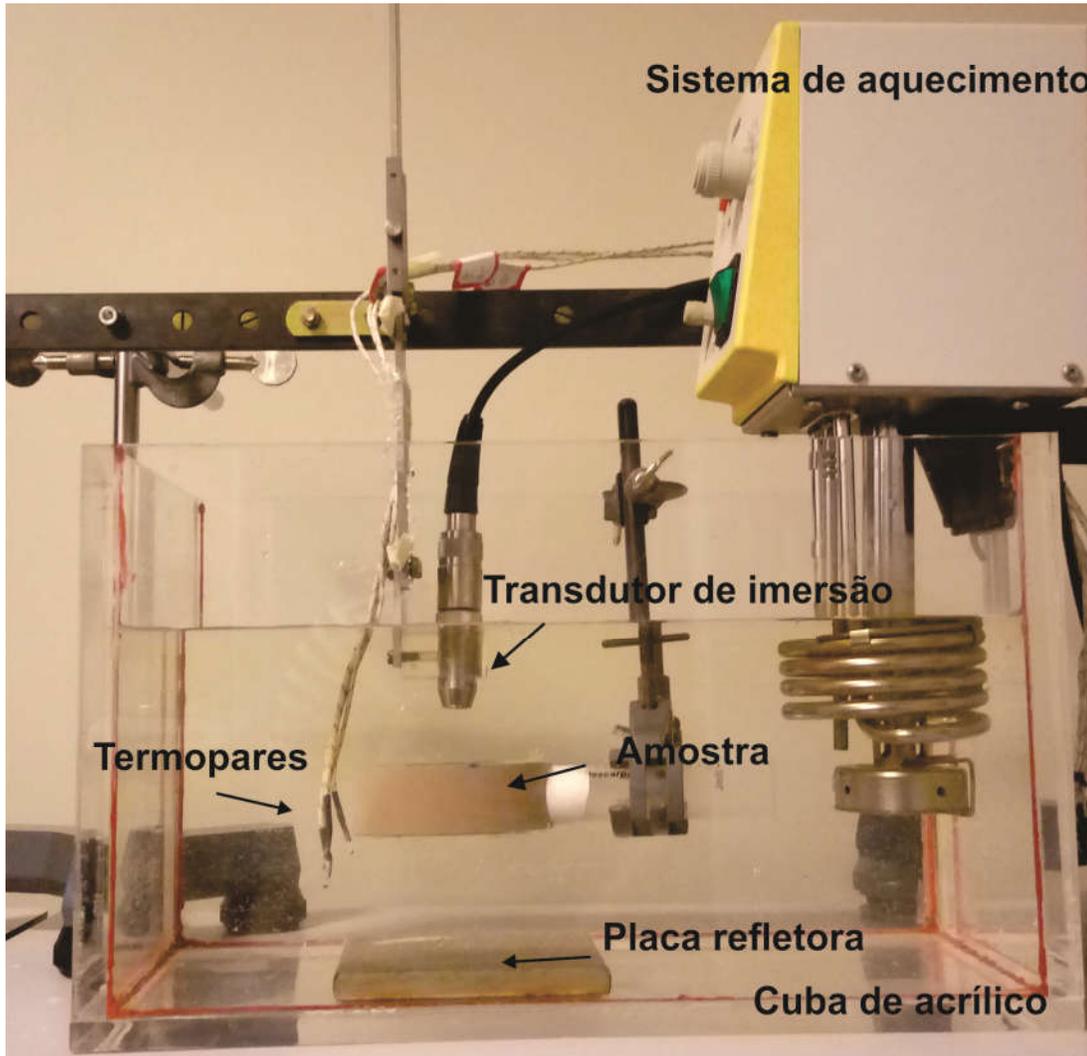
Figura 4.5\_ Amostra de bife bovino utilizada neste estudo.



Fonte: Próprio autor.

O arranjo experimental proposto para a obtenção da curva de resposta da velocidade é apresentado na Figura 4.6.

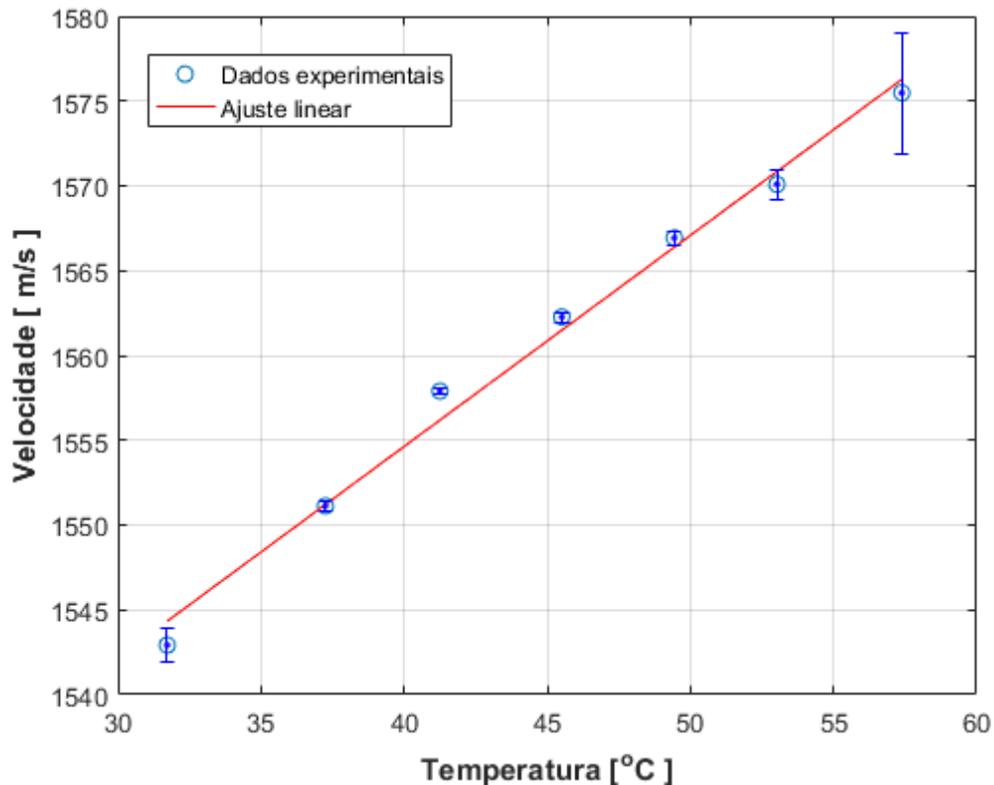
Figura 4.6\_ Arranjo experimental para caracterização do *phantom* de gelatina e o bife bovino.



Fonte: Próprio autor.

A Figura 4.7 apresenta o ajuste linear da velocidade em função da temperatura no *phantom* de gelatina. Foram realizadas cinco medições para cada temperatura. Em seguida calculou-se o valor médio da medição e seu respectivo desvio padrão foi ilustrado na forma de barra de erros.

Figura 4.7\_ Curva de calibração do *phantom* de gelatina.



Fonte: Próprio autor.

Por meio do ajuste linear, verificou-se que os dados referentes à velocidade do som na gelatina mostraram-se uma forte tendência de linearidade para a faixa de temperatura estudada. A equação da reta ajustada obtida foi  $v(T) = 1,24T + 1505,00$  (m/s), sendo  $R^2$  igual a 0,9954, através do ajuste linear  $\xi$  foi de  $-5,165 \times 10^{-9}$  (s/(cm °C)). Um comportamento crescente na curva da velocidade *versus* temperatura em *phantom* de gelatina foi apresentado em (PARKER; POVEY, 2012).

As velocidades do som na água estimadas nos ensaios empregando gelatina para cada temperatura foi obtida por meio da (3.3), e encontram-se apresentadas na Tabela 4.2. O valor da velocidade do som para cada uma das temperaturas condiz com os dados apresentados na literatura (Anexo D) (DEL GROSSO; MADER, 1972).

Tabela 4.2\_ Velocidade do som na água para em diferentes temperaturas

Temperatura (°C)	Velocidade do som na água (m/s)
31,73	1513,05
37,25	1524,11
41,25	1530,92
45,51	1537,12
49,44	1541,94
53,02	1545,63
57,38	1549,25

Fonte: Próprio autor

Os parâmetros ajustados no gerador de pulsos ultrassônicos encontram-se descritos na Tabela 4.3.

Tabela 4.3\_ Parâmetros ajustados no gerador de pulsos ultrassônicos.

PRF (Hz)	Amortecimento ( $\Omega$ )	Amplitude de energia do pulso ( $\mu$ joules)	Ganho (dB)	HPF (MHz)	LPF (MHz)
1K	50	52	3	1	10

Fonte: Próprio autor.

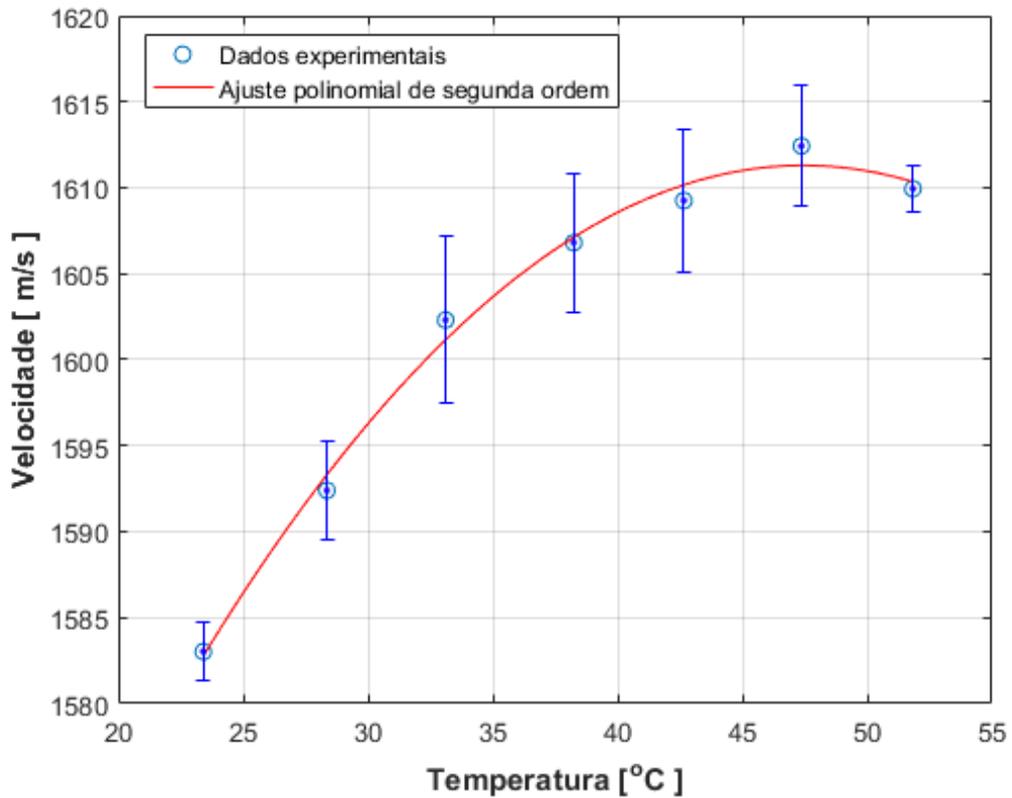
#### 4.1.3 Caracterização do bife bovino

Os ensaios referentes à medição da velocidade do som no bife foram realizados na forma de cinco medições para cada temperatura. Na sequência, foram computadas a média e a incerteza experimental das velocidades. Durante o processo de aquecimento, observou-se uma mudança na coloração do bife, a qual foi interpretada como sendo o fenômeno de cozimento da carne. A partir da temperatura de 38°C, notou-se alteração na estrutura física não sendo possível a obtenção de um perfil linear para todas as temperaturas estudadas.

O comportamento dos dados forma investigados por meio de um ajuste polinomial de segunda ordem, para a faixa de temperatura de 23°C até 52°C e encontra-se ilustrado na Figura 4.8. Um mesmo comportamento na curva da velocidade *versus* temperatura em tecidos *ex vivo* foi apresentado em (TECHAVIPOO *et al.*, 2002). A constante de determinação encontrada foi 0,9934 para essa curva. No entanto, as incertezas nas medições foram significativas para

essa faixa de temperatura. Verificando assim que o processo de cozimento altera expressivamente as propriedades elásticas do tecido, deixando-o mais rígido. A equação que melhor ajustou os dados experimentais foi a parabólica na forma:  $v(T) = -0,06T^2 + 4,68T + 1500,00$  (m/s).

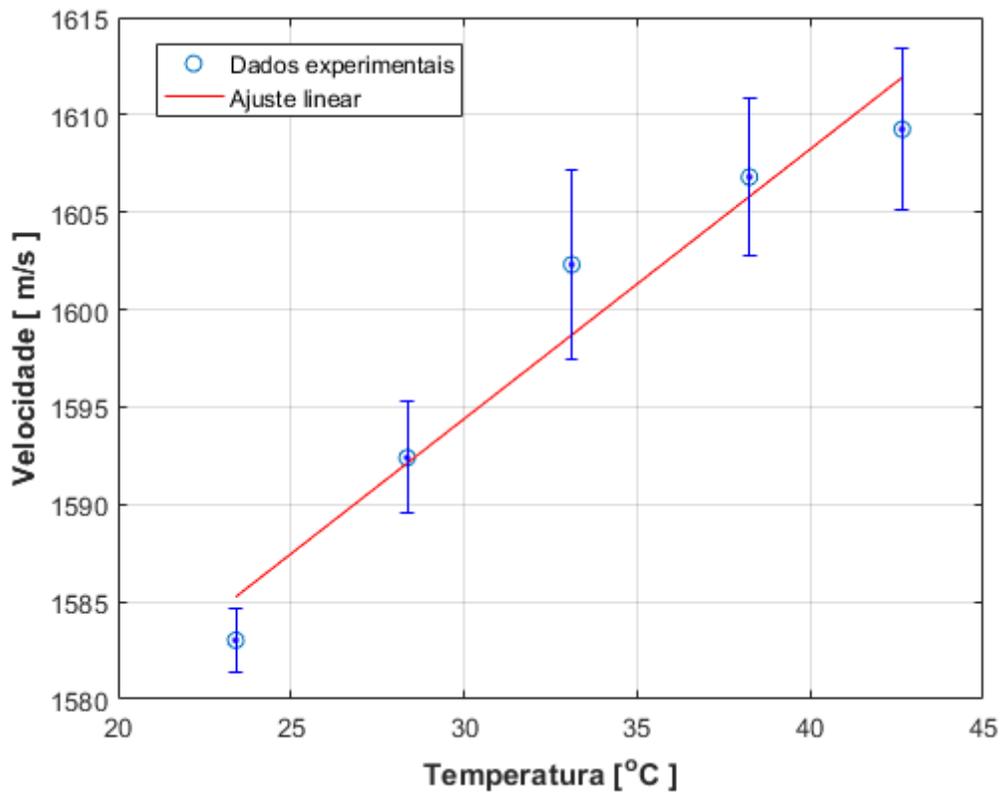
Figura 4.8\_ Avaliação da resposta da velocidade do som no bife bovino em função da temperatura.



Fonte: Próprio autor.

Buscando o intervalo de temperatura onde a resposta se aproximava mais do modelo linear foi aplicado um ajuste linear para os dados brutos no intervalo de 23°C até 38°C, o qual encontra-se ilustrado na Figura 4.9. De onde se obteve a constante de determinação de 0,9721. A equação da reta obtida por meio do ajuste linear foi  $v(T) = 1,38T + 1553,00$  (m/s) e a constante  $\xi$  obtida foi  $-7,2195 \times 10^{-9}$  (s/(cm °C)).

Figura 4.9\_ Curva de calibração do bife bovino.



Fonte: Próprio autor.

A velocidade do som na água obtida para a caracterização do bife bovino está apresentada na Tabela 4.4, de acordo com dos dados apresentados em literatura e conforme do Del Grosso (DEL GROSSO; MADER, 1972).

Tabela 4.4\_ Velocidade do som na água para a caracterização do bife bovino.

Temperatura (°C)	Velocidade do som na água (m/s)
23,40	1492,36
28,36	1505,28
33,11	1516,01
38,24	1525,89
42,66	1533,08
47,36	1539,50
51,83	1544,48

Fonte: Próprio autor.

Os dados de ajuste do gerador ultrassônico para a caracterização da porção de bife foi apresentado na Tabela 4.5.

Tabela 4.5\_ Ajuste do gerador ultrassônico para a caracterização do bife bovino.

PRF (Hz)	Amortecimento ( $\Omega$ )	Amplitude de energia do pulso ( $\mu$ joules)	Ganho (dB)	HPF (MHz)	LPF (MHz)
200	50	52	59	1	10

Fonte: Próprio autor.

## 4.2. TERMOMETRIA POR ULTRASSOM

Neste estudo, um dos principais resultados alcançados foi o desenvolvimento do algoritmo responsável em realizar a comunicação e a coleta de dados em tempo real. No desenvolvimento da metodologia foi empregado um osciloscópio convencional, ajustado para trabalhar como sistema de aquisição de dados. Esse instrumento foi capaz de capturar sinais, provenientes do sistema de ultrassom pulso/eco, com alta resolução temporal. Além dessa metodologia foi incrementada uma rotina dedicada para processar os dados obtidos via sistema de TTP. A precisão da medição do tempo de trânsito, considerando o dobro do desvio padrão é de 7 ns para onda longitudinal no material.

### 4.2.1 TUS no alumínio

Usando-se do sistema de aquecimento representado pelo modelo da Figura 3.11 foi realizada a montagem experimental apresentada na Figura 4.10. Para esta montagem experimental foi realizado o monitoramento térmico durante o processo de aquecimento do bloco de alumínio.

Figura 4.10\_ Arranjo experimental para aquecimento do alumínio.



Fonte: Próprio autor.

Os dados de ajuste do gerador ultrassônico durante o método de TUS no bloco de alumínio foi apresentado na Tabela 4.6.

Tabela 4.6\_ Ajuste do gerador ultrassônico na TUS no bloco de alumínio.

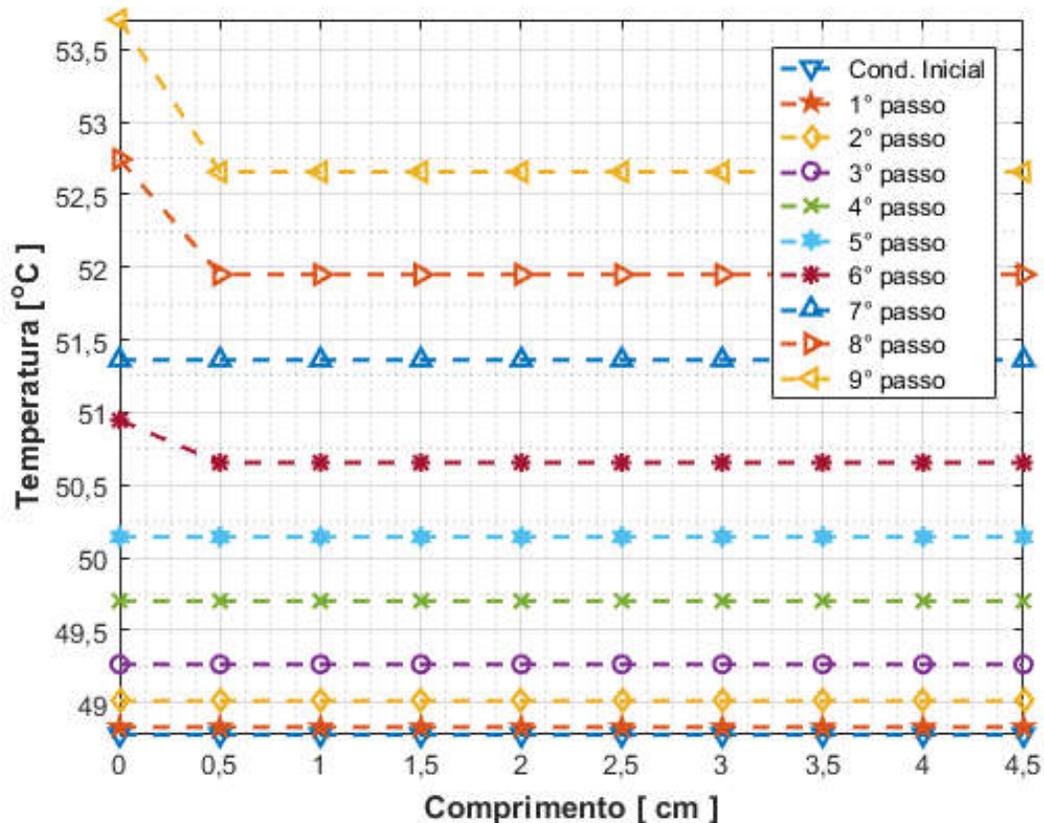
PRF (Hz)	Amortecimento ( $\Omega$ )	Amplitude de energia do pulso ( $\mu$ joules)	Ganho (dB)	HPF (MHz)	LPF (MHz)
1 K	50	52	59	1	10

Fonte: Próprio autor.

O perfil da temperatura para o bloco de alumínio sob aquecimento é ilustrado na Figura 4.11. Para cada passo temporal, uma curva de temperatura vs. comprimento foi traçada para a discretização espacial do bloco. Durante o cada

passo temporal teve uma duração média de 7,5 segundos. Esse tempo foi necessário para fazer a comunicação entre o osciloscópio e o computador. Além do tempo de processamento do sinal ultrassônico e da temperatura da face aquecida via termopar. Enquanto que, o tempo total para obtenção e processamento de todos os dados foi aproximadamente 1,7 minutos.

Figura 4.11\_ Perfis da temperatura ao longo do comprimento do bloco sob regime de aquecimento para cada passo temporal.



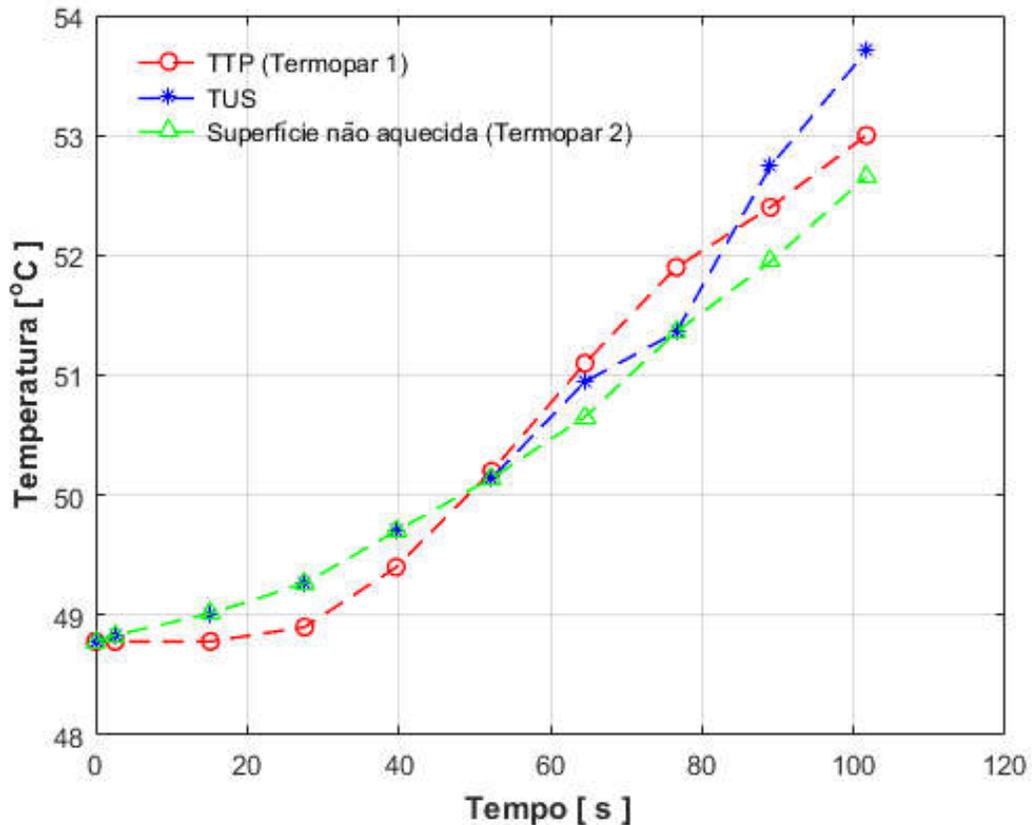
Fonte: Próprio autor.

Na Figura 4.11, algumas das curvas de distribuição de temperatura tiveram gradiente térmico diferente de zero. Essas flutuações foram observadas em pontos próximos à face aquecida do bloco. Por exemplo, na profundidade de 0,5 cm, o gradiente encontrado foi de 0,6 °C/cm, no 6º passo de leitura, 1,58 °C/cm, no 8º passo e 2,08 °C/cm, no 9º passo. Valores esses possivelmente devidos a não linearidade da rampa de aquecimento do sistema. Tipicamente, esses instrumentos possuem uma taxa de rampa de aproximadamente 1 °C/min. Além disso, graças à

excelente condutividade térmica do alumínio, o qual não permitiu que essas diferenças de temperatura ocorresse em outras profundidades. Nota-se que o tempo de difusão é inferior ao tempo necessário para se processar a temperatura de cada passo no algoritmo, que é em torno de 7,5 s. Essas condições são suficientes para o calor se propagar ao longo de toda extensão do bloco de 4,5 cm de comprimento. Além disso, soma-se a possibilidade de a pirocerâmica ter sofrido algum dano mecânico, afetando a homogeneidade de temperatura na superfície e gerando zonas de desequilíbrio térmico.

O método de termometria por ultrassom mostrou que a temperatura na superfície aquecida do bloco de alumínio variou de 48,78°C até 53,70°C, conforme ilustrado na Figura 4.12. Os dados referentes à distribuição de temperatura foram adquiridos simultaneamente por ambos os sistemas termométricos.

Figura 4.12\_ Temperatura do bloco na superfície aquecida e na superfície oposta, obtida pelo método de termometria por ultrassom e pelo sistema de termopares



Fonte: Próprio autor.

A Tabela 4.7 ilustra com valores numéricos das temperaturas na superfície aquecida,  $T_1^n$ , do bloco de alumínio obtidas pelo método de termometria por ultrassom (TUS), e pelo sistema de termometria por termopares (TTP) e a diferença de temperatura entre essas duas técnicas. O índice 1 representa posição no bloco, superfície aquecida, e  $n$  o número de passo temporal.

Tabela 4.7\_ Temperatura para a superfície aquecida do bloco de alumínio em diferentes instantes de tempo.

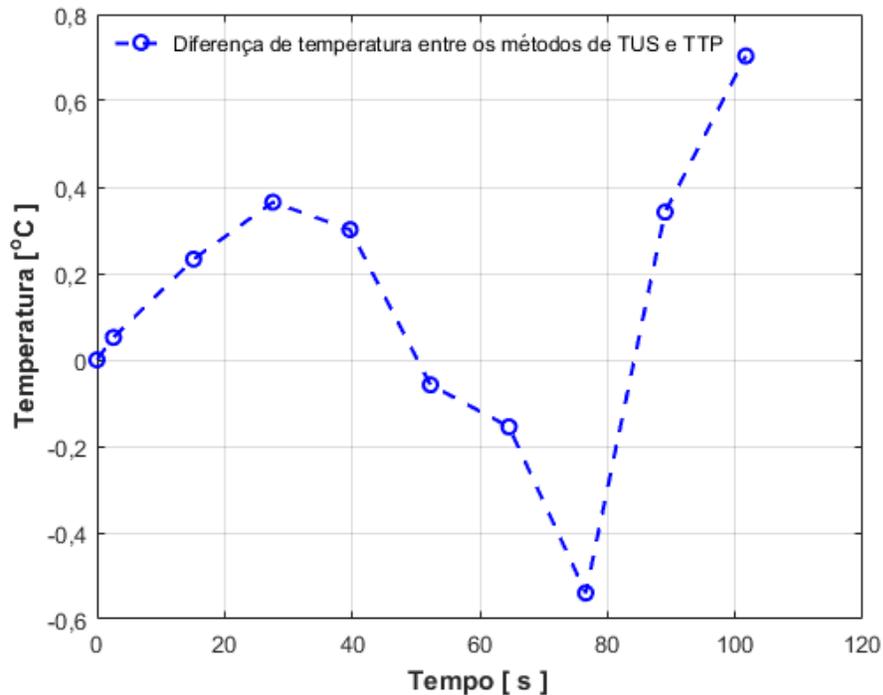
Temperatura da face aquecida	Sistema TUS (°C)	Sistema TTP (°C)	Diferença das temperaturas (°C)
$T_1^1$	48,78	48,78	0,00
$T_1^2$	48,83	48,78	0,05
$T_1^3$	49,01	48,78	0,23
$T_1^4$	49,27	48,90	0,37
$T_1^5$	49,70	49,40	0,30
$T_1^6$	50,14	50,20	0,06
$T_1^7$	50,95	51,10	0,15
$T_1^8$	51,36	51,90	0,54
$T_1^9$	52,74	52,40	0,34
$T_1^{10}$	53,70	53,00	0,70

Fonte: Próprio autor.

Analisando a Tabela 4.7, observa-se que todas as medições referentes à diferença de temperatura entre essas duas técnicas foram inferiores a 0,70°C. Esse resultado representa um valor muito inferior ao da incerteza instrumental dos termopares que é de  $\pm 2,2^\circ\text{C}$ .

Para melhor visualização dos resultados obtidos apresentados na última coluna da Tabela 4.7 foi compilada a Figura 4.13.

Figura 4.13\_ Diferença de temperatura medição pelo sistema de termopares e o de termometria por ultrassom.

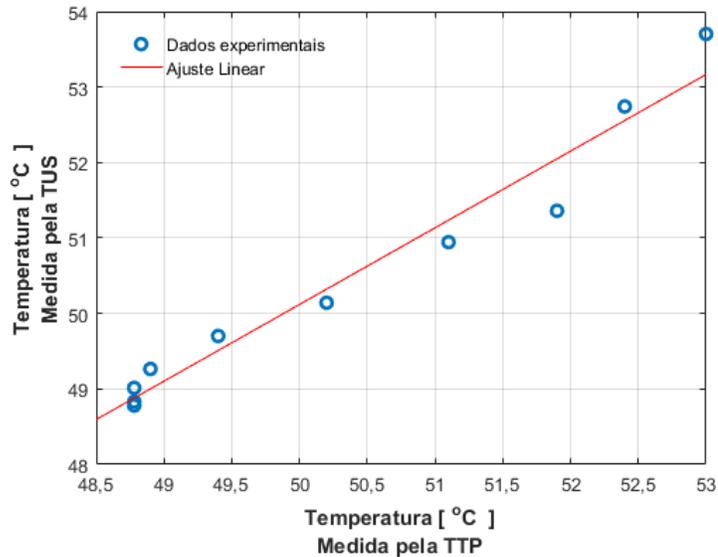


Fonte: Próprio autor.

O valor médio da diferença de temperatura obtida pelas duas técnicas foi de -0,30 °C. Esse valor indica que a temperatura estimada pela TUS foi superior, na maioria dos casos, a aquelas obtidas empregando a TTP. Essas flutuações de temperatura registradas entre as técnicas se justificam pelo fato do tempo de resposta do sistema de termometria por ultrassom ser menor do que a resposta fornecida pelo sistema de termopares, conforme descrito na literatura (IHARA; TAKAHASHI, 2009), (IHARA *et al.*, 2013), (TAKAHASHI; IHARA, 2008), (UENO *et al.*, 1990).

Nesse estudo, o sistema de termometria por termopares foi empregado como técnica padrão, e tomando-o como referência, foi realizada a correlação dos dados obtidos com essa técnica e a de termometria por ultrassom. Para isso, empregou-se o método dos mínimos quadrados como ferramenta de análise, por meio de regressão linear para a obtenção do coeficiente de determinação da curva. A partir do ajuste linear ilustrado na Figura 4.14, foi encontrado o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) foi de 0,9603. Esse resultado indica um índice de correlação de aproximadamente 96%, entre as técnicas termométricas.

Figura 4.14\_ Curva de correlação entre as medições realizadas na superfície aquecida do bloco e estimadas pelo método de termometria por ultrassom e pelo sistema de termopares.



Fonte: Próprio autor.

A Tabela 4.8 apresenta dados referentes à variação das temperaturas obtidas pela técnica de TUS para cada passo consecutivo no tempo.

Tabela 4.8\_ Variação de temperatura em cada passo no tempo medido na superfície aquecida do bloco de alumínio.

Variação de temperatura na face aquecida (°C)	
$T_1^2 - T_1^1 = 0,05^*$	
$T_1^3 - T_1^2 = 0,18$	
$T_1^4 - T_1^3 = 0,25$	
$T_1^5 - T_1^4 = 0,44$	
$T_1^6 - T_1^5 = 0,44$	
$T_1^7 - T_1^6 = 0,80$	
$T_1^7 - T_1^6 = 0,42$	
$T_1^8 - T_1^7 = 1,38$	
$T_1^9 - T_1^8 = 0,96$	

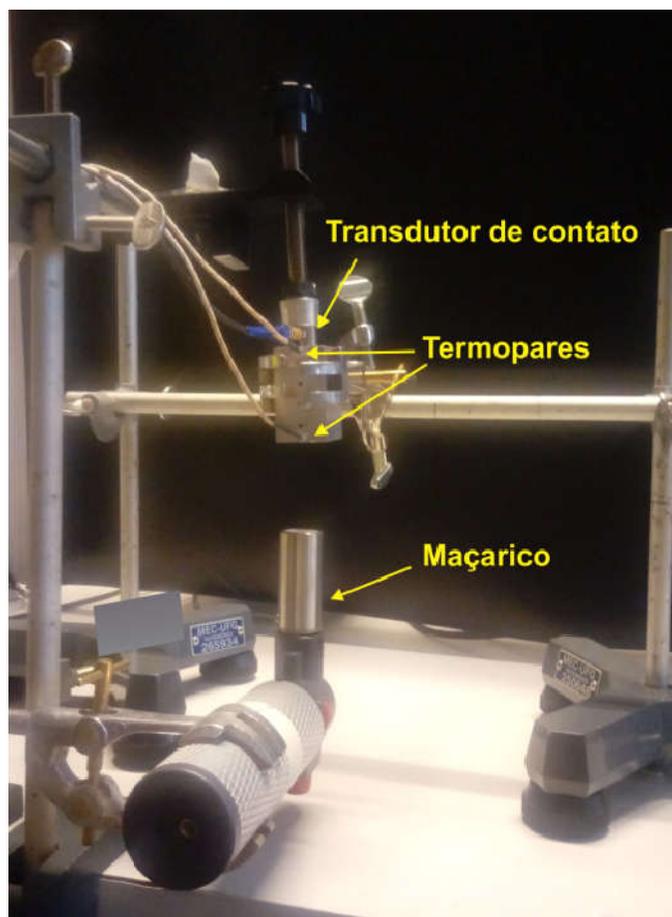
\*Nota: Variação de temperatura inicial medição pelo método de TTP e TUS após o primeiro passo temporal.

Fonte: Próprio autor.

O valor medido entre as temperaturas  $T_1^2 - T_1^1$  refere-se à variação de temperatura inicial medição pelo método de TTP e TUS, após o primeiro passo temporal. A temperatura,  $T_1^1$ , é a condição inicial obtida pelo termopar. A variação média de temperatura entre cada medição na superfície aquecida do bloco de alumínio foi de  $0,42^\circ\text{C}$ . Enquanto, o menor valor obtido foi de  $0,18^\circ\text{C}$ .

Com o objetivo de testar o sistema de termometria por ultrassom para diferentes fontes de calor e observar a resposta do sistema quando submetido a um regime de aquecimento e resfriamento. Para isso, novos ensaios foram realizados empregando um maçarico como fonte aquecedora. Esse aparato foi esquematizado na Figura 3.12 e ilustrado fotograficamente na Figura 4.15. Com esta montagem experimental foi realizado tanto monitoramento durante o aquecimento do bloco de alumínio quanto o monitoramento durante o resfriamento do bloco.

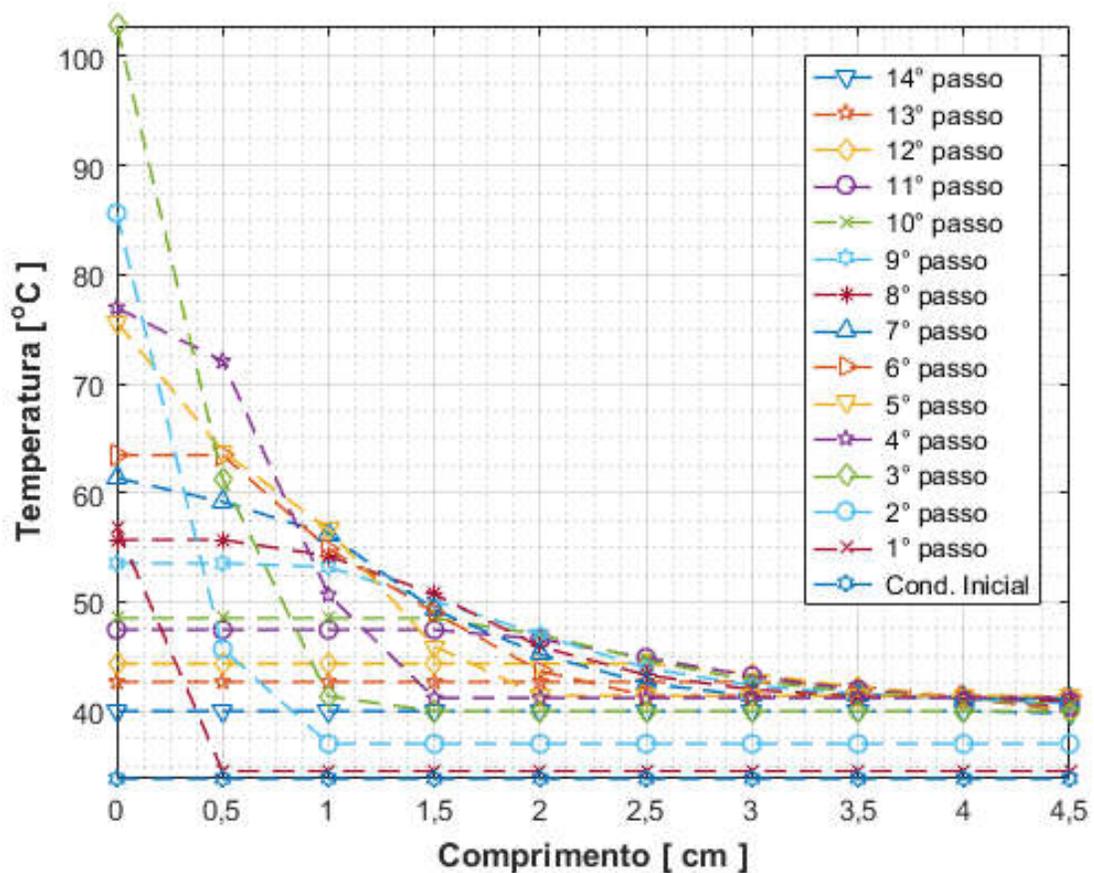
Figura 4.15\_ Arranjo experimental para aquecimento e resfriamento do alumínio.



Fonte: Próprio autor.

O perfil da temperatura para o bloco de alumínio sob aquecimento e resfriamento é ilustrado na Figura 4.16. Durante o cada passo temporal teve uma duração média de 7,67 segundos e o tempo total para obtenção e processamento de todos os dados foi aproximadamente 2,82 minutos.

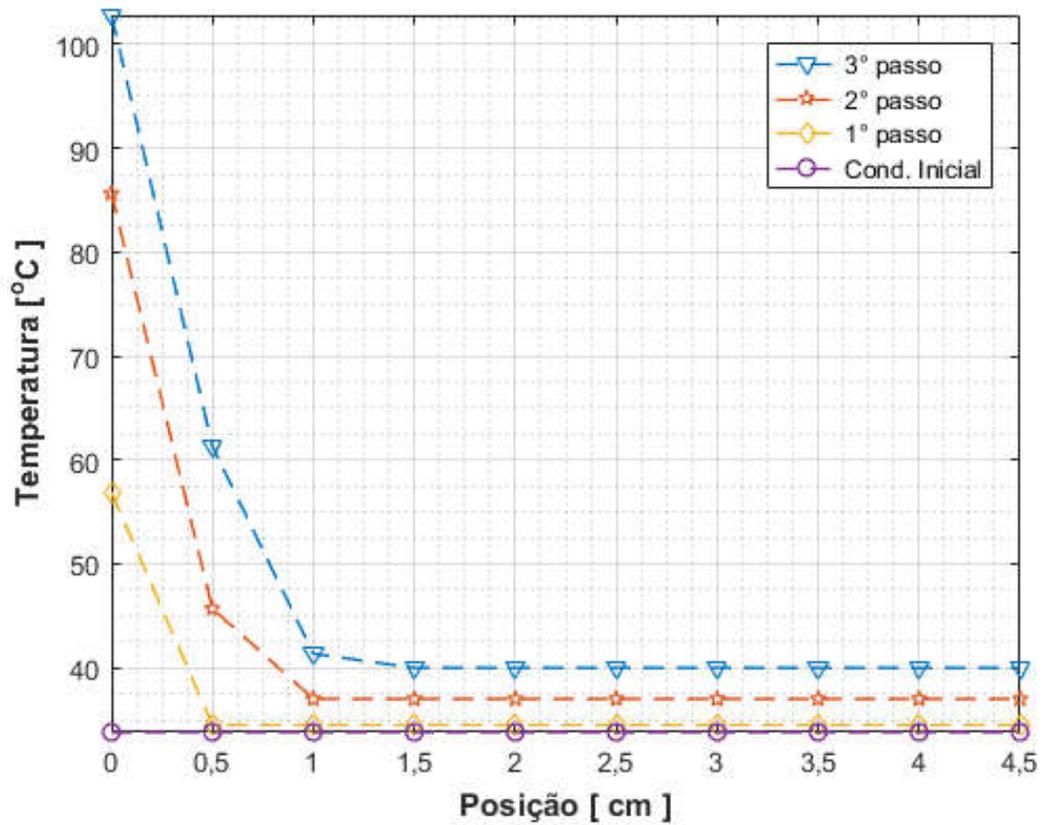
Figura 4.16\_ Perfis da temperatura ao longo do comprimento do bloco sob regime de aquecimento e resfriamento para cada passo temporal no bloco de alumínio



Fonte: Próprio autor.

O processo de aquecimento do alumínio pode ser observado na Figura 4.17, levando um tempo de 31,54 segundos para aquecer a superfície do alumínio à uma temperatura de 102,8 °C.

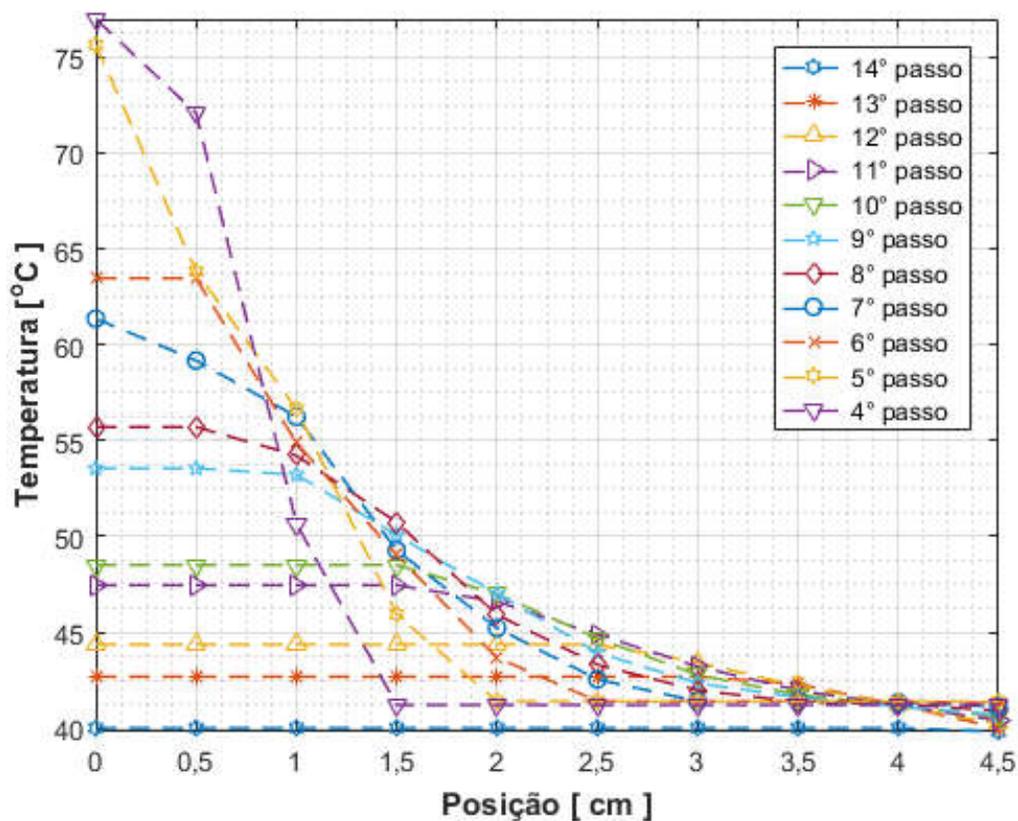
Figura 4.17\_ Perfis da temperatura ao longo do comprimento do bloco sob regime de aquecimento para cada passo temporal no bloco de alumínio



Fonte: Próprio autor.

O processo de resfriamento do alumínio pode ser observado na Figura 4.18, levando um tempo de 137,70 segundos para resfriar a superfície do alumínio a uma temperatura de 39,8 °C. O perfil do resfriamento condiz com obtido em literatura apresentado em (IHARA *et al.*, 2013).

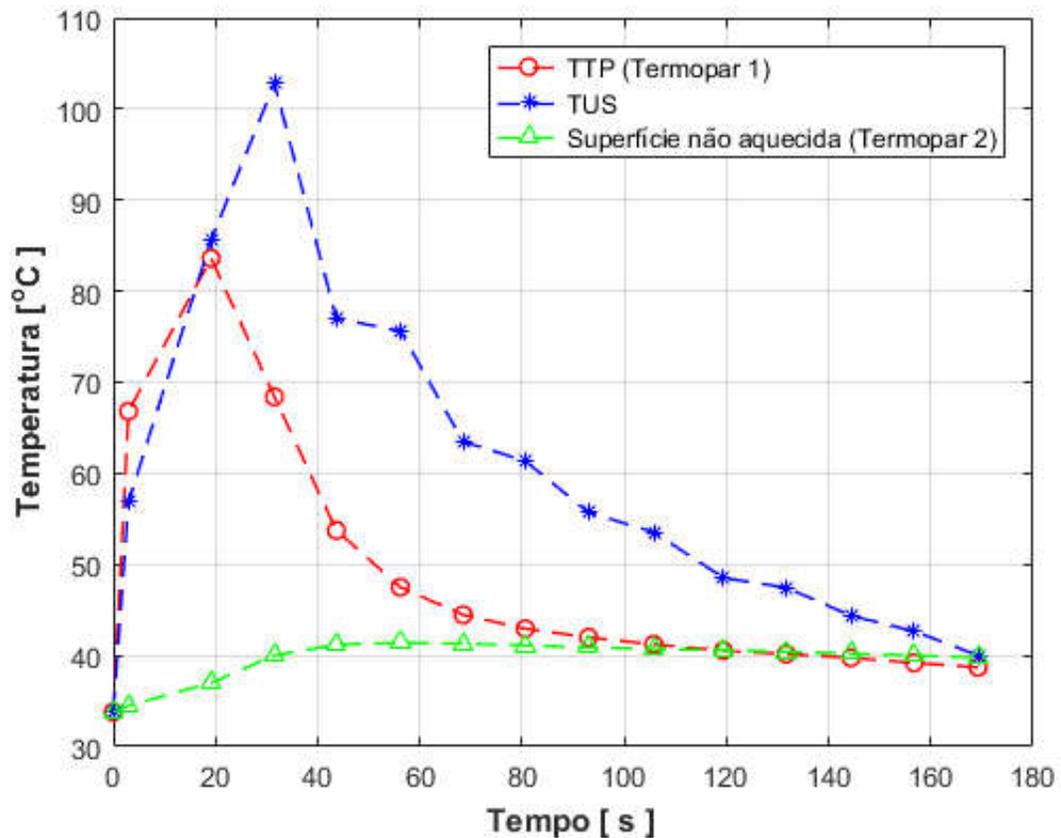
Figura 4.18\_ Perfis da temperatura ao longo do comprimento do bloco sob regime de resfriamento para cada passo temporal no bloco de alumínio



Fonte: Próprio autor.

A Figura 4.19 apresenta a temperatura na superfície aquecida durante o processo de aquecimento e resfriamento mostrados pelos dois sistemas de aquisição de temperatura, TTP e TUS, também foi apresentada a temperatura para a superfície oposta a superfície aquecida.

Figura 4.19\_ Temperatura do bloco na superfície aquecida e na superfície oposta, obtida pelo método de termometria por ultrassom e pelo sistema de termopares



Fonte: Próprio autor.

Na mecânica, a inércia é responsável por limitar a aceleração de um corpo, utilizando-se da relação entre massa e velocidade. De forma similar é a massa térmica e a velocidade da onda térmica que controlam a temperatura da superfície de um material. A inércia térmica é modelada como uma função da densidade, calor específico e capacidade térmica de um dado material. A capacidade térmica caracteriza o corpo, e não da substância que o constitui. Ela é uma propriedade extensiva, ou seja, proporcional à quantidade de material presente no corpo. Por exemplo, dois corpos possuem diferentes capacidades caloríficas se são constituídos pela mesma substância, contudo possuidores de massas distintas.

Durante o processo de transferência de calor, um alto valor da capacidade térmica volumétrica significa um tempo maior para o sistema alcançar equilíbrio. Esse comportamento foi observado na Figura 4.19, ao se submeter o bloco de alumínio a uma fonte de energia térmica com alta taxa de rampa de aquecimento ( $\approx$

255 °C/min). As diferenças observadas entre as medidas realizadas com os termopares e pelo sistema de termometria por ultrassom podem ser explicadas devido à diferença nos métodos de medida. No caso do termopar, o dispositivo sensor se encontrava na parte externa ou levemente introduzido no bloco de alumínio. Dessa forma, a grandeza termométrica medida é rapidamente perdida para o meio por condução, convecção e irradiação. Por outro lado, a quantificação de temperatura pelo ultrassom é dependente do tempo de voo da onda acústica no meio. Devido ao fato do corpo possuir elevada inércia térmica, mesmo após a fonte de calor ser desligada ( $t = 20$  s) as ondas ultrassônicas ainda encontram regiões, no interior do bloco, que ainda não haviam entrado em equilíbrio térmico com o meio. Dessa forma, foi observado no osciloscópio um deslocamento temporal do pico de referência para a direita, o qual somente se estabilizou depois de transcorridos 15 s, mesmo após a fonte ter sido completamente desligada. Isso implica em uma estimativa de velocidade menor do que aquela que seria esperada para a superfície.

A Tabela 4.9 apresenta as temperaturas na superfície aquecida,  $T_1^n$ , do bloco de alumínio obtidas pelo método de termometria por ultrassom (TUS), e pelo sistema de termometria por termopares (TTP) e a diferença de temperatura entre essas duas técnicas.

Tabela 4.9\_ Temperatura para a superfície aquecida do bloco de alumínio em diferentes instantes de tempo durante o processo de aquecimento e resfriamento.

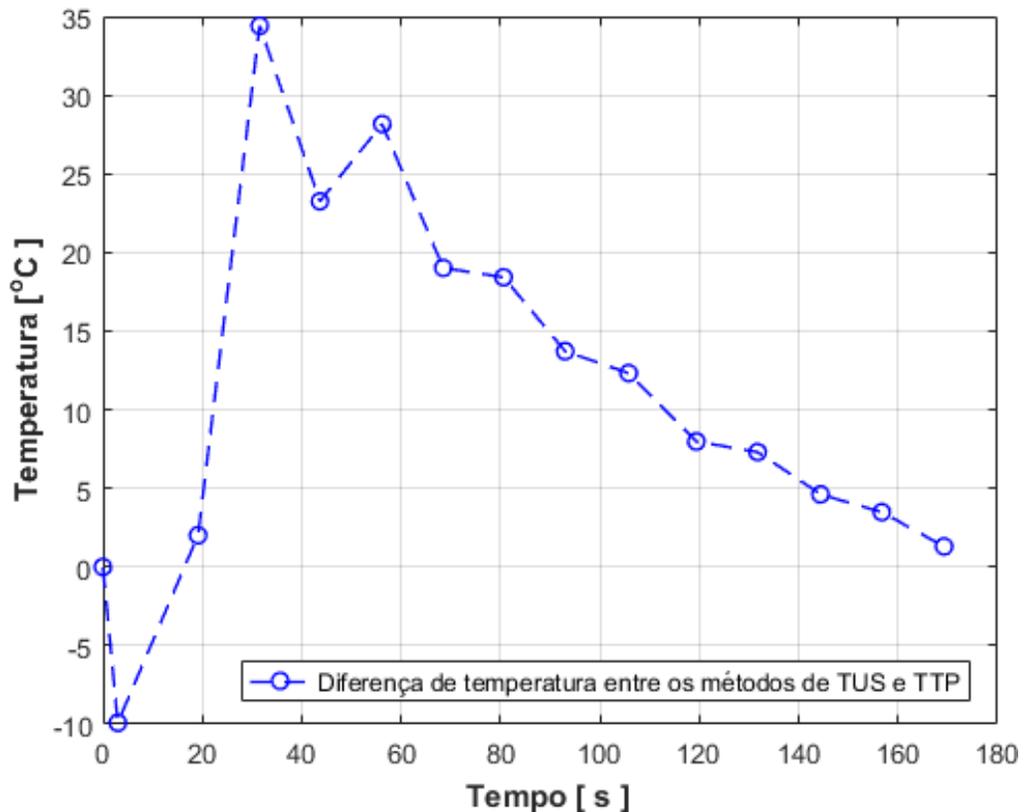
Temperatura da face aquecida	Sistema TUS (°C)	Sistema TTP (°C)	Diferença das temperaturas (°C)
$T_1^1$	33,80	33,80	0,00
$T_1^2$	56,90	66,81	9,91
$T_1^3$	85,63	83,61	2,02
$T_1^4$	102,81	68,4	34,41
$T_1^5$	76,99	53,74	23,25
$T_1^6$	75,64	47,49	28,15
$T_1^7$	63,47	44,46	19,01
$T_1^8$	61,36	42,94	18,42

$T_1^9$	55,71	41,99	13,72
$T_1^{10}$	53,54	41,22	12,32
$T_1^{11}$	48,51	40,53	7,98
$T_1^{12}$	47,45	40,15	7,30
$T_1^{13}$	44,36	39,74	4,62
$T_1^{14}$	42,68	39,19	3,49
$T_1^{15}$	40,00	38,7	1,30

Fonte: Próprio autor.

Analisando a Tabela 4.9, observa-se as medições referentes à diferença de temperatura entre essas duas técnicas foram de 9,91 °C durante o aquecimento e de 34,41 °C durante o resfriamento. Para melhor visualização dos resultados obtidos apresentados na última coluna a Figura 4.21 foi compilada.

Figura 4.21\_ Diferença de temperatura medida pelo sistema de termopares e o de termometria por ultrassom durante o processo de aquecimento e resfriamento.

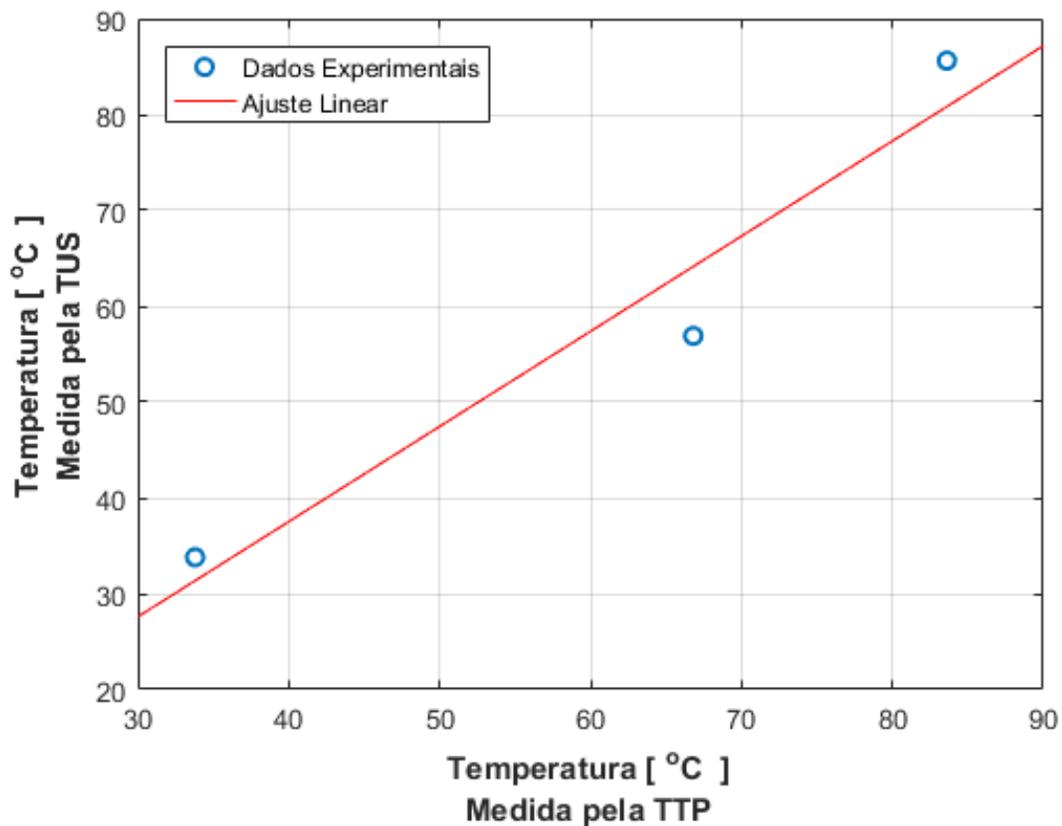


Fonte: Próprio autor.

O valor médio da diferença de temperatura obtida pelas duas técnicas foi de 9,41 °C. A temperatura estimada pela TUS foi superior, na maioria dos casos, a aquelas obtidas empregando a TTP.

A partir do ajuste linear realizado durante o aquecimento, ilustrado na Figura 4.14, foi encontrado o coeficiente de determinação foi de 0,96933. Esse resultado indica um alto índice de correlação de aproximadamente 96%, entre as técnicas termométricas.

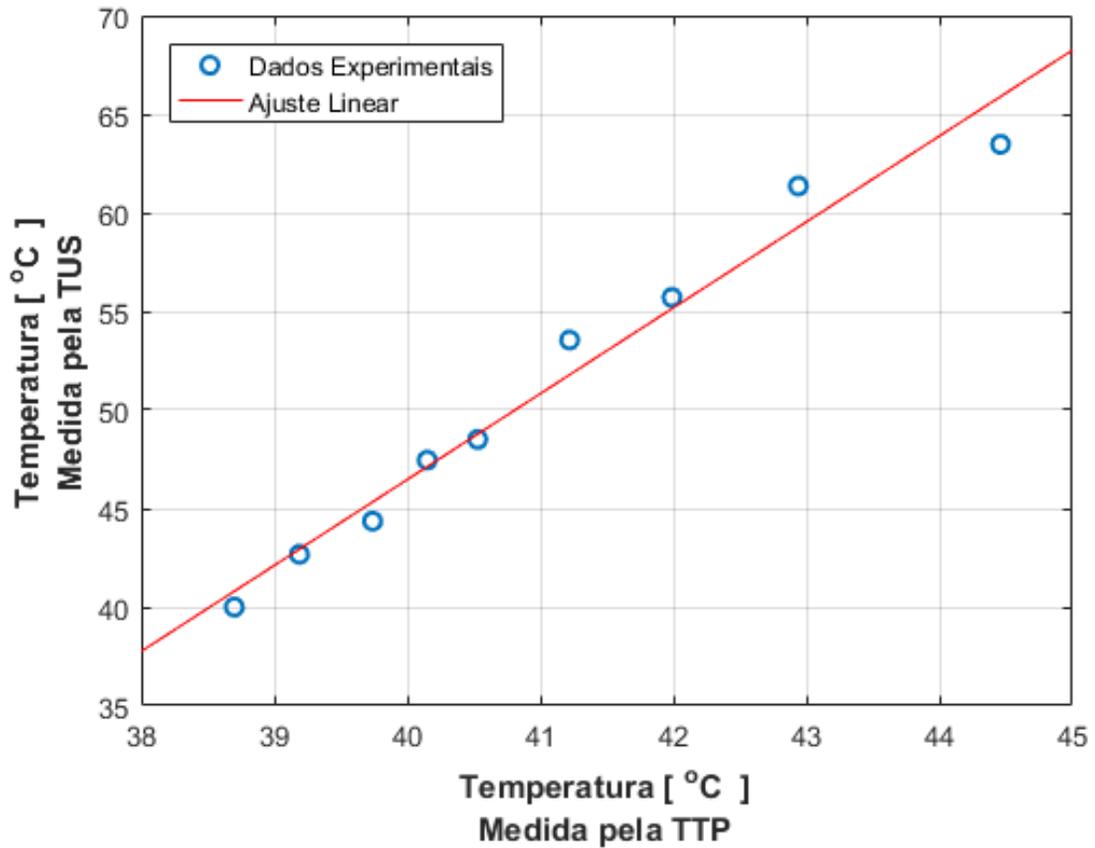
Figura 4.22\_ Curva de correlação entre as medições realizadas na superfície aquecida do bloco e estimadas pelo método de termometria por ultrassom e pelo sistema de termopares, durante o aquecimento.



Fonte: Próprio autor.

O coeficiente de determinação durante o processo de resfriamento foi de 0,98564. Esse resultado indica um alto índice de correlação de aproximadamente 98%, entre as duas técnicas de termometria utilizadas. O ajuste linear realizado para durante o resfriamento pode ser visto na Figura 4.23

Figura 4.23\_ Curva de correlação entre as medições realizadas na superfície aquecida do bloco e estimadas pela TUS e TTP, durante o resfriamento.



Fonte: Próprio autor.

A Tabela 4.10 apresenta dados referentes à variação das temperaturas obtidas pela técnica de TUS para cada passo consecutivo no tempo.

Tabela 4.10\_ Variação em módulo da temperatura em cada passo no tempo medido na superfície aquecida do bloco de alumínio.

<b>Variação em módulo da temperatura na face aquecida (°C)</b>
$T_1^2 - T_1^1 = 23,10^*$
$T_1^3 - T_1^2 = 28,73$
$T_1^4 - T_1^3 = 17,18$
$T_1^5 - T_1^4 = 25,82$
$T_1^6 - T_1^5 = 1,34$

$$T_1^7 - T_1^6 = 12,17$$

$$T_1^7 - T_1^6 = 2,11$$

$$T_1^8 - T_1^7 = 5,65$$

$$T_1^9 - T_1^8 = 2,16$$

$$T_1^{10} - T_1^9 = 5,04$$

$$T_1^{11} - T_1^{10} = 1,05$$

$$T_1^{12} - T_1^{11} = 3,10$$

$$T_1^{13} - T_1^{12} = 1,68$$

$$T_1^{14} - T_1^{13} = 2,67$$

\*Nota: Variação de temperatura inicial medição pelo método de TTP e TUS após o primeiro passo temporal.

Fonte: Próprio autor.

A variação média de temperatura entre cada medição na superfície aquecida do bloco de alumínio foi de 9,14 °C. Enquanto, o menor valor obtido foi de 1,05 °C.

Por meio do valor do coeficiente de determinação obtido pôde-se verificar que o método de termometria por ultrassom empregando o osciloscópio como sistema de aquisição de dados, mostrou ser uma metodologia válida. Variações inferiores a 1,05 °C demonstram que esse versátil instrumento tem potencial para ser empregado em medição de temperatura. O método aqui discutido possibilitou a quantificação da temperatura de forma não invasiva e sem contato direto com a fonte de calor. Para isso foi necessário somente entrar com as condições de contorno obtidas pelo tempo de trânsito da onda acústica e da temperatura na região de contato do transdutor, “zona fria”, dada pelo termopar. Para se iniciar a rotina do programa foi também necessário entrar com uma condição inicial do bloco, que é a temperatura inicial de todo o sistema quando em equilíbrio térmico.

#### 4.2.2 TUS em simulador de tecido mole

O estudo da técnica de termometria por ultrassom, não foi possível de ser empregado para os simuladores de tecido mole. Ao aplicar a fonte de calor no simulador de tecido mole o sinal sofreu fortes alterações, não podendo ser analisadas com o mesmo método utilizado para processar o sinal do ultrassom no

alumínio, aplicando resolução temporal de 5 nanosegundos. Ao diminuir a resolução temporal do osciloscópio perde-se precisão da informação da velocidade sofrida devido ao aumento da temperatura.

Uma solução para este problema seria fazer uso de osciloscópios ou placas de aquisição com resolução da ordem de picosegundos e número de pontos em torno de 10.000 amostras.

## 5 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

Nesta pesquisa foi apresentado um método de termometria por ultrassom para monitoramento de gradiente de temperatura em um bloco de alumínio. Isso, devido sua capacidade de sondar o interior dos materiais e a sua elevada sensibilidade à temperatura. Comparativamente TUS possui vantagens, tais com, não ser invasivo, não destrutivo, compatível com metais e possuir custo reduzido.

O método desenvolvido aqui para caracterizar a velocidade de propagação do ultrassom em um material, em função de sua temperatura, foi eficaz, os dados experimentais apresentaram correlação superior a 99% para o alumínio e para o *phantom* de gelatina.

A metodologia apresentada foi relevante dentro do contexto laboratorial para estimativa de temperatura interna de materiais aquecidos. A técnica TUS propiciou dados precisos comparados aos obtidos pela técnica TTP, apresentando concordância maior que 96% e resolução de 1,05 °C. No entanto o uso de um osciloscópio com baixa taxa de aquisição e baixa resolução não permitiu a análise em materiais simuladores de tecidos biológicos. E durante o resfriamento a técnica mostrou dificuldade para aferir a temperatura na superfície aquecida, para materiais espessos, devido a capacidade térmica ser uma grandeza extensiva.

O valor da correlação entre as duas técnicas poderia ser maior se tivesse sido empregada um bloco de alumínio de menor espessura. Dessa forma, ter-se-ia um menor valor de capacidade térmica volumétrica e conseqüentemente redução dos efeitos relativos ao fenômeno de inércia térmica. No entanto, esse resultado denota o alto potencial da técnica de termometria por ultrassom para monitorar temperatura no interior de um material. Para aplicações industriais o conhecimento desses gradientes é de extrema importância durante o processo de fundição de metais para produção de componentes.

Em trabalhos futuros serão feitas mudanças na técnica com o objetivo de aprimorar o método de termometria por ultrassom para monitoramento térmico em materiais que simulem tecidos moles e tecido biológico. Além dessas aplicações, esforços vêm sendo feitos com o objetivo de tornar esse método, aqui desenvolvido, em uma nova ferramenta para uso comercial. Assim, pretende-se disponibilizar para a sociedade um dispositivo portátil para quantificação de temperatura.

## 6 TRABALHOS PUBLICADOS E SUBMETIDOS

ANDRADE, P. C. e VIEIRA, S. L., *Use of low-cost data acquisition system for ultrasonic thermometry*, IEEE America Latina, pp. 1-7, 2017.

ANDRADE, P. C. e VIEIRA, S. L., Algoritmo computacional para monitoramento interno de temperatura em materiais via um sistema de termometria por ultrassom, Anais do XIII Encontro Anual de Computação (EnAComp), pp. 1-8, Catalão, Goiás, 2017.

ANDRADE, P. C. e VIEIRA, S. L., Termometria por ultrassom, Anais do XIII Congresso de Pesquisa, Ensino e Extensão (CONPEEX) da Universidade Federal de Goiás – UFG, pp. 2424 - 2428, Goiânia, Goiás, 2016.

ANDRADE, P. C. e VIEIRA, S. L., Termometria por ultrassom, Anais do XXXIII Semana da Física da Universidade Federal de Goiás – UFG, pp. 14, Goiânia, Goiás, 2016.

## 7 BIBLIOGRAFIA

PAVAN, T.Z.; CARNEIRO, A.A.O.; EMELIANOV, S.Y. Fotoacústica: imagens da interação de luz e som no corpo humano. *Ciência Hoje*, v. 50, p. 38-42, 2012.

AFANEH, A. *et al.* Ultrasonic Measurements of Temperature in Aqueous Solutions: Why and How. *Physics Research International*, v. 2011, p. e156396, 2011.

AZARI, H. *Basics of Biomedical Ultrasound for Engineers*. [S.l.: s.n.], 2010.

BUTKOV, E. *Mathematical Physics*. [S.l.]: Addison-Wesley Publishing Company, 1968.

DAVIDSON, S. R. *et al.* Characterization of measurement artefacts in fluoroptic temperature sensors: Implications for laser thermal therapy at 810 nm. *Lasers in surgery and medicine*, NULL, v. 36, n. 4, p. 297–306, 2005.

DE SENNEVILLE, B. D. *et al.* MR thermometry for monitoring tumor ablation. *European radiology*, NULL, v. 17, n. 9, p. 2401–2410, 2007.

DEL GROSSO, V. A.; MADER, C. W. *Speed of Sound in Pure Water*. *Acoust. Soc. Am.* [S.l.: s.n.], 1972

DEL ROSAL, B. *et al.* In Vivo Luminescence Nanothermometry: From Materials to Applications. *Adv. Optical Materials*, 2016.

FUJII, I.; KAWASHIMA, K. Digital Measurement of ultrasonic velocity. *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, v. 14, p. 203–209, 1995.

GENNISSON, J.L. *et al.* Ultrasound elastography: principles and techniques. *Diagnostic and interventional imaging*, v. 94, n. 5, p. 487-495, 2013.

GILBERT, J. C. *et al.* Real Time Ultrasonic Monitoring of Hepatic Cryosurgery. v. 22, n. 4, p. 319–330, 1985.

HACHIYA, H.; OHTSUKI, S.; TANAKA, M. Relationships between speed of sound in and density of normal and diseased rat livers. *Japanese Journal of Applied Physics*, v. 33, n. Part 1, n. 5B, p. 3130–3133, 1994.

IHARA, I. *et al.* Ultrasonic Thermometry for Temperature Profiling of Heated Materials. [S.l.]: Springer Berlin Heidelberg, p. 211–236, 2013.

IHARA, I.; TAKAHASHI, M. A novel ultrasonic thermometry for monitoring temperature profiles in materials. 2009.

JIA, R. *et al.* Study of ultrasonic thermometry based on ultrasonic time-of-flight measurement. *Fluids J. Phys. Time-of-flight studies Phys. Today*, v. 6, n. 3, p. 35006,

2016.

KOSUGI, A.; IHARA, I.; MATSUYA, I. Accuracy evaluation of surface temperature profiling by a laser ultrasonic method. *Japanese Journal of Applied Physics*, v. 51, n. 7 PART2, 2012a.

KOSUGI, A.; IHARA, I.; MATSUYA, I. Accuracy evaluation of surface temperature profiling by a laser ultrasonic method. *Japanese Journal of Applied Physics*, v. 51, n. 7S, p. 07GB01, 2012b.

LABORATORY, N. P. Underwater Acoustics: Technical Guides - Speed of Sound in Pure Water. *National Physical Laboratory - NPL*, p. 1–5, 2000.

LEWIS, M. A.; STARUCH, R. M.; CHOPRA, R. Thermometry and ablation monitoring with ultrasound. *International journal of hyperthermia*, v. 31, n. 2, p. 163–81, 2015.

MELO, K. *Aplicação do método das diferenças finitas explícito na solução da equação do calor para o caso transiente e unidimensional*. 2011. Universidade Federal Rural do Semi-Árido, 2011.

MORRIS, H. *et al.* Investigation of the viscous heating artefact arising from the use of thermocouples in a focused ultrasound field. *Physics in medicine and biology*, NULL, v. 53, n. 17, p. 4759, 2008.

PARKER, N. G.; POVEY, M. J. W. Ultrasonic study of the gelation of gelatin: phase diagram, hysteresis and kinetics. *Food Hydrocolloids*, v. 26, n. 1, p. 99–107, 2012.

PEQUENO, A. P.; ZÚNIGA, CE A.; WISCHRAL, A. Utilização do Ultrassom modo-b no estudo do sistema reprodutivo de fêmeas suínas. *Ver. Bras. Reprod. Anim*, Belo Horizonte, v.33, n.3, p.161-168, 2009.

RIEKE, V.; BUTTS PAULY, K. MR thermometry. *Journal of Magnetic Resonance Imaging*, v. 27, n. 2, p. 376–390, fev. 2008.

SACCOMANDI, P.; SCHEA, E.; SILVESTRI, S. Techniques for temperature monitoring during laser-induced thermotherapy: An overview. *International Journal of Hyperthermia*, NULL, v. 29, n. 7, p. 609–619, 2013.

SAPIN-DE BROSSES, E.; PERNOT, M.; TANTER, M. The link between tissue elasticity and thermal dose in vivo. *Physics in medicine and biology*, v. 56, n. 24, p. 7755, 2011.

SCHERER, C. Equações Diferenciais a Derivadas Parciais. *Métodos*

*computacionais da física*. [S.l: s.n.], p. 87–114, 2005.

SHAHMIRZADI, D. et al. Ex Vivo characterization of canine liver tissue viscoelasticity after high-intensity focused ultrasound ablation. *Ultrasound in medicine & biology*, v. 40, n. 2, p. 341-350, 2014.

SUN, Z.; YING, H. multi-gate time-of-flight technique for estimation of temperature distribution in heated tissue: Theory and computer simulation. *Ultrasonics*, NULL, v. 37, n. 2, p. 107–122, 1999.

TAKAHASHI, M.; IHARA, I. Ultrasonic monitoring of internal temperature distribution in a heated material. *Japanese Journal of Applied Physics*, v. 47, n. 5 PART 2, p. 3894–3898, 2008.

TECHAVIPOO, U. et al. Temperature dependence of ultrasonic propagation speed and attenuation in canine tissue. *Ultrasonic imaging*, v. 24, n. 4, p. 246–260, 2002.

UENO, S. et al. Ultrasound thermometry in hyperthermia. 1990, [S.I.]: IEEE, p. 1645–1652, 1990.

ULIANA, J. H.; CARNEIRO, A. A. O.; PAVAN, T. Z. Desenvolvimento e caracterização de um sistema de monitoramento de temperatura através de imagens fotoacústicas. *XXIV Congresso Brasileiro de Engenharia Biomédica - CBEB*, p. 1196–1199, 2014.

ULIANA, J. H.; PAVAN, T. Z. Monitoramento da temperatura tecidual em tratamento de hipertermia por imagem fotoacústica. 2014, Goiânia: Associação Brasileira de Física Médica - ABFM, 2014.

ZHANG, S. et al. Feasibility of using Nakagami distribution in evaluating the formation of ultrasound-induced thermal lesions. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 131, n. 6, p. 4836-4844, 2012.

## APÊNDICE

### A. TEMPERATURA NA SUPERFÍCIE AQUECIDA

Seja  $T_1^n$  a temperatura na superfície aquecida do material amostrado, em que  $n$  é o índice da discretização temporal da rede, conforme o método das diferenças finitas. Para  $n=1$ ,  $T_1^1$ , é a temperatura inicial da amostra.

É possível estimar  $T_1^{n+1}$  através do cálculo da diferença finita acoplado-se o tempo de trânsito do ultrassom através no meio. O tempo de trânsito é escrito na forma numérica através da regra do trapézio. Assim, os tempos de trânsito para a discretização temporal  $n$  e  $n+1$  são dados a seguir:

$$t_L^n = \Delta x \left( \frac{1}{v_1^n} + \frac{1}{v_N^n} \right) + 2\Delta x \sum_{i=2}^{N-1} \frac{1}{v_i^n} \quad (\text{A.1})$$

$$t_L^{n+1} = \Delta x \left( \frac{1}{v_1^{n+1}} + \frac{1}{v_N^{n+1}} \right) + 2\Delta x \sum_{i=2}^{N-1} \frac{1}{v_i^{n+1}} \quad (\text{A.2})$$

Dado que:

$$\frac{1}{v(T)} = \frac{t_L^{n+1} - t_L^n}{\Delta x} \quad (\text{A.3})$$

Sendo a dependência da velocidade do ultrassom no meio linear com a temperatura na forma:

$$v(T) = aT + b \text{ [m/s]} \quad (\text{A.4})$$

Obtendo-se curva experimental de  $v(T)$  e utilizando-se de dois pontos quaisquer desta curva experimental, pode-se escrever um sistema linear factível de duas equações e duas variáveis, conforme a equação abaixo.

$$\frac{1}{v(T)} = \xi T + \beta \text{ [s/m]} \quad (\text{A.5})$$

em que  $\xi$  e  $\beta$  são constantes obtidas experimentalmente. Sendo  $\xi$  dado em  $[s/m^\circ C]$ . Assim a (A.5) pode ser reescrita sob as formas:

$$\frac{1}{v_1} = \xi T_1 + \beta \quad (\text{A.6})$$

$$\frac{1}{v_2} = \xi T_2 + \beta \quad (\text{A.7})$$

Resolvendo-se o sistema linear obtêm-se que  $\xi$  é dado por:

$$\xi = \frac{\frac{1}{v_1} - \frac{1}{v_2}}{T_1 - T_2} = \frac{\frac{1}{aT_1+b} - \frac{1}{aT_2+b}}{T_1 - T_2} = - \frac{a}{(aT_1 + b)(aT_2 + b)} \quad (\text{A.8})$$

A (A.5) também pode ser reescrita usando a discretização temporal  $n$  e  $n+1$ , e espacial  $i=1$  e  $i=N$  nas formas:

$$\frac{1}{v(T)_1^n} = \xi T_1^n + \beta \quad (\text{A.9})$$

$$\frac{1}{v(T)_1^{n+1}} = \xi T_1^{n+1} + \beta \quad (\text{A.10})$$

$$\frac{1}{v(T)_N^{n+1}} = \xi T_N^{n+1} + \beta \quad (\text{A.11})$$

$$\frac{1}{v(T)_N^n} = \xi T_N^n + \beta \quad (\text{A.12})$$

Substituindo os tempos de trânsito (A.1) e (A.2) na (A.3) fica:

$$\frac{t_L^{n+1} - t_L^n}{\Delta x} = \left( \frac{1}{v_1^{n+1}} + \frac{1}{v_N^{n+1}} \right) - \left( \frac{1}{v_1^n} + \frac{1}{v_N^n} \right) + 2 \left( \sum_{i=2}^{N-1} \frac{1}{v_i^{n+1}} - \sum_{i=2}^{N-1} \frac{1}{v_i^n} \right) \quad (\text{A.13})$$

Substituindo o inverso da velocidade dado pelas (A.9), (A.10), (A.11) e (A.12) na (A.13) fica:

$$\begin{aligned} \frac{t_L^{n+1} - t_L^n}{\Delta x} = & \xi T_1^{n+1} + \beta + \xi T_N^{n+1} + \beta - \xi T_1^n - \beta - \xi T_N^n - \beta + 2 \sum_{i=2}^{N-1} (\xi T_i^{n+1} + \beta) \\ & - 2 \sum_{i=2}^{N-1} (\xi T_i^n + \beta) \end{aligned} \quad (\text{A.14})$$

as constantes  $\beta$  se simplificam. Colocando  $T_1^{n+1}$  em evidência é possível escrever a (A.14).

$$T_1^{n+1} = \frac{t_L^{n+1} - t_L^n}{\xi \Delta x} + T_1^n + T_N^n - T_N^{n+1} + 2 \sum_{i=2}^{N-1} (T_i^n - T_i^{n+1}), \quad (\text{A.15})$$

## ANEXOS

### A. GERADOR ULTRASSÔNICO DE PULSO/ECO 5072PR

O Gerador Ultrassônico de Pulso/Eco 5072PR da Olympus, possui no painel frontal alguns parâmetros ajustáveis como o PRF (Hz), ENERGY, DANPING, GAIN (dB), HPF e LPF, ver Figura A.1. O parâmetro *PRF* (*Pulse Repetition Frequency*) é o ajuste da frequência de repetição do pulso. Este modelo oferece uma ampla faixa dinâmica com 1 dB de ajuste de sensibilidade feitas através de um interruptor de alavanca no painel frontal, o parâmetro GAIN (dB).

Figura A.1\_ Painel frontal do Gerador Ultrassônico de Pulso/Eco 5072PR.



Fonte: Próprio autor

O parâmetro *HPF* (*High Pass Filter*) é um filtro passa alta, que filtra sinais acima de 1 MHz, que possibilita uma baixa amplificação do ruído recebido e otimiza o sinal do pulso, garantindo as características superiores ao sinal de ruído. O parâmetro *LPF* (*Low Pass Filter*) é um filtro passa baixa, que filtra sinais abaixo de 10 MHz.

Os pulsos gerados foram transmitidos ao transdutor longitudinal via cabo *micro-dot* blindado, especialmente fabricado para esse tipo de aplicação. No painel frontal do Gerador de Ultrassom há um terminal *BNC* (conector *Bayonet Neill*

*Conceman*) de entrada denominada (T/R), empregado para conectar o transdutor que possui a função de emitir e receber os sinais, em tempos distintos. Essa entrada indica que o modo de operação do instrumento é pulso/eco.

No painel traseiro do Gerador de Ultrassom há um terminal chamado de *SYNC OUT (Trigger)*, ver Figura A.2, responsável pelo sincronismo do sinal gerado e o osciloscópio. Esse terminal foi interligado ao Canal 2 (CH2) do osciloscópio, via cabo coaxial de 75 ohms. Dessa forma, pode-se realizar o sincronismo do pulso com o tempo de varredura do osciloscópio, possibilitando que o sinal permaneça estacionário na tela do instrumento. Também no painel traseiro há um terminal denominado de *RF OUT*, esse terminal foi interligado ao Canal 1 (CH1) do osciloscópio para visualizar o sinal proveniente das amostras.

Figura A.2\_ Painel traseiro do Gerador Ultrassônico de Pulso/Eco 5072PR.



Fonte: Próprio autor

A técnica de ultrassom pulso/eco consiste em se introduzir pulsos de ondas ultrassônicas no interior do material em estudo. Esses pulsos se afastam do transdutor emissor até que encontre em seu caminho alguma interface ou estrutura com impedância maior que o meio, fazendo-os retornar, em parte, na forma de ondas retroespalhadas. Esses ecos são captados pelo mesmo transdutor que os transmitiu e podem ser visualizados empregando-se um osciloscópio.

## B. OSCILOSCÓPIO TEKTRONIX TDS2024C

As principais especificações do osciloscópio Tektronix TDS2024C, Figura B.1, incluem uma resolução vertical de 8 bits, taxa de amostragem de 2 GS/s, largura de banda de 200 MHz e interface USB para conectividade com o computador. E uma resolução temporal de até 2.5 ns.

Figura B.1 \_ Painel frontal do osciloscópio Tektronix TDS2024C.



Fonte: Próprio autor.

As medições feitas durante este estudo obedeceu as configurações específicas do osciloscópio TDS2024C conforme mostra a Tabela B.1.

Tabela B.1\_ Configurações específicas do TDS2024C.

Base de tempo	Amostras por segundo	Componente
2,5 ns	2 GS/s	200,0 MHz
De 5,0 a 250,0 ns	2 GS/s	200,0 MHz
500,0 ns	500 MS/s	200,0 MHz
1,0 $\mu$ s	250,0 MS/s	125,0 MHz
2,5 $\mu$ s	100,0 MS/s	50,0 MHz
5,0 $\mu$ s	50,0 MS/s	25,0 MHz
10,0 $\mu$ s	25,0 MS/s	12,5 MHz

Fonte: Manual do Usuário: Osciloscópios das Séries TDS2000C e TDS1000C-EDU.

### C. CORRELAÇÃO CRUZADA

A função da correlação cruzada é definida por

$$R_{xy}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)y(t + \tau)dt \quad (C.1)$$

Em que  $x(t)$  é um eco,  $y(t)$  é um outro eco e  $\tau$  é o tempo de atraso. Se a média não é dispersiva e a atenuação não depende da frequência, o eco  $y(t)$  é expresso por

$$y(t) = \eta x(t - t') \quad (C.2)$$

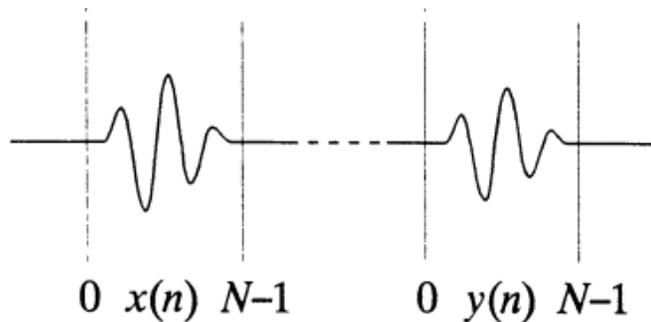
em que  $\eta$  é a razão da amplitude de dois ecos e  $t'$  é o tempo de retardo relativo a  $x(t)$ , ou seja, o tempo de trânsito. Assim,  $\tau$  que maximiza  $R_{xy}$  é igual ao valor de  $t'$ .

Para formas de onda digitalizadas, a função de correlação cruzada discreta é definida como

$$R_{xy}(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-k-1} x(n)y(n+k) \quad (-(N-1) \leq k \leq N-1) \quad (C.3)$$

Dois ecos  $x(n)$ ,  $y(n)$  são cortados como mostrado na Figura B.1 O valor de  $k$  que maximiza  $R_{xy}$  na (C.3),  $k_m$ , pode não ser o máximo real de  $R_{xy}$  na (C.1) porque o valor de  $k$  é um inteiro discreto correspondente ao intervalo de amostragem. Para avaliar o  $k^*$  que dá o máximo real de  $R_{xy}$ , três pontos ao redor do  $k_m$  são interpolados por uma função quadrática e o extremo da função quadrática é considerado como o máximo de  $R_{xy}$  (FUJII; KAWASHIMA, 1995).

Figura C.1\_ Corte dos ecos



Fonte: Adaptada de (FUJII; KAWASHIMA, 1995)

#### D. VELOCIDADE DO SOM NA ÁGUA

A velocidade do som na água pura é um valor já conhecido na literatura, Tabela D.1.

Tabela D.1\_ Velocidade do som na água pura.

$T_{\text{ág}}$ °C	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
0	1402.388	1402.891	1403.393	1403.893	1404.393	1404.892	1405.389	1405.885	1406.380	1406.874
1	1407.367	1407.859	1408.349	1408.838	1409.327	1409.814	1410.300	1410.784	1411.268	1411.751
2	1412.232	1412.712	1413.192	1413.670	1414.147	1414.622	1415.097	1415.571	1416.043	1416.515
3	1416.985	1417.454	1417.922	1418.389	1418.855	1419.320	1419.784	1420.246	1420.708	1421.168
4	1421.628	1422.086	1422.543	1422.999	1423.454	1423.908	1424.361	1424.813	1425.264	1425.713
5	1426.162	1426.609	1427.056	1427.501	1427.946	1428.389	1428.831	1429.272	1429.712	1430.151
6	1430.589	1431.026	1431.462	1431.897	1432.331	1432.764	1433.196	1433.626	1434.056	1434.485
7	1434.912	1435.339	1435.764	1436.189	1436.612	1437.035	1437.456	1437.877	1438.296	1438.715
8	1439.132	1439.549	1439.964	1440.378	1440.792	1441.204	1441.615	1442.026	1442.435	1442.843
9	1443.251	1443.657	1444.062	1444.467	1444.870	1445.273	1445.674	1446.074	1446.474	1446.872
10	1447.270	1447.666	1448.062	1448.456	1448.850	1449.243	1449.634	1450.025	1450.415	1450.803
11	1451.191	1451.578	1451.964	1452.349	1452.733	1453.116	1453.498	1453.879	1454.259	1454.638
12	1455.016	1455.394	1455.770	1456.145	1456.520	1456.893	1457.266	1457.637	1458.008	1458.378
13	1458.747	1459.115	1459.482	1459.848	1460.213	1460.577	1460.940	1461.303	1461.664	1462.025
14	1462.384	1462.743	1463.101	1463.458	1463.814	1464.169	1464.523	1464.876	1465.229	1465.580
15	1465.931	1466.280	1466.629	1466.977	1467.324	1467.670	1468.015	1468.359	1468.703	1469.045
16	1469.387	1469.728	1470.067	1470.406	1470.745	1471.082	1471.418	1471.754	1472.088	1472.422
17	1472.755	1473.087	1473.418	1473.748	1474.078	1474.406	1474.734	1475.061	1475.386	1475.712
18	1476.036	1476.359	1476.682	1477.003	1477.324	1477.644	1477.963	1478.282	1478.599	1478.916
19	1479.231	1479.546	1479.860	1480.174	1480.486	1480.798	1481.108	1481.418	1481.727	1482.035
20	1482.343	1482.649	1482.955	1483.260	1483.564	1483.868	1484.170	1484.472	1484.772	1485.073
21	1485.372	1485.670	1485.968	1486.264	1486.560	1486.856	1487.150	1487.443	1487.736	1488.028
22	1488.319	1488.610	1488.899	1489.188	1489.476	1489.763	1490.049	1490.335	1490.620	1490.804
23	1491.187	1491.469	1491.751	1492.032	1492.312	1492.591	1492.870	1493.147	1493.424	1493.700
24	1493.976	1494.250	1494.524	1494.797	1495.070	1495.341	1495.612	1495.882	1496.151	1496.420
25	1496.687	1496.954	1497.220	1497.486	1497.751	1498.014	1498.278	1498.540	1498.802	1499.063
26	1499.323	1499.582	1499.841	1500.099	1500.356	1500.612	1500.868	1501.123	1501.377	1501.630
27	1501.883	1502.135	1502.386	1502.637	1502.887	1503.136	1503.384	1503.632	1503.878	1504.124
28	1504.370	1504.615	1504.858	1505.102	1505.344	1505.586	1505.827	1506.067	1506.307	1506.546
29	1506.784	1507.022	1507.258	1507.494	1507.730	1507.964	1508.198	1508.431	1508.664	1508.896
30	1509.127	1509.357	1509.587	1509.816	1510.044	1510.272	1510.499	1510.725	1510.950	1511.175
31	1511.399	1511.623	1511.845	1512.068	1512.289	1512.510	1512.730	1512.949	1513.167	1513.385
32	1513.603	1513.819	1514.035	1514.250	1514.465	1514.679	1514.892	1515.104	1515.316	1515.527
33	1515.738	1515.948	1516.157	1516.365	1516.573	1516.780	1516.987	1517.193	1517.398	1517.602
34	1517.806	1518.009	1518.212	1518.414	1518.615	1518.815	1519.015	1519.214	1519.413	1519.611
35	1519.808	1520.005	1520.201	1520.396	1520.591	1520.785	1520.978	1521.171	1521.363	1521.554
36	1521.745	1521.935	1522.125	1522.314	1522.502	1522.690	1522.877	1523.063	1523.249	1523.434
37	1523.618	1523.802	1523.985	1524.168	1524.350	1524.531	1524.712	1524.892	1525.071	1525.250
38	1525.428	1525.606	1525.783	1525.959	1526.135	1526.310	1526.484	1526.658	1526.832	1527.004
39	1527.176	1527.348	1527.518	1527.689	1527.858	1528.027	1528.195	1528.363	1528.530	1528.697

$T_{\text{ta}}$ °C	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
40	1528.863	1529.028	1529.193	1529.357	1529.521	1529.684	1529.846	1530.008	1530.169	1530.329
41	1530.489	1530.649	1530.807	1530.965	1531.123	1531.280	1531.436	1531.592	1531.747	1531.902
42	1532.056	1532.210	1532.362	1532.515	1532.666	1532.818	1532.968	1533.118	1533.267	1533.416
43	1533.564	1533.712	1533.859	1534.006	1534.152	1534.297	1534.442	1534.586	1534.730	1534.873
44	1535.015	1535.157	1535.298	1535.439	1535.579	1535.719	1535.858	1535.997	1536.134	1536.272
45	1536.409	1536.545	1536.681	1536.816	1536.950	1537.084	1537.218	1537.351	1537.483	1537.615
46	1537.746	1537.877	1538.007	1538.137	1538.266	1538.394	1538.522	1538.650	1538.776	1538.903
47	1539.028	1539.154	1539.278	1539.402	1539.526	1539.649	1539.772	1539.894	1540.015	1540.136
48	1540.256	1540.376	1540.495	1540.614	1540.732	1540.850	1540.967	1541.083	1541.199	1541.315
49	1541.430	1541.544	1541.658	1541.772	1541.885	1541.997	1542.109	1542.220	1542.331	1542.441
50	1542.551	1542.660	1542.768	1542.877	1542.984	1543.091	1543.198	1543.304	1543.409	1543.514
51	1543.619	1543.723	1543.826	1543.929	1544.032	1544.134	1544.235	1544.336	1544.436	1544.536
52	1544.636	1544.734	1544.833	1544.931	1545.028	1545.125	1545.221	1545.317	1545.412	1545.507
53	1545.601	1545.695	1545.788	1545.881	1545.973	1546.065	1546.156	1546.247	1546.337	1546.427
54	1546.517	1546.605	1546.694	1546.781	1546.869	1546.955	1547.042	1547.128	1547.213	1547.298
55	1547.382	1547.466	1547.549	1547.632	1547.715	1547.796	1547.878	1547.959	1548.039	1548.119
56	1548.199	1548.278	1548.356	1548.434	1548.512	1548.589	1548.665	1548.741	1548.817	1548.892
57	1548.967	1549.041	1549.115	1549.188	1549.260	1549.333	1549.405	1549.476	1549.547	1549.617
58	1549.687	1549.756	1549.825	1549.894	1549.962	1550.029	1550.096	1550.163	1550.229	1550.295
59	1550.360	1550.425	1550.489	1550.553	1550.616	1550.679	1550.741	1550.803	1550.865	1550.926
60	1550.986	1551.046	1551.106	1551.165	1551.224	1551.282	1551.340	1551.397	1551.454	1551.510
61	1551.566	1551.622	1551.677	1551.731	1551.786	1551.839	1551.892	1551.945	1551.998	1552.049
62	1552.101	1552.152	1552.202	1552.252	1552.302	1552.351	1552.400	1552.448	1552.496	1552.543
63	1552.590	1552.637	1552.683	1552.729	1552.774	1552.818	1552.863	1552.907	1552.950	1552.993
64	1553.035	1553.078	1553.119	1553.160	1553.201	1553.241	1553.281	1553.321	1553.360	1553.398
65	1553.437	1553.474	1553.512	1553.548	1553.585	1553.621	1553.656	1553.691	1553.726	1553.760
66	1553.794	1553.828	1553.860	1553.893	1553.925	1553.957	1553.988	1554.019	1554.049	1554.079
67	1554.109	1554.138	1554.167	1554.195	1554.223	1554.250	1554.277	1554.304	1554.330	1554.356
68	1554.381	1554.406	1554.430	1554.454	1554.478	1554.501	1554.524	1554.546	1554.568	1554.590
69	1554.611	1554.632	1554.652	1554.672	1554.691	1554.710	1554.729	1554.747	1554.765	1554.782
70	1554.799	1554.816	1554.832	1554.848	1554.863	1554.878	1554.893	1554.907	1554.920	1554.934
71	1554.947	1554.959	1554.971	1554.983	1554.994	1555.005	1555.015	1555.026	1555.035	1555.044
72	1555.053	1555.062	1555.070	1555.077	1555.085	1555.091	1555.098	1555.104	1555.110	1555.115
73	1555.120	1555.124	1555.128	1555.132	1555.135	1555.138	1555.140	1555.142	1555.144	1555.145
74	1555.146	1555.147	1555.147	1555.146	1555.146	1555.145	1555.143	1555.141	1555.139	1555.136
75	1555.133	1555.130	1555.126	1555.122	1555.117	1555.112	1555.107	1555.101	1555.095	1555.088
76	1555.081	1555.074	1555.066	1555.058	1555.050	1555.041	1555.032	1555.022	1555.012	1555.002
77	1554.991	1554.980	1554.968	1554.956	1554.944	1554.931	1554.918	1554.905	1554.891	1554.877
78	1554.862	1554.847	1554.832	1554.816	1554.800	1554.784	1554.767	1554.750	1554.732	1554.714
79	1554.696	1554.677	1554.658	1554.639	1554.619	1554.599	1554.578	1554.557	1554.536	1554.514
80	1554.492	1554.470	1554.447	1554.424	1554.400	1554.376	1554.352	1554.327	1554.302	1554.277
81	1554.251	1554.225	1554.199	1554.172	1554.144	1554.117	1554.089	1554.061	1554.032	1554.003
82	1553.974	1553.944	1553.914	1553.883	1553.852	1553.821	1553.789	1553.758	1553.725	1553.693
83	1553.660	1553.626	1553.592	1553.558	1553.524	1553.489	1553.454	1553.418	1553.383	1553.346
84	1553.310	1553.273	1553.235	1553.198	1553.160	1553.121	1553.083	1553.044	1553.004	1552.964
85	1552.924	1552.884	1552.843	1552.802	1552.760	1552.718	1552.676	1552.634	1552.591	1552.547
86	1552.504	1552.460	1552.415	1552.371	1552.326	1552.280	1552.234	1552.188	1552.142	1552.095
87	1552.048	1552.001	1551.953	1551.905	1551.856	1551.807	1551.758	1551.709	1551.659	1551.609
88	1551.558	1551.507	1551.456	1551.404	1551.352	1551.300	1551.248	1551.195	1551.141	1551.088
89	1551.034	1550.980	1550.925	1550.870	1550.815	1550.759	1550.703	1550.647	1550.590	1550.533
90	1550.476	1550.418	1550.360	1550.302	1550.243	1550.184	1550.125	1550.065	1550.005	1549.945
91	1549.884	1549.823	1549.762	1549.700	1549.638	1549.576	1549.513	1549.450	1549.387	1549.323
92	1549.259	1549.195	1549.131	1549.066	1549.000	1548.935	1548.869	1548.803	1548.736	1548.669
93	1548.602	1548.534	1548.467	1548.398	1548.330	1548.261	1548.192	1548.122	1548.053	1547.983
94	1547.912	1547.841	1547.770	1547.699	1547.627	1547.555	1547.483	1547.410	1547.337	1547.264
95	1547.190	1547.116	1547.042	1546.967	1546.892	1546.817	1546.741	1546.665	1546.589	1546.513
96	1546.436	1546.359	1546.281	1546.204	1546.126	1546.047	1545.969	1545.890	1545.810	1545.731
97	1545.651	1545.570	1545.490	1545.409	1545.328	1545.246	1545.164	1545.082	1545.000	1544.917
98	1544.834	1544.751	1544.667	1544.583	1544.499	1544.414	1544.329	1544.244	1544.159	1544.073
99	1543.987	1543.900	1543.814	1543.727	1543.639	1543.552	1543.464	1543.376	1543.287	1543.198
100	1543.109									

Fonte: (DEL GROSSO; MADER, 1972).