



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS (UFG)  
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO (EMC)  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO

ANA CLARA OLIVEIRA DE QUEIROZ TEÓFILO

**Dosimetria acustoelástica da dose absorvida em phantoms de gel equivalentes  
a tecido mole**

GOIÂNIA - GO  
2026



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS  
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO

## TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO (TECA) 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 9.610/98](#), 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.

O conteúdo das Teses e Dissertações disponibilizado na BDTD/UFG é de responsabilidade exclusiva do autor. Ao encaminhar o produto final, o autor(a) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

#### 1. Identificação do material bibliográfico

Dissertação     Tese     Outro\*: \_\_\_\_\_

\*No caso de mestrado/doutorado profissional, indique o formato do Trabalho de Conclusão de Curso, permitido no documento de área, correspondente ao programa de pós-graduação, orientado pela legislação vigente da CAPES.

Exemplos: Estudo de caso ou Revisão sistemática ou outros formatos.

#### 2. Nome completo do autor

**ANA CLARA OLIVEIRA DE QUEIROZ TEÓFILO**

#### 3. Título do trabalho

**“Dosimetria acustoelástica da dose absorvida em phantoms de gel equivalentes a tecido mole”**

#### 4. Informações de acesso ao documento (este campo deve ser preenchido pelo orientador)

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

**[1]** Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante:

**a)** consulta ao(a) autor(a) e ao(a) orientador(a);

**b)** novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo da tese ou dissertação.

O documento não será disponibilizado 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.

**Obs. Este termo deverá ser assinado no SEI pelo orientador e pelo autor.**



Documento assinado eletronicamente por **Silvio Leao Vieira, Professor do Magistério Superior**, em 28/04/2026, às 10:01, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

---



Documento assinado eletronicamente por **Ana Clara Oliveira De Queiroz Teófilo, Discente**, em 29/04/2026, às 11:47, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

---



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.ufg.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **6148209** e o código CRC **E49CF3BB**.

---

ANA CLARA OLIVEIRA DE QUEIROZ TEÓFILO

**Dosimetria acustoelástica da dose absorvida em phantoms de gel equivalentes  
a tecido mole**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação, da Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC) da Universidade Federal de Goiás (UFG), como requisito para obtenção do título de Mestra em Engenharia Elétrica e de Computação.

Área de concentração: Engenharia de Computação

Orientador(a): Dr. Sílvio Leão Vieira

GOIÂNIA  
2026

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

Teófilo, Ana Clara Oliveira de Queiroz  
Dosimetria acustoelástica da dose absorvida em phantoms de gel equivalentes a tecido mole [Manuscrito] / Ana Clara Oliveira de Queiroz Teófilo. - 2026.

87 f.: 2026

Orientador: Prof. Dr. Sílvio 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, 2026.

Bibliografia.

Inclui: lista de figuras, lista de tabelas.

1. Dosimetria Gel. 2. Ultrassom. 3. Radioterapia. 4. Gel Magic-f. 5. Velocidade do Som.

I. Vieira, Sílvio Leão, orient. II. Título.

CDU 621.3



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS

ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO

**ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO**

Ata nº **05** da sessão de Defesa de Dissertação de **ANA CLARA OLIVEIRA DE QUEIROZ TEÓFILO**, que confere o título de Mestra em **ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO**, na área de concentração em **ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO**.

Aos **vinte e quatro dias do mês de fevereiro de dois mil e vinte e seis**, a partir das **14 horas**, no **Laboratório de Mídias - IF2, Instituto de Física da UFG campus Samambaia**, realizou-se a sessão pública de Defesa de Dissertação intitulada **“Dosimetria acustoelástica da dose absorvida em phantoms de gel equivalentes a tecido mole”**. Os trabalhos foram instalados pelo Orientador, Professor Doutor **Sílvio Leão Vieira - (IF/UFG)** com a participação dos demais membros da Banca Examinadora: Professora Doutora **Patrícia Nicolucci - (Departamento de Física Ribeirão Preto / Universidade de São Paulo)**, membro titular externo; Professor Doutor **José Francisco Silva Costa Júnior Membro Titular Externo**, Professor Doutor **Emerson Nobuyuki Itikawa - (IF/UFG)** Suplente Interno, **cujas participações ocorreram através de videoconferência e de forma híbrida (virtual + presencial) no Laboratório de Mídias - IF2, Instituto de Física da UFG campus Samambaia**. Durante a arguição os membros da banca **não fizeram** sugestão de alteração do título do trabalho. A Banca Examinadora reuniu-se em sessão secreta a fim de concluir o julgamento da Dissertação, tendo sido a candidata **aprovada** pelos seus membros. Proclamados os resultados pelo Professor Doutor **Sílvio Leão Vieira**, Presidente da Banca Examinadora, foram encerrados os trabalhos e, para constar, lavrou-se a presente ata que é assinada pelos Membros da Banca Examinadora, vinte dias do mês de fevereiro de dois mil e vinte e seis.

## TÍTULO SUGERIDO PELA BANCA



Documento assinado eletronicamente por **José Francisco Silva Costa Júnior, Usuário Externo**, em 25/02/2026, às 10:26, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Patrícia Nicolucci, Usuário Externo**, em 25/02/2026, às 10:31, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Sílvio Leão Vieira, Professor do Magistério Superior**, em 25/02/2026, às 14:18, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Ana Clara Oliveira De Queiroz Teófilo, Discente**, em 01/03/2026, às 23:05, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site

[https://sei.ufg.br/sei/controlador\\_externo.php?](https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0)

[acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **5988389** e o código CRC **0D0B8B24**.

---

**Referência:** Processo nº 23070.007236/2026-96

SEI nº 5988389

# Agradecimentos

Agradecemos à direção do Hospital Araújo Jorge da Associação de Combate ao Câncer de Goiás - ACCG, por possibilitar o uso das instalações e dos equipamentos do hospital. Agradecemos também a toda equipe, em especial aos Físicos Médicos Rogério Sanches Santos e Flávia Cristhina Ferreira de Araújo.

Somos gratos ao Físico Médico Pedro Henrique Dias Coelho por dispor do seu tempo em sessões de irradiação de amostras na clínica Cebrom Oncoclínicas de Goiânia-GO.

Ao Hospital das Clínicas da Universidade Federal de Goiás/Empresa Brasileira de Serviços Hospitalares (UFG/EBSERH) e às Físicas Médicas em Radiodiagnóstico e Radioproteção Ana Paula Rodrigues e Samara Pavan pelo suporte durante aquisições de imagens por ressonância magnética.

Ao Físico Médico em Radiodiagnóstico Murilo Felisberto Moraes de Assunção da SECON Serviços de Radioproteção por nos auxiliar obtenção de imagens de ressonância nas unidades de diagnóstico da Unimed Goiânia, e de elastografia por ultrassom no Hospital São Francisco de Assis, ambos em Goiânia-GO.

Ao servidor técnico do Instituto de Física da UFG Me. Jeverson Cardoso da Silva por serviços prestados para confecção de peças em impressora 3D para suporte de transdutores.

Ao meu orientador Sílvio Leão Vieira, por me ajudar em todos os momentos do projeto e sempre acreditar que daria certo, não deixando eu desistir.

# Resumo

O câncer permanece um dos principais desafios à saúde pública global, figurando entre as principais causas de morte e impondo exigências crescentes aos sistemas de saúde. Nesse cenário, a radioterapia ocupa posição central no tratamento oncológico, sendo empregada tanto com finalidade curativa quanto paliativa. O sucesso da técnica depende da determinação precisa da dose absorvida, essencial para garantir a eficácia terapêutica e a segurança do paciente. A necessidade de verificação tridimensional da distribuição da dose tem impulsionado o desenvolvimento de dosímetros em gel polimérico, que permitem o registro volumétrico da radiação. Tradicionalmente, a leitura desses dosímetros é realizada por meio de ressonância magnética, técnica de alto custo e de acesso restrito na prática clínica. Este trabalho investiga a viabilidade do uso de técnicas ultrassônicas como método alternativo para a leitura de dosímetros em gel polimérico do tipo MAGIC-F. Foram avaliadas propriedades acústicas e mecânicas em função da concentração do material e da dose absorvida. O sistema foi calibrado com amostras homogêneas de gelatina bovina em diferentes concentrações, a fim de caracterizar a resposta acústica e avaliar a reprodutibilidade das medições. Três configurações experimentais foram testadas: método por contato no modo pulso-eco, método de imersão no mesmo modo e método em modo de transmissão com transdutores de imersão. Em seguida, a metodologia foi aplicada a amostras de gel MAGIC-F irradiadas com doses entre 0 e 40 Gy, cujas respostas foram comparadas qualitativamente por meio de ressonância magnética. Os resultados indicaram a sensibilidade dos parâmetros acústicos às variações de concentração e de dose, com comportamento coerente com o processo de polimerização induzido pela radiação. Observou-se aumento da velocidade do som, do coeficiente de atenuação e dos módulos elásticos com a dose. A comparação entre os arranjos experimentais indicou diferenças no desempenho entre os métodos, sendo os sistemas em imersão associados a maior estabilidade e reprodutibilidade das medições. Em conjunto, os resultados evidenciam o potencial do ultrassom como ferramenta complementar para a leitura de dosímetros em gel polimérico, com base em parâmetros acústicos e mecânicos como indicadores indiretos da dose absorvida. Com o aperfeiçoamento do método e o desenvolvimento de um protocolo prático, a abordagem investigada pode vir a constituir uma alternativa viável à dosimetria tridimensional na radioterapia.

**Palavras-chave:** dosimetria de gel; ultrassom; coeficiente de atenuação; velocidade do som; gel MAGIC-F; radioterapia.

# Abstract

Cancer remains one of the major challenges to global public health, ranking among the leading causes of death and imposing increasing demands on healthcare systems. In this context, radiotherapy plays a central role in cancer treatment, being used for both curative and palliative purposes. The success of this technique depends on the accurate determination of the absorbed dose, which is essential to ensure therapeutic effectiveness and patient safety. The need for three-dimensional verification of dose distribution has driven the development of polymer gel dosimeters, which allow volumetric recording of radiation. Traditionally, these dosimeters are read using magnetic resonance imaging, a high-cost technique with limited accessibility in clinical practice. This work investigates the feasibility of using ultrasonic techniques as an alternative method for reading MAGIC-F polymer gel dosimeters. Acoustic and mechanical properties were evaluated as a function of material concentration and absorbed dose. The system was calibrated using homogeneous bovine gelatin samples at different concentrations in order to characterize the acoustic response and assess measurement reproducibility. Three experimental configurations were tested: contact method in pulse-echo mode, immersion method in the same mode, and transmission mode using immersion transducers. The methodology was then applied to MAGIC-F gel samples irradiated with doses ranging from 0 to 40 Gy, whose responses were qualitatively compared using magnetic resonance imaging. The results indicated the sensitivity of acoustic parameters to variations in concentration and dose, showing behavior consistent with radiation-induced polymerization. An increase in sound velocity, attenuation coefficient, and elastic moduli was observed with increasing dose. The comparison between experimental setups indicated differences in performance among the methods, with immersion systems associated with greater stability and measurement reproducibility. Overall, the results demonstrate the potential of ultrasound as a complementary tool for reading polymer gel dosimeters, based on acoustic and mechanical parameters as indirect indicators of absorbed dose. With further methodological improvements and the development of a practical protocol, the investigated approach may become a viable alternative for three-dimensional dosimetry in radiotherapy.

**Keywords:** gel dosimetry; ultrasound; attenuation coefficient; speed of sound; MAGIC-F gel; radiotherapy.

# Lista de ilustrações

Figura 1.1 – Fórmula estrutural do ácido metacrílico. . . . .	24
Figura 4.1 – Geometria experimental utilizada para a irradiação das amostras em tanque de água, com alinhamento no eixo central do feixe e posicionamento a 10 cm de profundidade. . . . .	39
Figura 4.2 – Geometria experimental utilizada para a irradiação das amostras destinadas às leituras ultrassônicas. O dosímetro de gel polimérico foi posicionado sobre a base de suporte e alinhado ao eixo central do feixe por meio do campo luminoso do acelerador linear, garantindo a cobertura uniforme do volume da amostra e a preservação da superfície utilizada nas medições ultrassônicas. . . . .	40
Figura 4.3 – Perfil de dose lateral obtido no sistema de planejamento para a configuração com dois campos opostos ( $0^\circ$ e $180^\circ$ ). As curvas correspondem às contribuições individuais de cada campo e à distribuição total resultante, evidenciando a formação de uma região central de dose aproximadamente uniforme compatível com o volume irradiado do gel. . . . .	41
Figura 4.4 – Representação esquemática da geometria experimental adotada para a irradiação do gel dosimétrico MAGIC-F em um tanque de água, indicando o posicionamento da amostra, a profundidade de irradiação e as dimensões do tanque. . . . .	43
Figura 4.5 – Perfil de dose obtido no sistema de planejamento para a configuração com quatro campos ortogonais ( $0^\circ$ , $90^\circ$ , $180^\circ$ e $270^\circ$ ), evidenciando a formação de uma região central de dose aproximadamente uniforme no volume irradiado. . . . .	44
Figura 5.1 – Aspecto visual das amostras de gel polimérico acondicionadas em tubos plásticos após o preparo e antes das aquisições por ressonância magnética. . . . .	47
Figura 5.2 – Diagrama esquemático do arranjo experimental utilizado nas medições ultrassônicas. . . . .	49
Figura 5.3 – Arranjo experimental do Método 1, mostrando o sistema de aquisição ultrassônica, o transdutor de contato e o suporte de posicionamento das amostras. . . . .	51
Figura 5.4 – Esquema representativo do procedimento utilizado para determinar a espessura das amostras na mesma posição onde os sinais ultrassônicos foram adquiridos. (a) Medição da posição de referência do transdutor em contato direto com a placa metálica, utilizada para determinar a altura $h_0$ . (b) Medição realizada com a amostra posicionada sobre a placa metálica, obtendo-se a altura $h$ , cuja diferença em relação a $h_0$ corresponde à espessura da amostra. . . . .	52

Figura 5.5 – Nivelador de superfície acoplado ao transdutor, utilizado para auxiliar no alinhamento mecânico e garantir o posicionamento aproximadamente perpendicular do transdutor em relação à superfície da amostra durante as aquisições ultrassônicas. . . . .	53
Figura 5.6 – Fluxograma das etapas de aquisição e de processamento dos sinais ultrassônicos no Método 1. . . . .	54
Figura 5.7 – Arranjo experimental utilizado para medições ultrassônicas no modo pulso-eco com transdutor de imersão. (a) Aquisição do sinal de referência com o porta-amostras vazio. (b) Aquisição do sinal com a amostra posicionada no tanque acústico. . . . .	55
Figura 5.8 – Exemplo de sinais ultrassônicos adquiridos no modo pulso-eco, indicando os tempos característicos utilizados na determinação dos parâmetros acústicos. . . . .	56
Figura 5.9 – Fluxograma do procedimento de aquisição e de processamento dos sinais ultrassônicos no Método 2. . . . .	58
Figura 5.10 – Arranjo experimental do Método 3, mostrando os transdutores de imersão, o porta-amostra e o sistema de aquisição ultrassônica. . . . .	59
Figura 5.11 – Representação esquemática da sequência de aquisição dos sinais no Método 3: (a) aquisição em água; (b) aquisição com o porta-amostra vazio; e (c) aquisição com a amostra. . . . .	60
Figura 5.12 – Exemplos de sinais ultrassônicos adquiridos no Método 3 para as diferentes condições experimentais: água, porta-amostra vazio e amostra. . . . .	61
Figura 5.13 – Fluxograma das etapas de aquisição e de processamento dos sinais ultrassônicos no Método 3. . . . .	62
Figura 6.1 – Imagem de ressonância magnética ponderada em T2 de amostras de gel polimérico irradiadas com diferentes doses, com cortes axiais dos tubos. . . . .	64
Figura 7.1 – Velocidade longitudinal em função da concentração de gelatina bovina obtida pelo método de contato. . . . .	67
Figura 7.2 – Coeficiente de atenuação em função da concentração de gelatina bovina obtido pelo método de contato. . . . .	68
Figura 7.3 – Coeficiente de atenuação em função da dose absorvida, obtido pelo método de contato. . . . .	69
Figura 7.4 – Velocidade longitudinal em função da dose absorvida, obtida pelo método de contato. . . . .	69

Figura 7.5 – Velocidade de propagação longitudinal do ultrassom em função da concentração das amostras de calibração, obtida pelo Método 2. Os pontos representam os valores médios das medições; com barras de erro correspondentes à dispersão experimental observada entre as medições repetidas; e a linha contínua indica o ajuste linear. . . . .	71
Figura 7.6 – Coeficiente de atenuação ultrassônica em função da concentração das amostras de calibração, obtido pelo Método 2. Os pontos representam os valores médios das medições; barras de erro correspondentes à dispersão experimental observada entre as medições repetidas; e a linha contínua indica o ajuste linear. . . . .	71
Figura 7.7 – Velocidade de propagação longitudinal do ultrassom em função da concentração do gel. As barras de erro correspondem ao desvio padrão das medições repetidas . . . . .	75
Figura 7.8 – Coeficiente de atenuação ultrassônica em função da concentração do gel. As barras de erro correspondem ao desvio padrão das medições repetidas. . . . .	76
Figura 7.9 – Módulo de Young estimado em função da concentração do gel. . . . .	77
Figura 7.10 – Velocidade de propagação longitudinal do ultrassom em função da dose absorvida para as amostras irradiadas de gel MAGIC-F. As barras de erro correspondem ao desvio padrão das medições repetidas. . . . .	77
Figura 7.11 – Coeficiente de atenuação ultrassônica em função da dose absorvida do gel MAGIC-F. As barras de erro correspondem ao desvio padrão das medições repetidas. . . . .	78
Figura 7.12 – Módulo de Young estimado em função da dose absorvida para as amostras irradiadas de gel MAGIC-F. . . . .	79

# Lista de tabelas

Tabela 2.1 – Resumo dos métodos experimentais utilizados para caracterização ultrassônica das amostras . . . . .	34
Tabela 3.1 – Componentes utilizados na preparação dos géis para calibração do sistema ultrassônico. . . . .	35
Tabela 3.2 – Componentes utilizados no preparo do gel dosimétrico MAGIC-F. . . .	36
Tabela 4.1 – Parâmetros de irradiação utilizados para as amostras destinadas às leituras ultrassônicas. . . . .	41
Tabela 4.2 – Parâmetros dos campos utilizados na irradiação das amostras do método 3. . . . .	43
Tabela 4.3 – Avaliação da homogeneidade de dose no volume irradiado para as diferentes doses prescritas no método 3. . . . .	44
Tabela 5.1 – Descrição dos parâmetros utilizados nas aquisições de imagens por ressonância magnética. . . . .	47
Tabela 7.1 – Valores medidos da velocidade longitudinal e do coeficiente de atenuação para amostras de gel em diferentes concentrações, obtidos em duas condições de temperatura da água (aproximadamente 21 e 23 °C). As medições foram realizadas em momentos distintos utilizando a mesma configuração experimental. . . . .	73
Tabela 7.2 – Valores de concentração do gel, velocidade longitudinal, relação percentual entre as velocidades transversais e longitudinais e velocidade transversal estimada. . . . .	76
Tabela 7.3 – Relação percentual entre as velocidades transversais e longitudinais e a velocidade transversal estimada para as amostras irradiadas de gel MAGIC-F. . . . .	78

# Sumário

<b>Agradecimento</b> . . . . .	<b>8</b>
<b>Introdução</b> . . . . .	<b>17</b>
<b>Objetivos</b> . . . . .	<b>21</b>
<b>I Referenciais Teóricos</b> . . . . .	<b>22</b>
<b>1 Gel polimérico</b> . . . . .	<b>23</b>
1.1 Fundamentos dos géis poliméricos . . . . .	23
<b>2 Princípios físicos do Ultrassom</b> . . . . .	<b>27</b>
2.1 Propiedades acústicas . . . . .	27
2.1.1 Velocidade acústica . . . . .	27
2.1.1.1 Determinação do tempo de voo por identificação do pulso . . . . .	27
2.1.1.2 Determinação do tempo de voo por correlação cruzada . . . . .	28
2.1.2 Atenuação acústica . . . . .	28
2.2 Estimativa das propriedades mecânicas . . . . .	29
2.3 Análise de incertezas associadas às medições ultrassônicas . . . . .	30
2.3.1 Incerteza da velocidade ultrassônica . . . . .	30
2.3.2 Incerteza do coeficiente de atenuação . . . . .	31
2.3.3 Incerteza das propriedades elásticas . . . . .	32
<b>II Materiais e Métodos</b> . . . . .	<b>33</b>
<b>3 Preparo das amostras</b> . . . . .	<b>34</b>
3.1 Amostras de calibração . . . . .	35
3.2 Amostras irradiadas . . . . .	36
3.2.1 Amostras para avaliação qualitativa por ressonância magnética . . . . .	37
<b>4 Irradiação das amostras com acelerador linear</b> . . . . .	<b>38</b>
4.1 Irradiação das amostras para avaliação qualitativa por ressonância magnética . . . . .	38
4.2 Irradiação das amostras para leituras ultrassônicas nos métodos 1 e 2 (modo pulso-eco) . . . . .	39
4.3 Irradiação das amostras utilizadas no método 3 (modo de transmissão) . . . . .	42
<b>5 Leitura e caracterização das amostras</b> . . . . .	<b>46</b>
5.1 Leitura por Ressonância Magnética . . . . .	46
5.2 Leitura nos sistemas ultrassônicos . . . . .	48
5.2.1 Método 1: Transdutor de contato no modo pulso-eco . . . . .	49
5.2.1.1 Arranjo experimental . . . . .	50
5.2.1.2 Determinação da espessura das amostras . . . . .	50
5.2.1.3 Alinhamento e posicionamento . . . . .	51

5.2.1.4	Aquisição e processamento dos sinais . . . . .	52
5.2.2	Método 2: Transdutor de imersão no modo pulso-eco . . . . .	53
5.2.2.1	Arranjo experimental . . . . .	54
5.2.2.2	Aquisição dos sinais . . . . .	56
5.2.2.3	Processamento dos sinais . . . . .	57
5.2.3	Método 3: Transdutores de imersão no modo transmissão–recepção . . . . .	58
5.2.3.1	Arranjo experimental . . . . .	58
5.2.3.2	Aquisição dos sinais . . . . .	60
5.2.3.3	Processamento dos sinais . . . . .	61
<b>III Resultados e Discussões</b>		<b>63</b>
<b>6</b>	<b>Resultados por Ressonância Magnética . . . . .</b>	<b>64</b>
<b>7</b>	<b>Resultados das avaliações nos sistemas ultrassônicos . . . . .</b>	<b>66</b>
7.1	Método 1: transdutor de contato no modo pulso-eco . . . . .	66
7.1.1	Amostras de calibração . . . . .	66
7.1.2	Amostras irradiadas . . . . .	68
7.2	Método 2: Transdutor de imersão no modo pulso-eco . . . . .	70
7.2.1	Velocidade de propagação . . . . .	70
7.2.2	Coefficiente de atenuação . . . . .	71
7.2.3	Medições em amostras irradiadas . . . . .	73
7.3	Método 3: Transdutores de imersão no modo de transmissão . . . . .	74
7.3.1	Amostras de calibração . . . . .	74
7.3.2	Amostras irradiadas . . . . .	77
<b>IV Conclusão</b>		<b>81</b>
<b>8</b>	<b>Conclusões . . . . .</b>	<b>82</b>
<b>Referências . . . . .</b>		<b>84</b>

# Introdução

O câncer permanece um dos principais problemas de saúde pública em escala mundial, figurando entre as maiores causas de mortalidade e representando um desafio significativo para os sistemas de saúde contemporâneos. Além do impacto direto na sobrevida dos pacientes, a doença impõe consequências sociais, econômicas e estruturais relevantes, o que tem impulsionado o desenvolvimento contínuo de métodos diagnósticos e terapêuticos cada vez mais eficazes e seguros. Estimativas recentes indicam que o câncer está entre as três principais causas de morte em 177 de 183 países, evidenciando sua elevada relevância epidemiológica em nível global (BRAY et al., 2024).

Entre as diferentes modalidades terapêuticas empregadas na oncologia, a radioterapia ocupa posição de destaque, sendo amplamente utilizada tanto com finalidade curativa quanto paliativa, isoladamente ou em associação com cirurgia e quimioterapia. Esse tratamento baseia-se na aplicação de radiação ionizante para depositar uma dose cuidadosamente planejada no volume tumoral, visando maximizar o controle da doença e, ao mesmo tempo, minimizar os danos aos tecidos saudáveis adjacentes. A aplicação adequada da radioterapia é benéfica, desde que sejam respeitados os limites de dose absorvida em cada tecido, o que torna indispensável a quantificação precisa da radiação por meio de grandezas dosimétricas.

A dose absorvida representa a quantidade de energia da radiação ionizante efetivamente depositada por unidade de massa em determinado material ou tecido, estando diretamente relacionada aos efeitos biológicos produzidos pela radiação (KHAN; GIBBONS, 2014). Por essa razão, essa grandeza constitui o principal parâmetro de interesse em estudos voltados à verificação e ao controle de qualidade em radioterapia, incluindo o presente trabalho.

Ao longo das últimas décadas, as técnicas de tratamento radioterápico passaram por avanços significativos, impulsionados principalmente pelo desenvolvimento de aceleradores lineares e de sistemas computacionais de planejamento cada vez mais sofisticados (PODGORSK, 2005; KHAN; GIBBONS, 2014). Enquanto nas primeiras aplicações clínicas predominavam fontes de cobalto-60 e métodos de cálculo mais simplificados, técnicas modernas, como a radioterapia conformacional tridimensional e a radioterapia de intensidade modulada (IMRT – *intensity modulated radiation therapy*), passaram a permitir a conformação precisa da distribuição de dose ao volume alvo, resultando em distribuições volumétricas progressivamente mais complexas.

Como consequência dessa evolução, surgiu a necessidade de métodos capazes de verificar distribuições tridimensionais de dose com elevada resolução espacial (WAGTER, 2004). Na prática clínica, a dosimetria é tradicionalmente realizada por meio de dispositivos como câmaras de ionização, dosímetros termoluminescentes, diodos semicondutores e filmes

dosimétricos radiocrômicos. Embora esses métodos sejam amplamente consolidados, em geral fornecem informações pontuais ou bidimensionais, o que limita sua aplicação na avaliação de distribuições volumétricas complexas.

Uma alternativa que tem recebido atenção crescente é o uso de dosímetros em gel polimérico, capazes de registrar a distribuição de dose de forma volumétrica, com elevada resolução espacial (DOYAN et al., 2025; SALMAN et al., 2025). O princípio de funcionamento desses dosímetros baseia-se na radiólise da água induzida pela radiação ionizante, processo que gera radicais livres capazes de iniciar reações em cadeia de polimerização dos monômeros dispersos em uma matriz gelatinosa. As macromoléculas formadas permanecem espacialmente imobilizadas, produzindo um registro físico tridimensional da distribuição da dose absorvida, acessível por meio de técnicas de leitura sensíveis às alterações físico-químicas do material (HAMANN; PEIXOTO, 2021).

A precisão das medições em dosimetria com géis depende não apenas da sensibilidade do material à dose absorvida, mas também do método de leitura empregado, uma vez que diferentes técnicas apresentam sensibilidades distintas às alterações físico-químicas induzidas pela polimerização, bem como resoluções espaciais e níveis de incerteza distintos associados à aquisição e ao processamento dos dados. Adicionalmente, características intrínsecas do detector, como composição, estabilidade temporal, homogeneidade e condições de preparo, podem influenciar diretamente a reprodutibilidade e a confiabilidade das medições (VANDECASTEELE; DEENE, 2012; DEENE; VANDECASTEELE, 2013; DEENE; JIRASEK, 2015).

Esses fatores tornam a escolha do método de leitura um aspecto determinante na caracterização de dosímetros em gel, especialmente quando se busca avaliar propriedades físicas específicas do material ou correlacioná-las à dose absorvida.

Entre as técnicas de leitura disponíveis, a ressonância magnética consolidou-se como o método de referência, uma vez que a polimerização induzida pela radiação provoca alterações nas taxas de relaxamento transversal, particularmente no parâmetro R2, que apresenta forte correlação com a dose absorvida (CAVEDINI et al., 2022a). Apesar de sua elevada sensibilidade e confiabilidade, a utilização da ressonância magnética envolve custos elevados, maior complexidade operacional e disponibilidade limitada em muitos serviços de radioterapia, fatores que motivam a investigação de métodos alternativos ou complementares.

A polimerização de monômeros em géis resulta no aumento do comprimento médio das cadeias poliméricas e na formação de ligações cruzadas (*crosslinks*), modificando a estrutura molecular do material e suas propriedades mecânicas. Essas alterações reduzem a capacidade de deformação do gel e aumentam sua rigidez, a qual está relacionada ao grau de polimerização e à densidade de ligações cruzadas (ODIAN, 2004). Nos dosímetros poliméricos, a aplicação de radiação ionizante induz esse processo, resultando em modifica-

ções progressivas nas propriedades físicas do gel em função da dose absorvida (PAVONI et al., 2010; PAVONI; BAFFA, 2012; DHAKAL; YOSOFVAND; MOUSSA, 2021).

Essas alterações estruturais não se limitam às propriedades químicas, mas também produzem mudanças mensuráveis nas propriedades mecânicas do material, o que permite sua investigação por meio de técnicas sensíveis a variações na rigidez. Entre essas técnicas, a elastografia tem se consolidado como uma ferramenta eficaz para a avaliação de materiais moles, sendo amplamente utilizada em aplicações clínicas ao longo das últimas duas décadas. Trata-se de uma modalidade de imagem capaz de estimar propriedades mecânicas e acústicas em tempo real, fornecendo valores relevantes em diferentes contextos diagnósticos (JúNIOR; PEREIRA; LIMA, 2019). Um dos primeiros métodos elastográficos descritos na literatura baseia-se na deformação do objeto em estudo por meio de leves compressões aplicadas pelo próprio transdutor, princípio introduzido por Ophir et al. (1991) e ainda presente em técnicas quase-estáticas atualmente utilizadas.

Além das propriedades mecânicas, o processo de polimerização induzido pela radiação também altera as propriedades acústicas do gel, como a velocidade de propagação das ondas ultrassônicas e o coeficiente de atenuação. Essas propriedades podem ser avaliadas experimentalmente por meio da análise de pulsos ultrassônicos transmitidos por um transdutor e propagados através do material, os quais são correlacionados à dose absorvida, indicando o potencial do ultrassom como ferramenta complementar para a leitura de dosímetros poliméricos (SALMAN et al., 2025).

O dosímetro baseado em gel MAGIC-F tem se destacado por apresentar resultados consistentes na dosimetria tridimensional (FERNANDES et al., 2009a; DHAKAL; YOSOFVAND; MOUSSA, 2021), com aplicações em diferentes modalidades de radioterapia, incluindo braquiterapia, radiocirurgia e tomoterapia (PAVONI et al., 2010; PAVONI; BAFFA, 2012). Apesar disso, a maior parte dos estudos disponíveis concentra-se na leitura dos dosímetros MAGIC-F por meio de ressonância magnética, enquanto investigações que avaliem de forma sistemática a relação entre parâmetros acústicos, propriedades mecânicas estimadas e dose absorvida ainda são relativamente limitadas na literatura, especialmente em intervalos de dose compatíveis com aplicações em radioterapia. Além disso, estudos que comparem diferentes arranjos experimentais ultrassônicos sob condições controladas ainda são pouco explorados na literatura.

Diante desse cenário, investigar métodos alternativos de leitura baseados em ultrassom mostra-se relevante, particularmente quando se busca desenvolver técnicas mais acessíveis, portáteis e potencialmente aplicáveis a diferentes contextos experimentais e clínicos.

Assim, o presente trabalho tem como objetivo investigar a aplicabilidade de sistemas ultrassônicos na análise de dosímetros em gel polimérico MAGIC-F, avaliando a sensibilidade de parâmetros acústicos, como a velocidade do som e o coeficiente de

atenuação, bem como de propriedades mecânicas estimadas, em função da concentração do material e da dose absorvida. Adicionalmente, busca-se comparar diferentes configurações experimentais de aquisição de dados, com o propósito de analisar a reprodutibilidade das medições e identificar os arranjos experimentais mais estáveis e adequados para a caracterização do material.

Para atingir esses objetivos, são avaliadas diferentes configurações experimentais ultrassônicas aplicadas à caracterização de dosímetros em gel MAGIC-F irradiados em intervalos de dose compatíveis com aplicações em radioterapia. A análise considera a sensibilidade dos parâmetros acústicos e mecânicos estimados, bem como a reprodutibilidade das medições, buscando identificar arranjos experimentais mais estáveis e adequados.

# Objetivos

## Objetivo Geral

Investigar a aplicabilidade de técnicas ultrassônicas na caracterização de dosímetros em gel polimérico do tipo MAGIC-F, avaliando a sensibilidade de parâmetros acústicos e de propriedades mecânicas estimadas em função da dose absorvida.

## Objetivos Específicos

- Implementar e validar um algoritmo computacional para a estimativa de parâmetros acústicos a partir dos sinais ultrassônicos adquiridos;
- Avaliar o desempenho de um arranjo experimental ultrassônico na estimativa de propriedades mecânicas do material a partir dos parâmetros acústicos obtidos experimentalmente;
- Irradiar amostras de gel polimérico dosimétrico MAGIC-F em diferentes níveis de dose absorvida, em condições controladas;
- Analisar a correlação entre alterações nas propriedades acústicas e mecânicas, particularmente a elasticidade, e a dose absorvida em géis dosimétricos, avaliando o potencial das técnicas ultrassônicas como método complementar de leitura.

Parte I

Referenciais Teóricos

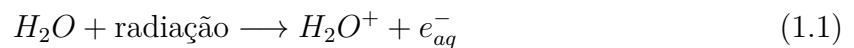
# 1 Gel polimérico

## 1.1 Fundamentos dos géis poliméricos

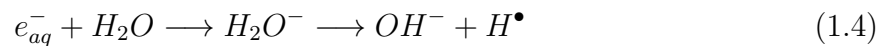
Um dosímetro em gel polimérico é composto por cerca de 90% de água, sendo o restante formado por gelatina e reagentes químicos responsáveis pela resposta à radiação. Forma-se, assim, uma matriz gelatinosa na qual os monômeros estão dispersos. Quando a radiação interage com o gel, o soluto não é afetado diretamente, mas indiretamente, devido à ocorrência da radiólise da água (DEENE, 2004).

Esse processo libera radicais altamente reativos que promovem a polimerização dos monômeros suspensos na gelatina, de forma proporcional à dose absorvida. Como consequência, longas cadeias poliméricas são formadas e permanecem espacialmente retidas na matriz gelatinosa nos locais de interação da radiação, permitindo que a distribuição de dose seja posteriormente medida (DEENE et al., 2002).

A radiação ionizante age sobre as moléculas de água (1.1), provocando alterações que podem levá-las a um estado excitado ou à formação de espécies reativas como  $H_3O^+$ ,  $H_2O^+$  e  $H_2O^-$  (1.2 a 1.4). Essas espécies, por serem instáveis, acabam gerando radicais livres ( $R$ ) do tipo  $H^\bullet$  e  $OH^\bullet$  (BUSHONG, 1994).



em que  $e_{aq}^-$  representa o elétron livre estabilizado na água (elétron aquoso).



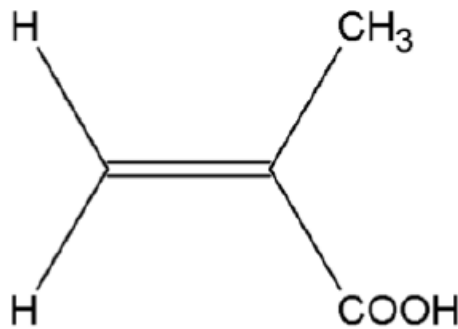
Esses produtos irão interagir com os monômeros presentes na matriz gelatinosa, principalmente os elétrons aquosos, por meio da formação de um radical-ânion, que, futuramente, pode ser neutralizado por intermédio de um próton (BALDOCK et al., 2010). A probabilidade dessas partículas reativas, produtos da radiólise, se encontrarem por meio do movimento Browniano e reagirem umas com as outras aumenta com o passar do tempo, fazendo com que o raio desses radicais aumente (BALDOCK et al., 2010). As Equações 1.1 a 1.4 podem ser resumidas na Equação 1.5.



em que  $K_d$  trata-se da taxa de dissociação da molécula da água e esse valor está relacionado com a dose recebida.

No gel utilizado neste trabalho, o MAGIC-f, o monômero é o ácido metacrílico, e sua estrutura química é apresentada na Figura 1.1.

Figura 1.1 – Fórmula estrutural do ácido metacrílico.



Fonte: (SILVA, 2018).

Os radicais livres irão se ligar a um elétron da ligação dupla entre carbonos do monômero, iniciando o processo de polimerização (MCJURY et al., 2000). Quando um radical se liga a um monômero, forma-se um monômero-radical.



em que  $R^\bullet$  é o radical,  $M_n$  é o monômero,  $RM_n^\bullet$  é o monômero-radical e  $K_1(n)$  é a constante de reação de iniciação, em que  $n$  tem valor 1 na ausência de polímeros na amostra. O valor dessa constante para os elétrons aquosos ( $e_{aq}^-$ ) é  $1,9 \times 10^{10} \text{ mol}^{-1}\text{s}^{-1}$  quando se utiliza o ácido metacrílico como monômero (BALDOCK et al., 2010). Existindo polímeros na amostra ( $n > 1$ ), forma-se um polímero-radical.

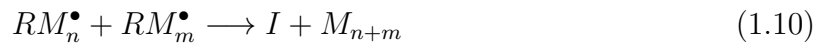
Com o passar do tempo após a irradiação, o raio de alcance das cadeias poliméricas aumenta, devido à interação dos polímeros com os monômeros presentes na matriz gelatinosa, de acordo com a Equação 1.7.



em que  $K_p$  é a taxa de crescimento do polímero.

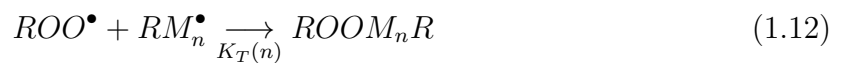
A terminação da polimerização pode ocorrer pela combinação de dois radicais, dando origem a moléculas estáveis ( $I$ ), no processo denominado terminação mútua. Dentre

os possíveis encontros de radicais, temos o encontro de dois radicais simples (1.8), o encontro entre um radical monomérico/polimérico e um radical simples, gerando uma molécula estável e um monômero ( $M_n$ ) (1.9); ou o encontro de dois radicais monoméricos/poliméricos, gerando uma molécula estável e um monômero/polímero estável ( $M_{n+m}$ ) (1.10).



Existem outros mecanismos de término da cadeia polimérica, como o desproporcionamento, em que um hidrogênio ligado a um átomo de carbono do primeiro radical se transfere para um segundo radical. Há também a transferência de um grupo radical para outra molécula, podendo iniciar o crescimento de outra cadeia polimérica ou reagir com a gelatina (BALDOCK et al., 2010).

Na presença de oxigênio, um novo mecanismo de terminação pode ocorrer; nele, os radicais se ligam ao oxigênio, formando radicais peróxidos, que, por sua vez, se ligam rapidamente a outros radicais, interrompendo o crescimento da cadeia polimérica (1.11 a 1.14).



A informação da dose em um gel irradiado pode ser obtida por meio da utilização de diferentes técnicas com base nas alterações físicas que ocorrem no dosímetro após a irradiação. Entre essas técnicas destacam-se a tomografia computadorizada óptica (OLDHAM et al., 2001; MARYANSKI; ZASTAVKER; GORE, 1996), a tomografia computadorizada por raios-X (JAVAHERI et al., 2020; HILTS et al., 2000; TRAPP et al., 2001), a ressonância magnética (AZADEH et al., 2022; DEENE, 2023; OLDHAM et al., 2001; FARAJOLLAHI et al., 2014; DEENE et al., 2006) e o ultrassom (MATHER et al., 2002; MASOUMI et

al., 2016; ATKINS et al., 2010). Neste trabalho serão descritas as técnicas que utilizam a relaxometria por ressonância magnética e os princípios físicos do ultrassom.

## 2 Princípios físicos do Ultrassom

O termo ultrassom descreve ondas mecânicas com frequências acima do limite audível humano, bem como sua propagação por meios materiais. Na área médica, o ultrassom é amplamente utilizado como modalidade de diagnóstico por imagem, explorando a interação das ondas acústicas com as propriedades físicas dos tecidos para produzir imagens estáticas ou dinâmicas (BUSHBERG; BOONE, 2011).

Além das aplicações em imageamento, técnicas ultrassônicas também são empregadas na caracterização acústica e mecânica de materiais, incluindo polímeros e simuladores de tecido. Nesses estudos, parâmetros como a velocidade de propagação e o coeficiente de atenuação são de particular interesse, pois estão diretamente relacionados às propriedades estruturais e viscoelásticas do meio (MEZIRI et al., 2005). A partir dessas grandezas, é possível estimar os módulos elásticos efetivos do material por meio de modelos descritos na literatura (ODONNELL; JAYNES; MILLER, 1981).

Neste capítulo, são apresentados os fundamentos físicos associados à propagação de ondas ultrassônicas, com ênfase na velocidade acústica, no coeficiente de atenuação e em sua relação com as propriedades mecânicas de materiais viscoelásticos.

### 2.1 Propiedades acústicas

#### 2.1.1 Velocidade acústica

A velocidade de propagação de uma onda ultrassônica em um meio está diretamente relacionada às propriedades mecânicas e à densidade do material. Em meios homogêneos e não dispersivos, como a água e hidrogéis na faixa de frequência utilizada neste estudo, a velocidade pode ser determinada experimentalmente pelo método do tempo de voo (ELMINA et al., 2022; COSTA, 2022).

##### 2.1.1.1 Determinação do tempo de voo por identificação do pulso

Nos experimentos realizados em meio aquoso, a velocidade do som na água foi estimada em função da temperatura média do meio, medida durante os ensaios, utilizando a expressão empírica proposta por Lubbers e Flerchinger (LUBBERS; FLETCHER, 1998):

$$\begin{aligned}
 c_{\text{água}}(T) = & 1402.385 + 5.038813T - 5.799136 \times 10^{-2}T^2 \\
 & + 3.287156 \times 10^{-4}T^3 - 1.398845 \times 10^{-6}T^4 \\
 & + 2.787860 \times 10^{-9}T^5
 \end{aligned} \tag{2.1}$$

A partir do sinal adquirido no meio de referência, o tempo de voo foi determinado pela identificação do instante correspondente à máxima amplitude do pulso recebido.

Conhecida a velocidade do som na água, a distância efetiva de propagação pôde ser estimada por:

$$l = c_{\text{água}} \cdot t \quad (2.2)$$

Nos arranjos experimentais com e sem amostra, a velocidade acústica foi determinada pelo método do tempo de trânsito:

$$c_{\text{amostra}} = \frac{1}{\left(\frac{1}{c_{\text{ref}}} - \frac{\Delta t}{d}\right)} \quad (2.3)$$

em que  $c_{\text{ref}}$  é a velocidade no meio de referência,  $\Delta t$  é a diferença temporal entre aquisições e  $d$  é a espessura da amostra.

Em arranjos pulso-eco com transdutor em contato com uma face da amostra, a velocidade foi determinada a partir dos dois primeiros sinais de eco consecutivos, dispensando a utilização de um sinal de referência:

$$c = \frac{2d}{\Delta t} \quad (2.4)$$

#### 2.1.1.2 Determinação do tempo de voo por correlação cruzada

A correlação cruzada entre sinais foi empregada para estimar o atraso temporal de forma mais robusta, reduzindo a sensibilidade a ruído e variações de forma do pulso (COSTA, 2022; PETERS; PETIT, 2003).

$$R_{xy}(\tau) = \int x(t) y(t + \tau) dt \quad (2.5)$$

O tempo de voo foi determinado pelo valor de  $\tau$  correspondente ao máximo da função de correlação.

#### 2.1.2 Atenuação acústica

Quando uma onda ultrassônica se propaga em um material, sua amplitude diminui devido à absorção e ao espalhamento. A absorção corresponde à conversão da energia mecânica em energia térmica, enquanto o espalhamento está associado à redistribuição da energia causada por descontinuidades internas (DOYAN et al., 2025).

A atenuação pode ser descrita por:

$$u(z, t) = u_0 e^{-\mu z} e^{j(\omega t - kz)} \quad (2.6)$$

$$\alpha_{dB} = 8.686 \mu \quad (2.7)$$

Considerando que, no modo pulso-eco, a onda percorre um caminho de  $2d$ , o coeficiente de atenuação pode ser obtido por:

$$\alpha = \frac{1}{2d} 20 \log \left( \frac{A_1}{A_2} \right) \quad (2.8)$$

Diversos estudos empregaram formulações semelhantes para materiais simuladores de tecido (de Carvalho et al., 2016; De Matheo et al., 2018; VIEIRA et al., 2013). Modelos mais completos incluem coeficientes de reflexão nas interfaces (ZELL et al., 2007).

## 2.2 Estimativa das propriedades mecânicas

Em um meio isotrópico de densidade  $\rho$ , o módulo de cisalhamento é dado por (LIU et al., 2021):

$$G = \rho c_T^2 \quad (2.9)$$

O módulo longitudinal:

$$L = \rho c_L^2 \quad (2.10)$$

O módulo volumétrico:

$$K = L - \frac{4}{3}G \quad (2.11)$$

O módulo de Young:

$$E = \frac{9GK}{G + 3K} \quad (2.12)$$

Coefficiente de Poisson:

$$\nu = \frac{3K - 2G}{2(3K + G)} \quad (2.13)$$

A densidade foi assumida constante com base em valores reportados para géis à base de gelatina, cuja variação é inferior a 2% (MASOUMI et al., 2016; VIEIRA et al., 2019; DEENE, 2022; BADAWE et al., 2024). Essa aproximação introduz um pequeno erro sistemático.

A velocidade transversal foi estimada a partir da velocidade longitudinal:

$$c_T = (c_T/c_L)_{emp} \cdot c_L \quad (2.14)$$

Os valores adotados foram baseados em literatura independente e não ajustados aos dados experimentais.

Dessa forma, os valores absolutos devem ser interpretados como estimativas condicionadas ao modelo adotado, enquanto as tendências relativas são consideradas mais robustas para fins comparativos.

## 2.3 Análise de incertezas associadas às medições ultrassônicas

A avaliação das incertezas associadas às medições ultrassônicas foi realizada conforme as recomendações do *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement* (GUM). Nesta abordagem, o termo “incerteza” refere-se ao parâmetro associado ao resultado de uma medição que caracteriza a dispersão dos valores que podem ser razoavelmente atribuídos ao mensurando, não sendo interpretado como erro em relação a um valor verdadeiro desconhecido.

As contribuições de incerteza foram classificadas em do tipo A e do tipo B. As incertezas do tipo A foram estimadas a partir do desvio padrão da média das medições repetidas, refletindo a repetibilidade do método. O desvio padrão da média foi obtido pela divisão do desvio padrão experimental pelo número de medições:

$$u_A = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (2.15)$$

em que  $s$  é o desvio padrão das medições e  $n$  é o número de repetições.

As incertezas do tipo B foram associadas às resoluções e especificações dos instrumentos utilizados, incluindo o paquímetro digital, o osciloscópio e o sistema de monitoramento de temperatura, conforme informações fornecidas pelos fabricantes.

A incerteza padrão combinada foi obtida por meio da propagação das contribuições individuais, de acordo com o GUM, sendo os resultados reportados como incertezas padrão (fator de abrangência  $k = 1$ ).

### 2.3.1 Incerteza da velocidade ultrassônica

A velocidade ultrassônica longitudinal ( $c_L$ ) foi determinada a partir da espessura da amostra ( $d$ ) e da diferença de tempo de trânsito do pulso ultrassônico ( $\Delta t$ ). Considerando a relação funcional utilizada no modo pulso-eco,

$$c_L = \frac{2d}{\Delta t} \quad (2.16)$$

a incerteza padrão combinada foi obtida por propagação das incertezas dessas variáveis:

$$\frac{u_{c_L}}{c_L} = \sqrt{\left(\frac{u_d}{d}\right)^2 + \left(\frac{u_{\Delta t}}{\Delta t}\right)^2} \quad (2.17)$$

em que  $u_d$  representa a incerteza associada à espessura da amostra e  $u_{\Delta t}$  a incerteza associada à determinação do tempo de trânsito.

A incerteza associada ao tempo de trânsito inclui a contribuição estatística decorrente da repetibilidade da identificação do pulso ultrassônico (tipo A) e a contribuição associada à resolução temporal do sistema de aquisição (tipo B).

Quando a espessura da amostra foi estimada a partir da distância de propagação em meio aquoso, a incerteza da velocidade passou a depender também da temperatura, devido à dependência da velocidade do som na água com essa grandeza. Nesses casos, a incerteza associada à medição da temperatura foi incluída na propagação da incerteza.

### 2.3.2 Incerteza do coeficiente de atenuação

O coeficiente de atenuação ( $\alpha$ ), expresso em dB/cm, foi estimado a partir da razão logarítmica entre as amplitudes máximas dos sinais transmitidos pela amostra ( $A_s$ ) e pela configuração de referência ( $A_p$ ), normalizada pela espessura da amostra.

A incerteza padrão combinada foi obtida por propagação das incertezas das amplitudes e da espessura:

$$u_\alpha = \sqrt{\left(\frac{20}{d \ln(10)}\right)^2 \left[ \left(\frac{u_{A_p}}{A_p}\right)^2 + \left(\frac{u_{A_s}}{A_s}\right)^2 \right] + \left(\frac{\alpha u_d}{d}\right)^2} \quad (2.18)$$

em que  $u_{A_p}$  e  $u_{A_s}$  correspondem às incertezas associadas às amplitudes dos sinais de referência e da amostra, respectivamente.

No modo pulso-eco, o percurso efetivo da onda no material é  $2d$ . Essa consideração foi incorporada na expressão do coeficiente de atenuação utilizada, mantendo consistência na propagação da incerteza.

O fator de transmissão acústica foi considerado constante, uma vez que a geometria do sistema, as interfaces acústicas e as condições experimentais foram mantidas invariáveis ao longo das medições. Dessa forma, sua contribuição não foi incluída na propagação da incerteza.

### 2.3.3 Incerteza das propriedades elásticas

Os módulos elásticos foram estimados a partir das velocidades ultrassônicas e da densidade do material, assumindo comportamento homogêneo e isotrópico. A incerteza padrão combinada foi obtida por meio da propagação das incertezas associadas às velocidades ultrassônicas.

A densidade do material e a razão empírica utilizada para estimar a velocidade transversal foram obtidas da literatura. Como essas grandezas não foram determinadas experimentalmente neste estudo, não foi possível estimar formalmente suas contribuições de incerteza. Dessa forma, os valores de incerteza reportados para os módulos elásticos consideram apenas as contribuições associadas às velocidades ultrassônicas.

Consequentemente, as incertezas dos módulos elásticos devem ser interpretadas como estimativas parciais, adequadas para análise comparativa, mas não como incertezas completas no sentido metrológico formal.

Os procedimentos descritos nesta seção permitiram estimar de forma consistente as incertezas associadas aos parâmetros acústicos determinados neste estudo.

## Parte II

### Materiais e Métodos

Antes da descrição detalhada dos materiais e métodos utilizados, apresenta-se uma visão geral dos métodos experimentais utilizados neste trabalho. Foram investigados três métodos ultrassônicos distintos para a determinação da velocidade de propagação e do coeficiente de atenuação do gel polimérico, além da aquisição complementar de imagens por ressonância magnética. Os métodos diferem principalmente quanto à configuração geométrica dos transdutores, ao meio de propagação acústica e à forma de determinação dos parâmetros físicos. O Método 1 utilizou transdutor de contato no modo pulso-eco, com medição mecânica direta da espessura. O Método 2 empregou transdutor de imersão também no modo pulso-eco, permitindo a estimativa acústica da espessura por meio dos atrasos temporais. Já o Método 3 utilizou dois transdutores de imersão no modo transmissão–recepção, possibilitando a determinação direta do tempo de trânsito da onda ultrassônica através da amostra. A Tabela 2.1 resume as principais características dos métodos investigados.

Tabela 2.1 – Resumo dos métodos experimentais utilizados para caracterização ultrassônica das amostras

Característica	Método 1	Método 2	Método 3
Configuração	Contato	Imersão	Imersão
Modo de operação	Pulso-eco	Pulso-eco	Transmissão–recepção
Meio de propagação	Contato direto	Água	Água
Determinação da espessura	Mecânica	Acústica	Mecânica
Processamento temporal	Pico máximo	Correlação cruzada	Tempo de trânsito
Estimativa da atenuação	Amplitude dos ecos	FFT	Amplitude transmitida
Objetivo principal	Avaliação inicial	Maior robustez temporal	Maior estabilidade geométrica

Fonte: A própria autora, 2026.

A aquisição por ressonância magnética foi utilizada como técnica complementar para avaliação qualitativa da homogeneidade do gel e comparação da resposta do material em função da dose absorvida, sem interferir diretamente na determinação dos parâmetros acústicos.

Nesta parte são descritos os materiais e os procedimentos experimentais utilizados neste trabalho. Inicialmente, apresenta-se o preparo das amostras de gel polimérico e de calibração. Em seguida, são descritos os sistemas de irradiação empregados e os métodos de leitura e caracterização, incluindo técnicas de Ressonância Magnética e medições ultrassônicas, utilizados na determinação de parâmetros físicos e acústicos.

### 3 Preparo das amostras

Os materiais empregados neste estudo foram utilizados tanto na etapa de calibração do sistema ultrassônico quanto na confecção das amostras de gel dosimétrico MAGIC-F, mantendo-se condições geométricas e de preparo reproduzíveis ao longo de todas as etapas

experimentais. As amostras foram preparadas em temperatura ambiente do laboratório no momento da preparação.

### 3.1 Amostras de calibração

Para a calibração do sistema ultrassônico, foram preparados objetos simuladores constituídos por água e gelatina de origem bovina Bloom 250 (4WellBrasil™, Itu, SP, Brasil), nas concentrações de 5, 8, 10, 15 e 20% (m/m), referentes ao volume total da amostra, conforme apresentado na Tabela 3.1.

O preparo consistiu na adição gradual da gelatina em pó à água, sob aquecimento controlado e agitação contínua, até aproximadamente 45°C, garantindo a completa dissolução e homogeneização da mistura. Durante essa etapa, buscou-se evitar a incorporação de bolhas de ar e preservar a uniformidade estrutural do material.

Tabela 3.1 – Componentes utilizados na preparação dos géis para calibração do sistema ultrassônico.

Amostra	Gelatina (%)	Água (%)
1	5	95
2	8	92
3	10	90
4	15	85
5	20	80

Fonte: A própria autora, 2026.

Após o resfriamento até aproximadamente 35°C, as soluções foram vertidas em recipientes acrílicos idênticos, com dimensões internas de  $6 \times 6 \times 5$  cm<sup>3</sup> e espessura de parede de  $1,00 \pm 0,05$  mm, medidas com paquímetro analógico. Esses recipientes foram utilizados em todas as etapas experimentais subsequentes.

As amostras foram mantidas refrigeradas por aproximadamente 24 horas após o preparo, permitindo a completa gelificação. A temperatura do refrigerador não foi monitorada nessa etapa.

Antes das medições, as amostras foram mantidas por aproximadamente duas horas no ambiente experimental, sendo cerca de 1h30 em bancada e os 30 minutos finais imersas no tanque de água onde as medições foram realizadas. Esse procedimento teve como objetivo promover o equilíbrio térmico entre a amostra e o meio de propagação, minimizando variações nos parâmetros acústicos associadas a gradientes de temperatura.

A temperatura ambiente foi medida no momento de cada experimento, porém não foi mantida controlada entre diferentes dias de aquisição. A água do tanque foi renovada conforme necessidade, sendo garantido um intervalo mínimo de 24 horas entre a troca e a realização das medições.

## 3.2 Amostras irradiadas

O gel polimérico MAGIC-F utilizado neste estudo é constituído por monômeros derivados do ácido metacrílico, ácido ascórbico e sulfato de cobre hidratado, dispersos em uma matriz gelatinosa. Essa formulação favorece a formação de um complexo ascorbato-cobre, responsável pela remoção do oxigênio dissolvido, condição essencial para a adequada resposta dosimétrica do material (FERNANDES et al., 2009b).

A composição do gel empregado é apresentada na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Componentes utilizados no preparo do gel dosimétrico MAGIC-F.

Componente	Concentração em massa (%)
Água deionizada	82,785
Gelatina (Bloom 250)	8,081
Ácido ascórbico	0,035
Sulfato de cobre	0,002
Ácido metacrílico (99,5%)	5,874
Formaldeído	3,223

Fonte: Adaptado de (FERNANDES et al., 2009b).

Inicialmente, a gelatina foi adicionada à água deionizada à temperatura ambiente em um único recipiente, sendo a mistura aquecida até aproximadamente 50°C sob agitação magnética contínua, até completa homogeneização. Em seguida, o aquecimento foi interrompido, mantendo-se a agitação até a solução atingir aproximadamente 35°C.

Nessa temperatura, foram adicionados o ácido ascórbico e o sulfato de cobre. Após um intervalo de aproximadamente cinco minutos, foram adicionados o ácido metacrílico e o formaldeído, mantendo-se a agitação até a completa homogeneização.

Após o preparo, o gel foi vertido nos mesmos recipientes acrílicos utilizados nas amostras de calibração. Após a solidificação, as amostras foram mantidas em recipientes hermeticamente fechados durante todo o período de condicionamento, bem como nas etapas de irradiação e de medições ultrassônicas.

Embora o gel MAGIC-F apresente resposta dosimétrica adequada quando produzido em atmosfera normal, estudos indicam que a difusão de oxigênio para o interior do material após o preparo pode afetar sua sensibilidade e estabilidade ao longo do tempo (FONG et al., 2001). Dessa forma, o acondicionamento em recipientes hermeticamente vedados teve como objetivo minimizar a incorporação de oxigênio, preservando as propriedades físicas, acústicas e dosimétricas do gel.

Durante a preparação das amostras, uma fina película de filme plástico foi posicionada sobre a superfície do gel antes do fechamento dos recipientes, evitando a aderência do material à tampa e a deformação da superfície após a abertura.

Para as amostras destinadas às medições ultrassônicas no método 1, foi inserida uma fina lâmina metálica junto ao fundo do recipiente, com o objetivo de melhorar a definição do eco de reflexão correspondente ao limite posterior do material. Esse procedimento permitiu reduzir as incertezas na determinação do tempo de voo, sem alterar as propriedades do gel. As amostras utilizadas nos demais métodos não requereram essa adaptação.

### 3.2.1 Amostras para avaliação qualitativa por ressonância magnética

Um conjunto adicional de amostras irradiadas foi preparado com o objetivo de realizar uma avaliação qualitativa por imagem de ressonância magnética, visando verificar a homogeneidade do gel, a ausência de bolhas e a adequação do protocolo de preparo antes da continuidade dos experimentos principais.

As amostras foram acondicionadas em tubos plásticos hermeticamente fechados, garantindo vedação adequada e reduzindo a difusão de oxigênio. As imagens foram adquiridas aproximadamente 17 horas após a irradiação, utilizando sequência multi spin-eco, com parâmetros mantidos constantes entre as amostras, permitindo a comparação qualitativa da intensidade de sinal entre diferentes doses.

Essa etapa teve caráter exploratório e não foi utilizada para análise quantitativa dosimétrica, mas forneceu suporte importante para a validação do processo experimental.

## 4 Irradiação das amostras com acelerador linear

As amostras de gel polimérico utilizadas neste trabalho foram irradiadas com feixes de fótons com energia de 6 MV provenientes de aceleradores lineares clínicos, em diferentes configurações experimentais, definidas conforme os objetivos específicos de cada etapa do estudo. As geometrias de irradiação foram ajustadas para atender aos requisitos específicos de cada método de leitura, incluindo avaliações qualitativas por ressonância magnética e medições ultrassônicas realizadas por diferentes técnicas.

Em todos os casos, buscou-se garantir condições reprodutíveis de posicionamento, cobertura adequada do volume sensível e homogeneidade da dose absorvida, de modo que as variações observadas nos parâmetros medidos pudessem ser atribuídas predominantemente à resposta do material dosimétrico à radiação. As subseções a seguir descrevem detalhadamente as configurações de irradiação adotadas em cada etapa experimental.

### 4.1 Irradiação das amostras para avaliação qualitativa por ressonância magnética

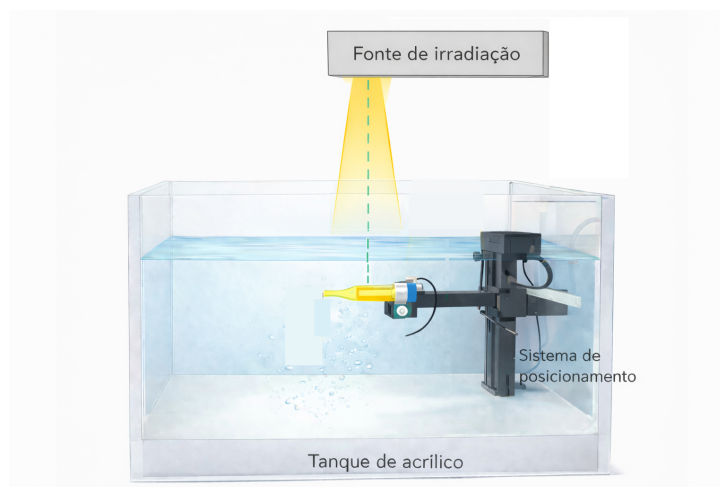
Com o objetivo de avaliar qualitativamente a resposta do gel polimérico após a irradiação, foi realizado um ensaio preliminar destinado a verificar a ocorrência do processo de polimerização e sua detecção por meio de imagens de ressonância magnética, especialmente por meio de variações no sinal ponderado em T2 em função da dose absorvida.

Para esse ensaio, foram produzidas cinco amostras, armazenadas em tubos plásticos de ensaio: quatro irradiadas e uma mantida como amostra-controle. Os tubos possuíam diâmetro interno aproximado de 10 mm, sendo considerado ponto de referência para a profundidade o centro geométrico do volume de gel.

As irradiações foram realizadas no Hospital Araújo Jorge, em Goiânia–GO, utilizando um acelerador linear *Elekta Compact™* (Elekta AB, Estocolmo, Suécia), operando com feixe de fótons de 6 MV, campo de irradiação de  $10 \times 10 \text{ cm}^2$  e técnica de distância fonte–superfície (SSD) fixa a 100 cm.

A configuração experimental adotada é apresentada na Figura 4.1, na qual se observa o posicionamento do tubo contendo o gel no interior do tanque de água, alinhado ao eixo central do feixe e mantido à profundidade de 10 cm, reproduzindo condições típicas de irradiação da dosimetria dos feixes usados na radioterapia. O sistema de posicionamento utilizado é a torre de fixação da câmara de ionização empregada na rotina da clínica, nesta existe um mostrador que sinaliza a profundidade.

Figura 4.1 – Geometria experimental utilizada para a irradiação das amostras em tanque de água, com alinhamento no eixo central do feixe e posicionamento a 10 cm de profundidade.



Fonte: A própria autora, 2025.

O posicionamento das amostras no interior do tanque de água contribuiu para a obtenção da mesma profundidade entre todas as amostras. Para minimizar possíveis gradientes de dose ao longo do comprimento das amostras, após a entrega de aproximadamente metade da dose prescrita, cada tubo foi girado manualmente em torno de seu eixo longitudinal, o que permitiu uma distribuição mais uniforme da dose ao longo do volume do gel.

Devido ao caráter mais demorado desse procedimento, ele foi aplicado apenas às amostras irradiadas com doses de 1, 6, 8 e 40 Gy. As amostras irradiadas e a amostra controle, que não foi submetida a nenhum procedimento, foram então encaminhadas para a etapa de aquisição de imagens por ressonância magnética, descrita na seção seguinte.

## 4.2 Irradiação das amostras para leituras ultrassônicas nos métodos 1 e 2 (modo pulso-eco)

Com o objetivo de investigar a resposta acústica do gel polimérico em função da dose absorvida, foram irradiadas amostras destinadas às leituras ultrassônicas realizadas pelos métodos 1 e 2, por meio de técnicas de ultrassom no modo pulso-eco. A configuração experimental foi definida para garantir a reprodutibilidade das condições de irradiação, a cobertura uniforme do volume de interesse e a preservação da superfície da amostra destinada ao acoplamento do transdutor ultrassônico.

As irradiações foram realizadas com a mesma energia do feixe (6 MV), mas o sistema de planejamento e os parâmetros geométricos do campo de radiação foram alterados, conforme apresentado na Tabela 4.1 e na Figura 4.2. O posicionamento das

amostras foi realizado diretamente sobre a base de suporte, com alinhamento obtido por meio dos lasers e do campo luminoso do acelerador linear, garantindo a coincidência do centro geométrico do volume sensível com o eixo central do feixe e assegurando a reprodutibilidade da geometria de irradiação entre as diferentes amostras.

A configuração experimental adotada é apresentada na Figura 4.2, na qual se observa o posicionamento da amostra alinhada ao eixo central do feixe e ao campo luminoso do acelerador linear.

Figura 4.2 – Geometria experimental utilizada para a irradiação das amostras destinadas às leituras ultrassônicas. O dosímetro de gel polimérico foi posicionado sobre a base de suporte e alinhado ao eixo central do feixe por meio do campo luminoso do acelerador linear, garantindo a cobertura uniforme do volume da amostra e a preservação da superfície utilizada nas medições ultrassônicas.



Fonte: A própria autora, 2025.

A geometria adotada foi escolhida para atender simultaneamente aos requisitos de irradiação e de medições ultrassônicas. Diferentemente da configuração utilizada no ensaio preliminar, as amostras destinadas às leituras por ultrassom necessitavam de um volume irradiado mais extenso e homogêneo, uma vez que a análise acústica no modo pulso-eco é realizada pela propagação da onda ultrassônica ao longo de um percurso definido no interior do gel. Dessa forma, utilizou-se um campo aberto, dimensionado para cobrir integralmente o volume da amostra.

Para preservar a superfície destinada ao acoplamento do transdutor ultrassônico, as irradiações foram realizadas com dois campos opostos, com incidências laterais de  $0^\circ$  e  $180^\circ$ . Essa configuração permitiu a irradiação do volume do gel sem que a região superior da amostra fosse diretamente afetada pela incidência inicial do feixe.

Os parâmetros de irradiação foram definidos para garantir a cobertura completa do volume das amostras, utilizando campos laterais paralelos e mantendo a reprodutibilidade entre as diferentes doses administradas. O planejamento foi realizado considerando o fantoma com densidade correspondente a 20 unidades Hounsfield (HU), e os valores de unidades monitoras (UM) foram determinados para cada dose prescrita. A Tabela 4.1 apresenta os principais parâmetros utilizados nas irradiações.

Tabela 4.1 – Parâmetros de irradiação utilizados para as amostras destinadas às leituras ultrassônicas.

Dose (Gy)	UM por campo	Campo (cm <sup>2</sup> )	Dimensões da amostra (cm)	Dose média (%)	Dose máxima (%)
10	499,8	15 × 15	5,2 × 5,8	87,7	100
20	999,5	15 × 15	5,2 × 5,8	87,7	100
30	1583,5	15 × 15	5,2 × 5,8	87,7	100
40	1999,1	15 × 15	5,2 × 5,8	87,7	100

Fonte: Retirada do software do acelerador linear.

A distribuição espacial da dose resultante da configuração com dois campos laterais paralelos foi avaliada por meio do perfil de dose extraído do sistema de planejamento, conforme apresentado na Figura 4.3. Observa-se que a soma das contribuições dos dois campos resulta em uma região central com dose próxima ao valor prescrito, caracterizando um platô de dose adequado para a irradiação do volume do gel, enquanto as reduções nas extremidades estão associadas aos efeitos de penumbra geométrica e à ausência de material adicional para espalhamento lateral.

Figura 4.3 – Perfil de dose lateral obtido no sistema de planejamento para a configuração com dois campos opostos (0° e 180°). As curvas correspondem às contribuições individuais de cada campo e à distribuição total resultante, evidenciando a formação de uma região central de dose aproximadamente uniforme compatível com o volume irradiado do gel.



Fonte: Retirada do software do acelerador linear.

Ressalta-se que, nessa configuração, o efeito de *build-up* superficial não foi explicitamente compensado por material de preenchimento adicional. Entretanto, como a mesma geometria de irradiação, as condições de campo e o posicionamento foram mantidos para todas as amostras, eventuais variações associadas à região de *build-up* configuram um efeito sistemático comum a todo o conjunto experimental, sem comprometer a análise comparativa da resposta acústica do gel em função da dose absorvida, considerando que as amostras eram homogêneas.

Dessa forma, as amostras irradiadas foram consideradas adequadas para as etapas subsequentes de aquisição e análise dos sinais ultrassônicos, descritas na seção seguinte.

### 4.3 Irradiação das amostras utilizadas no método 3 (modo de transmissão)

Com o objetivo de obter uma condição de irradiação com maior homogeneidade volumétrica da dose, adotou-se uma configuração distinta da utilizada nos métodos 1 e 2. Diferentemente da geometria empregada nas leituras em modo pulso-eco, em que a preservação da superfície de acoplamento ultrassônico condicionou o arranjo experimental, no método 3, as amostras puderam ser irradiadas no interior de um tanque de água, o que permitiu reduzir os efeitos de *build-up* superficial, melhorar as condições de equilíbrio eletrônico e promover uma distribuição de dose mais uniforme no volume do gel.

A configuração experimental adotada para a irradiação das amostras é apresentada na Figura 4.4, que ilustra o posicionamento das amostras no tanque de água e a geometria empregada para promover a homogeneidade da dose absorvida.

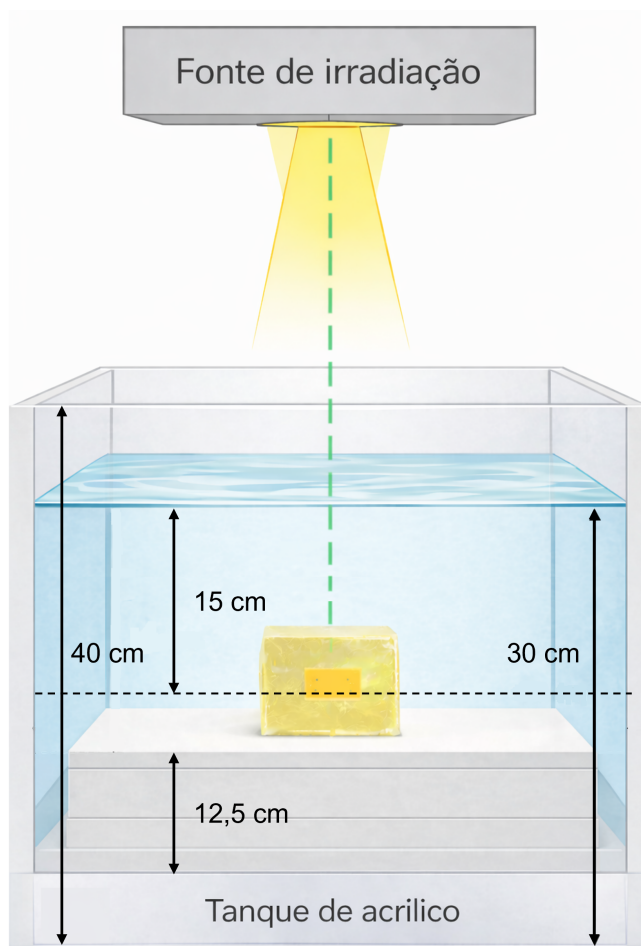
As irradiações foram realizadas com um acelerador linear Varian TrueBeam STx, configurado para um feixe de fótons com energia nominal de 10 MV e campo aberto de  $20 \times 20$  cm<sup>2</sup>. Foram irradiadas quatro amostras de gel MAGIC-F, com doses absorvidas de 10, 20, 30 e 40 Gy, sendo utilizada uma amostra para cada nível de dose.

Com o objetivo de promover a homogeneidade da dose no volume irradiado, a irradiação foi realizada com quatro campos, utilizando ângulos de gantry de 0°, 90°, 180° e 270°, mantendo o eixo central do feixe alinhado ao centro geométrico das amostras por meio dos lasers de posicionamento do equipamento.

O planejamento das irradiações foi realizado no sistema do acelerador linear, considerando um fantoma com densidade equivalente à da água. Os valores das unidades monitoras (UM) foram ajustados para que cada campo contribuísse com aproximadamente 10 Gy, resultando em uma dose total de 40 Gy no ponto de referência. A Tabela 4.2 apresenta os principais parâmetros utilizados.

Para evitar efeitos de *build-up* e assegurar condições próximas ao equilíbrio eletrô-

Figura 4.4 – Representação esquemática da geometria experimental adotada para a irradiação do gel dosimétrico MAGIC-F em um tanque de água, indicando o posicionamento da amostra, a profundidade de irradiação e as dimensões do tanque.



Fonte: A própria autora, 2026.

Tabela 4.2 – Parâmetros dos campos utilizados na irradiação das amostras do método 3.

Campo	Gantry (°)	Campo (cm <sup>2</sup> )	Energia	UM	Dose relativa (Gy)
1	180	20 × 20	10 MV	1200	10,04
2	90	20 × 20	10 MV	1341	10,04
3	0	20 × 20	10 MV	1140	9,96
4	270	20 × 20	10 MV	1349	9,96

Fonte: Retirada do sistema de planejamento do acelerador linear.

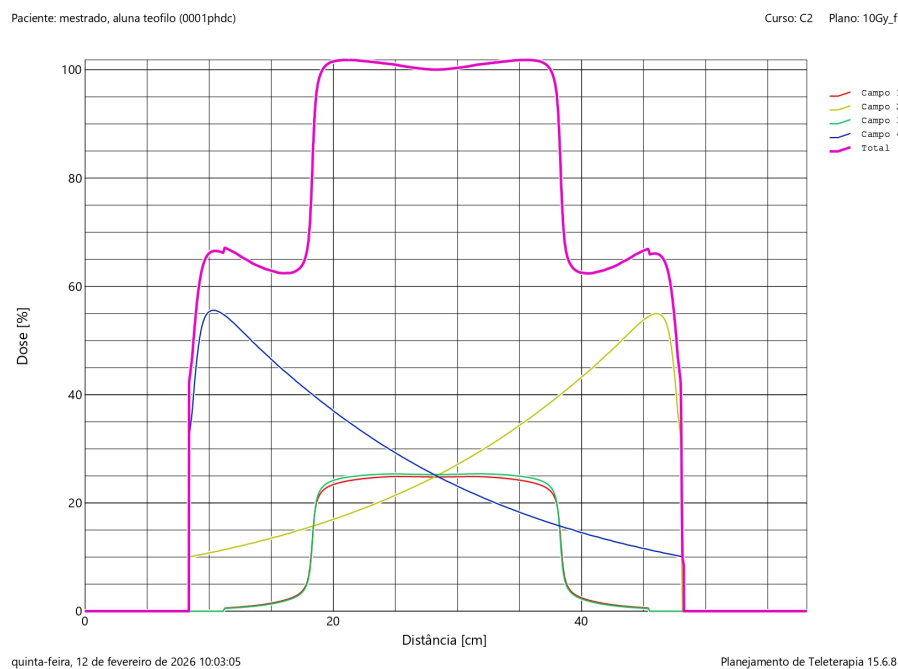
nico, as amostras foram posicionadas no interior de um tanque de água, a uma profundidade de cerca de 15 cm em relação à superfície livre, no centro de um tanque com coluna d'água de aproximadamente 30 cm. O tamanho do campo foi escolhido para garantir a cobertura completa das amostras e minimizar os efeitos de penumbra.

O posicionamento reprodutível das amostras foi assegurado por meio do uso de

placas de água sólidas fixadas no fundo do tanque, sobre as quais as amostras foram apoiadas e fixadas, garantindo a mesma altura e geometria em todas as irradiações.

A distribuição espacial da dose resultante da composição dos quatro campos foi avaliada por meio do sistema de planejamento. A Figura 4.5 apresenta o perfil de dose obtido, evidenciando a formação de uma região central com dose aproximadamente uniforme, compatível com o volume irradiado das amostras.

Figura 4.5 – Perfil de dose obtido no sistema de planejamento para a configuração com quatro campos ortogonais (0°, 90°, 180° e 270°), evidenciando a formação de uma região central de dose aproximadamente uniforme no volume irradiado.



Fonte: Retirada do software do acelerador linear.

A avaliação quantitativa da distribuição de dose no fantoma indicou elevada homogeneidade no volume irradiado, com dose máxima de 101,2%, dose mínima de 100% e dose média de 100,5% em relação à dose de referência, conforme apresentado na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Avaliação da homogeneidade de dose no volume irradiado para as diferentes doses prescritas no método 3.

Irradiação	Dose de referência (Gy)	Dose máxima (%)	Dose mínima (%)	Dose média (%)
1	10	101,2	100	100,5
2	20	101,2	100	100,5
3	30	101,2	100	100,5
4	40	101,2	100	100,5

Fonte: Retirada do sistema de planejamento do acelerador linear.

Dessa forma, as condições experimentais asseguraram a homogeneidade adequada da dose absorvida no volume sensível das amostras, o posicionamento reproduzível durante as irradiações e a cobertura geométrica do campo irradiado, sendo a uniformidade confirmada pelos dados do sistema de planejamento. Assim, as variações observadas nos parâmetros acústicos podem ser atribuídas predominantemente à resposta do gel MAGIC-F à dose absorvida, com influência mínima de efeitos geométricos e de não uniformidade na irradiação.

## 5 Leitura e caracterização das amostras

Após a etapa de irradiação, as amostras de gel polimérico foram submetidas a diferentes métodos de leitura para avaliar sua resposta em função da dose absorvida. Foram empregadas técnicas de ressonância magnética e de ultrassom, selecionadas conforme os objetivos específicos de cada etapa experimental. Os procedimentos de aquisição e de análise são descritos nas subseções a seguir.

### 5.1 Leitura por Ressonância Magnética

As imagens por ressonância magnética foram adquiridas na Unidade de Diagnóstico da Unimed (Goiânia-GO), utilizando o sistema *Optima MR 360* (GE Healthcare, Milwaukee, EUA) de 1,5 T. Para a aquisição, foi empregada a bobina de quadratura de cabeça, escolhida por proporcionar uma elevada relação sinal-ruído e uma boa qualidade de imagem para amostras posicionadas próximas à região central da bobina.

Foram analisadas apenas as amostras acondicionadas em tubos plásticos, previamente descritas na etapa de irradiação preliminar, com o objetivo de verificar, qualitativamente, a ocorrência do processo de polimerização induzido pela radiação e a presença de diferenças visuais entre as doses administradas. Não foi realizada análise quantitativa do sinal nem extração de parâmetros relaxométricos, e a avaliação baseou-se exclusivamente na inspeção visual das imagens obtidas.

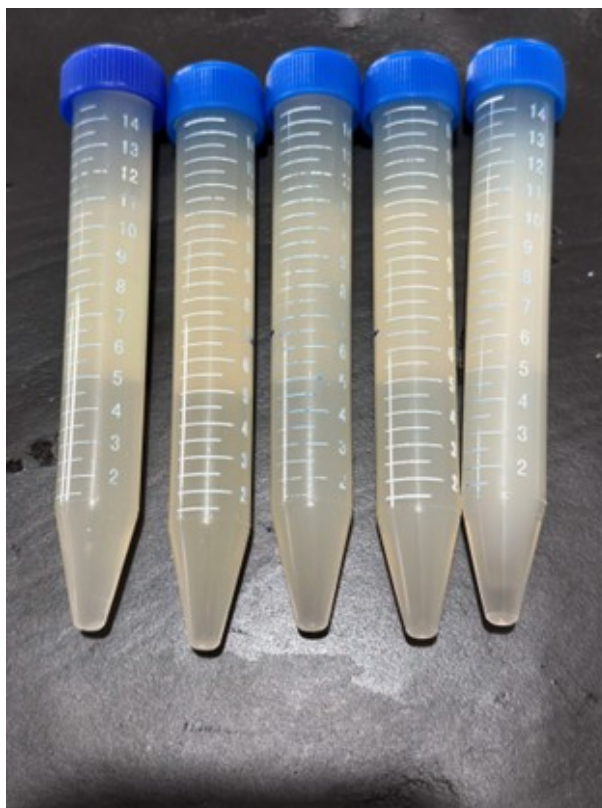
O aspecto visual das amostras de gel polimérico acondicionadas nos tubos plásticos é apresentado na Figura 5.1. Observa-se a transparência característica do material após o preparo, bem como a geometria dos recipientes utilizados nos ensaios.

Para minimizar artefatos decorrentes da diferença de susceptibilidade magnética entre o gel e o ar circundante aos tubos, as amostras foram fixadas em um suporte de acrílico e imersas em um recipiente contendo solução aquosa, procedimento que contribui para melhorar a homogeneidade do campo magnético local e a qualidade das imagens obtidas.

As imagens foram adquiridas aproximadamente 17 h após a irradiação, utilizando uma sequência ponderada em T2 detalhada na Tabela 5.1, com parâmetros de aquisição mantidos constantes entre as amostras, o que permitiu a comparação qualitativa da intensidade de sinal entre diferentes doses.

Os cortes foram definidos como axiais no referencial do equipamento, correspondendo a seções transversais ao eixo longitudinal dos tubos, nas quais as amostras apresentam

Figura 5.1 – Aspecto visual das amostras de gel polimérico acondicionadas em tubos plásticos após o preparo e antes das aquisições por ressonância magnética.



Fonte: A própria autora, 2025.

Tabela 5.1 – Descrição dos parâmetros utilizados nas aquisições de imagens por ressonância magnética.

Parâmetros de aquisição	
Tempo pós irradiação	17 horas
Sequência	Multi spin-eco
	16 ecos
Espessura de corte	5 mm
Aquisição	Sagital
Tempos de aquisição	
TR (ms)	2000
TE (ms)	60

Fonte: A própria autora, 2025.

formato aproximadamente circular.

As imagens obtidas foram posteriormente utilizadas para avaliação qualitativa das diferenças de sinal entre as amostras irradiadas e a amostra controle, conforme apresentado na seção de resultados.

## 5.2 Leitura nos sistemas ultrassônicos

No laboratório do Instituto de Física da Universidade Federal de Goiás (UFG), foram avaliados três aparatos experimentais com o objetivo de determinar a velocidade de propagação do ultrassom e o coeficiente de atenuação em amostras de calibração e em amostras irradiadas de gel polimérico MAGIC-f. A partir desses parâmetros acústicos, foram posteriormente estimados os parâmetros elásticos das amostras, conforme as relações apresentadas no Capítulo de Fundamentação Teórica.

Em todos os procedimentos experimentais, as medições foram inicialmente realizadas nas amostras de calibração, permitindo verificar o funcionamento do sistema, a estabilidade das aquisições e a reprodutibilidade dos resultados. Somente após essa etapa foram realizadas as medições nas amostras irradiadas, mantendo-se as mesmas condições experimentais.

Os procedimentos experimentais foram investigados com o intuito de verificar, nas condições experimentais e com os instrumentos disponíveis, qual configuração apresentava maior reprodutibilidade e menor sensibilidade a fontes de incerteza associadas ao acoplamento acústico, ao alinhamento e ao processamento dos sinais.

Foram utilizados três métodos experimentais distintos. O Método 1 empregou um transdutor de contato operando no modo pulso-eco, com medições realizadas no ar. Os Métodos 2 e 3 foram realizados com transdutores de imersão em meio aquoso, diferindo principalmente no modo de aquisição: o Método 2 utilizou o modo pulso-eco, enquanto o Método 3 adotou a técnica de transmissão-recepção.

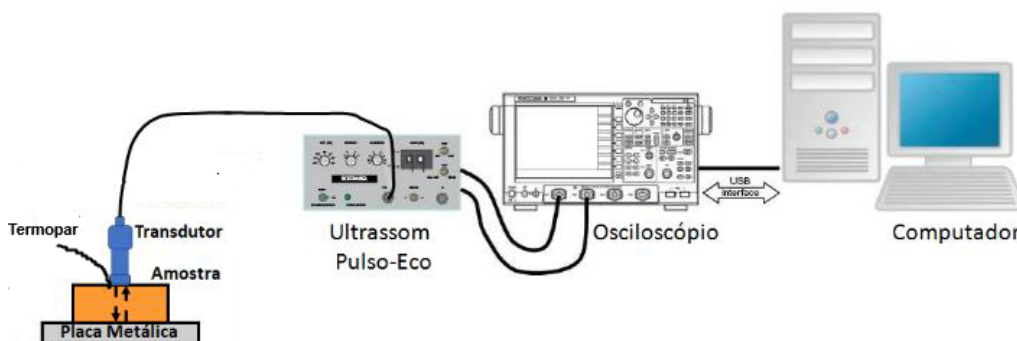
Nos Métodos 1 e 2, a análise foi restrita à determinação da velocidade de propagação do ultrassom e do coeficiente de atenuação das amostras. No Método 3, além desses parâmetros acústicos, também foram estimados parâmetros mecânicos derivados da velocidade ultrassônica, conforme as relações descritas no Capítulo de Fundamentação Teórica.

No Método 1 (transdutor de contato), foi utilizado gel de acoplamento acústico entre o transdutor e a superfície da amostra, com o objetivo de reduzir descontinuidades de impedância acústica e melhorar a transmissão da energia ultrassônica. Nos métodos em imersão, a água desempenhou naturalmente essa função de acoplamento.

A Figura 5.2 apresenta o diagrama da conexão utilizada em todos os métodos experimentais empregados no estudo. Os transdutores foram conectados ao pulser/receiver ultrassônico (Olympus, modelo 5072PR), responsável pela excitação e pelo condicionamento dos sinais, e este, por meio de cabos coaxiais blindados de  $75 \Omega$ , ao osciloscópio digital (Tektronix, modelo TDS 2024C). Embora exista descasamento em relação à impedância característica de  $50 \Omega$  do pulser/receiver, esse efeito foi considerado sistemático ao longo de todas as medições, não comprometendo a análise comparativa dos sinais adquiridos.

Os sinais ultrassônicos foram adquiridos diretamente no osciloscópio digital e transferidos para um computador pessoal via interface USB, onde foram armazenados e posteriormente processados por meio de algoritmos desenvolvidos em *MATLAB*.

Figura 5.2 – Diagrama esquemático do arranjo experimental utilizado nas medições ultrassônicas.



Fonte: A própria autora, 2025.

A temperatura durante os ensaios foi monitorada com o auxílio de termopares, cujos sinais foram condicionados pelo módulo NIDAQ-9212 e transmitidos ao computador pelo módulo de comunicação NI DAQ-9171, permitindo o acompanhamento contínuo da temperatura do meio de propagação durante as aquisições. Não houve controle ativo da temperatura, sendo os experimentos conduzidos em condições de temperatura ambiente.

Durante todas as medições, o pulser/receiver foi operado com os mesmos parâmetros básicos, mantendo-se constantes a frequência de repetição de pulsos ( $PRF = 2 \text{ kHz}$ ), a energia de excitação (nível 1), o amortecimento ( $damping = 3,50 \Omega$ ) e os filtros eletrônicos ( $HPF = 1 \text{ MHz}$  e  $LPF = 10 \text{ MHz}$ ). O único parâmetro ajustado entre os métodos foi o ganho do receptor, conforme descrito nas subseções correspondentes.

### 5.2.1 Método 1: Transdutor de contato no modo pulso-eco

No primeiro método, as medições ultrassônicas foram realizadas com um transdutor longitudinal de contato operando no modo pulso-eco, com frequência nominal de 2,25 MHz. Este método foi utilizado como abordagem inicial, visando avaliar a viabilidade da determinação da velocidade ultrassônica e do coeficiente de atenuação em amostras de gel por meio de um arranjo experimental simples e de fácil reprodutibilidade.

Antes da realização das medições nas amostras irradiadas, foram realizados testes e procedimentos de calibração com amostras de diferentes concentrações, conforme descrito no Capítulo de Preparação das Amostras. Essa etapa permitiu verificar o funcionamento do sistema, a estabilidade das medições e a reprodutibilidade do método.

### 5.2.1.1 Arranjo experimental

O sistema experimental corresponde à configuração de instrumentos comerciais integrados para a realização das medições ultrassônicas, caracterizando a implementação experimental adotada neste estudo. Este foi composto por um transdutor ultrassônico de contato conectado a um equipamento pulser/receiver (Olympus, modelo 5072PR) com ganho de 39 dB, responsável pela excitação do transdutor e pela amplificação do sinal recebido. Os sinais foram transferidos para um osciloscópio digital (Tektronix, modelo TDS 2024C), onde puderam ser visualizados e ajustados pelo operador.

Os dados adquiridos foram transferidos para um computador por meio de uma conexão USB, onde foram processados por um algoritmo desenvolvido em *MATLAB*. A temperatura ambiente e das amostras foi monitorada por meio de termopares conectados a um módulo de aquisição de dados, permitindo o acompanhamento dessas variáveis durante os ensaios, sem controle térmico ativo.

A Figura 5.3 apresenta uma fotografia do arranjo experimental utilizado, evidenciando o transdutor, o sistema de medição da espessura e os instrumentos eletrônicos empregados.

### 5.2.1.2 Determinação da espessura das amostras

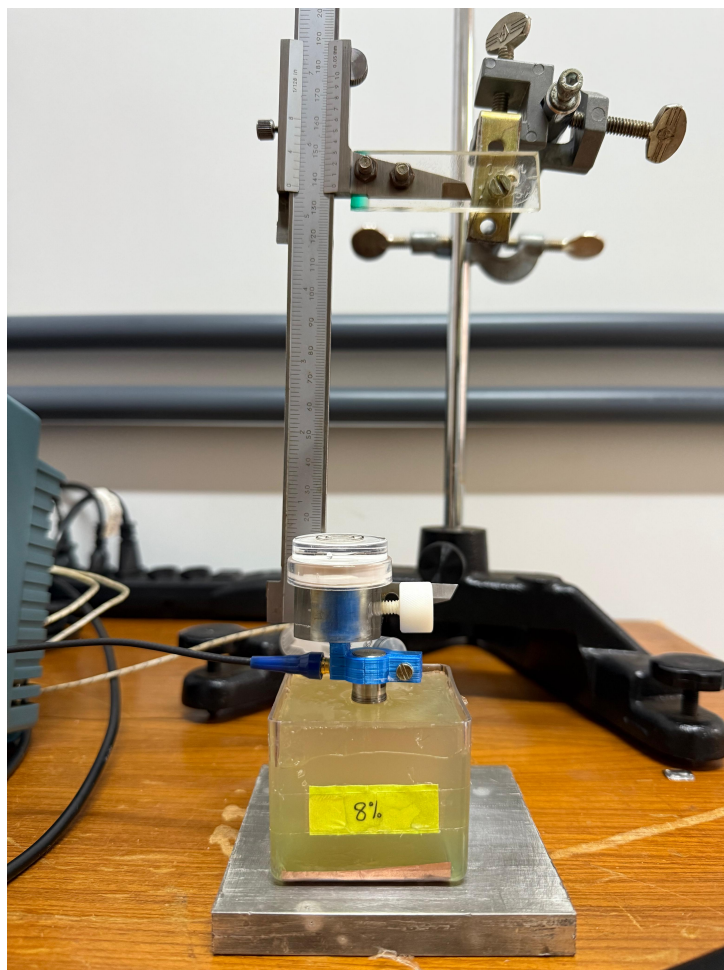
A espessura das amostras foi determinada experimentalmente por meio de um paquímetro analógico acoplado ao suporte do transdutor, conforme ilustrado na Figura 5.3.

O procedimento de medição é esquematizado na Figura 5.4. Inicialmente, foi medida a posição vertical do transdutor em contato direto com a placa metálica de referência, como mostrado na Figura 5.4(a), obtendo-se a altura de referência  $h_0$ . Em seguida, a amostra era posicionada sobre a placa metálica e uma nova medida,  $h$ , era realizada, conforme ilustrado na Figura 5.4(b). A espessura da amostra foi então determinada pela diferença entre essas duas medidas.

A medição foi realizada exatamente na mesma posição em que os sinais ultrassônicos foram adquiridos, garantindo que o percurso acústico considerado nos cálculos correspondesse ao trajeto real da onda no interior do gel. Esse procedimento reduz as incertezas associadas a possíveis variações locais de espessura e melhora a confiabilidade da determinação da velocidade acústica, uma vez que o cálculo da velocidade depende diretamente da razão entre a distância percorrida pela onda e o tempo de propagação, conforme a Equação ??.

Para cada amostra, a espessura foi medida cinco vezes, com reposicionamento entre as medições, e o valor médio foi utilizado nas etapas subsequentes de cálculo. Esse procedimento foi adotado para reduzir a influência de pequenas irregularidades superficiais,

Figura 5.3 – Arranjo experimental do Método 1, mostrando o sistema de aquisição ultrasônica, o transdutor de contato e o suporte de posicionamento das amostras.



Fonte: A própria autora, 2026.

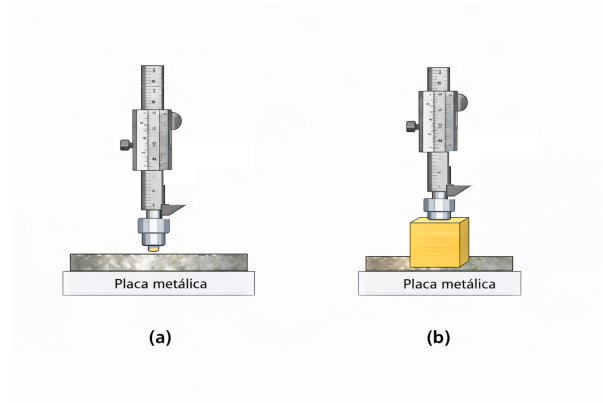
de possíveis variações no contato mecânico e de incertezas associadas ao posicionamento, melhorando a confiabilidade da estimativa da espessura.

O método adotado difere da medição direta com paquímetro em múltiplos pontos, frequentemente descrita na literatura (MATHER et al., 2002; ZHANG et al., 2019; CHEN et al., 2022), devido às limitações geométricas impostas pelo recipiente acrílico e pela consistência do gel, que dificultam o acesso direto às superfícies internas sem deformar o material. O procedimento utilizado permitiu obter medições reproduzíveis sem comprometer a integridade das amostras.

### 5.2.1.3 Alinhamento e posicionamento

Para garantir a incidência aproximadamente normal da onda ultrasônica, o transdutor foi posicionado perpendicularmente à superfície da amostra, utilizando um suporte com ajuste mecânico e um nivelador de superfície, como mostrado na Figura 5.5.

Figura 5.4 – Esquema representativo do procedimento utilizado para determinar a espessura das amostras na mesma posição onde os sinais ultrassônicos foram adquiridos. (a) Medição da posição de referência do transdutor em contato direto com a placa metálica, utilizada para determinar a altura  $h_0$ . (b) Medição realizada com a amostra posicionada sobre a placa metálica, obtendo-se a altura  $h$ , cuja diferença em relação a  $h_0$  corresponde à espessura da amostra.



Fonte: A própria autora, 2026.

O nivelamento foi realizado considerando a face superior do recipiente acrílico, assumida como plano de referência rígido. Como as amostras permaneciam contidas no recipiente, essa abordagem permitiu minimizar desalinhamentos e evitar deformações do gel associadas ao contato direto com o transdutor.

Esse cuidado experimental é importante para minimizar perdas por reflexão angular, melhorar o acoplamento acústico e garantir maior estabilidade e reprodutibilidade dos sinais adquiridos.

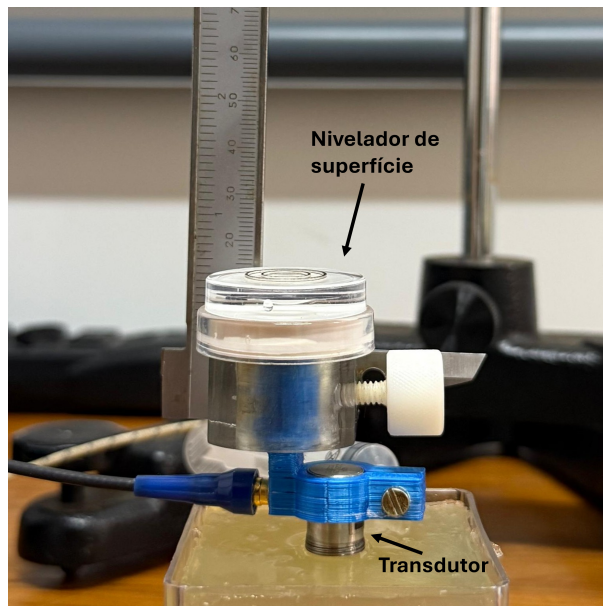
#### 5.2.1.4 Aquisição e processamento dos sinais

A aquisição e o processamento dos sinais ultrassônicos foram realizados por meio de um algoritmo desenvolvido em *MATLAB*, responsável pela leitura da temperatura, pela aquisição de ecos ultrassônicos, pela identificação automática dos picos de amplitude e pelo cálculo dos parâmetros acústicos. A aquisição dos sinais foi realizada com frequência de amostragem de 500 MS/s, conforme configuração do osciloscópio digital utilizado.

A velocidade longitudinal e o coeficiente de atenuação foram determinados a partir da diferença temporal entre os dois primeiros ecos consecutivos e da razão entre suas amplitudes máximas, conforme as relações apresentadas no Capítulo de Fundamentação Teórica.

Optou-se pela identificação direta dos picos máximos no domínio do tempo para determinar o atraso entre os ecos, por se tratar de um procedimento simples, consistente com o objetivo exploratório deste método e suficiente para a resolução temporal requerida neste estudo.

Figura 5.5 – Nivelador de superfície acoplado ao transdutor, utilizado para auxiliar no alinhamento mecânico e garantir o posicionamento aproximadamente perpendicular do transdutor em relação à superfície da amostra durante as aquisições ultrassônicas.



Fonte: A própria autora, 2026.

Reconhece-se que esse procedimento apresenta dependência do operador e pode ser sensível a variações no formato do sinal. No entanto, como as aquisições foram realizadas sob condições experimentais controladas e com repetição das medições, esse efeito foi minimizado. Métodos mais robustos, como a correlação cruzada e análises no domínio da frequência, foram posteriormente investigados no Método 2.

A sequência completa de aquisição e processamento dos dados está apresentada no fluxograma da Figura 5.6.

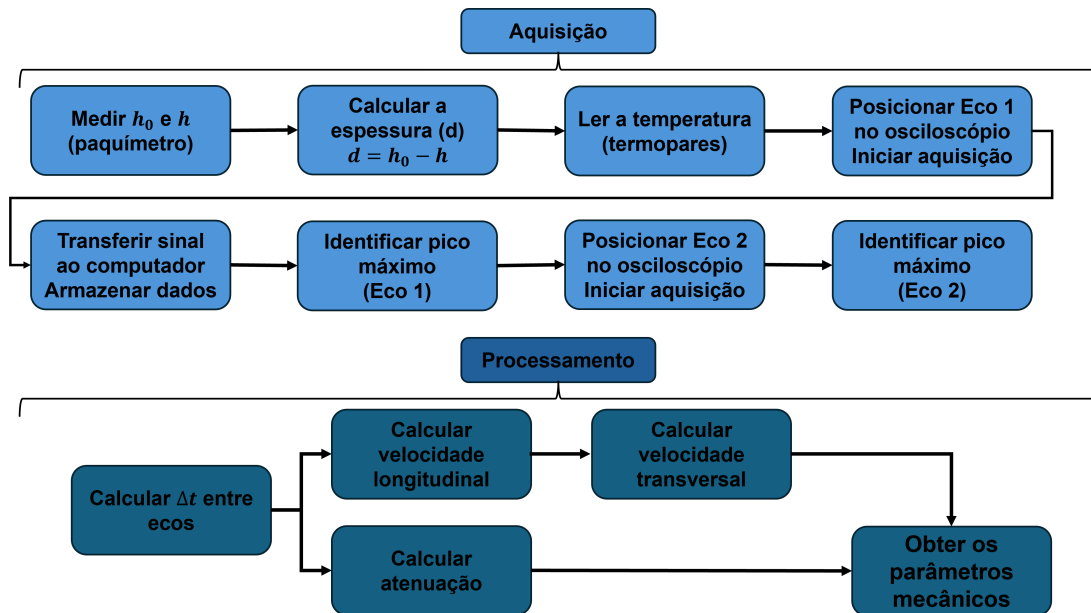
No fluxograma apresentado, o cálculo do coeficiente de atenuação está associado à análise das amplitudes dos sinais e não à variação temporal, sendo determinado a partir da razão entre as amplitudes dos ecos.

A temperatura foi utilizada tanto para o monitoramento das condições experimentais quanto para a determinação da velocidade do som no meio de referência, sendo considerada nos cálculos dos parâmetros acústicos.

### 5.2.2 Método 2: Transdutor de imersão no modo pulso-eco

No segundo método, as medições ultrassônicas foram realizadas com um transdutor de imersão operando no modo pulso-eco, com frequência nominal de 2,25 MHz. O objetivo deste método foi obter estimativas mais robustas dos parâmetros acústicos das amostras, reduzindo as incertezas associadas ao acoplamento acústico e à determinação dos tempos

Figura 5.6 – Fluxograma das etapas de aquisição e de processamento dos sinais ultrassônicos no Método 1.



Fonte: A própria autora, 2026.

de voo observados no método anterior.

Diferentemente do Método 1, no qual o transdutor foi acoplado diretamente à superfície da amostra, o uso do tanque acústico permitiu um acoplamento mais uniforme entre o transdutor e o gel, por meio da água como meio de propagação intermediário. Essa configuração contribuiu para maior estabilidade dos sinais adquiridos e maior reprodutibilidade das medições.

### 5.2.2.1 Arranjo experimental

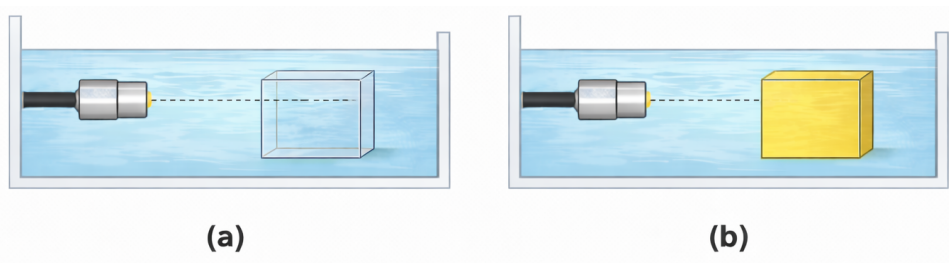
O sistema experimental foi composto por um transdutor ultrassônico de imersão conectado a um equipamento pulser/receiver e a um osciloscópio digital para visualização dos sinais. As aquisições foram realizadas em um tanque acústico contendo água à temperatura ambiente, utilizada como meio de acoplamento. Antes do início das medições, as amostras permaneceram em repouso por aproximadamente 2 horas, sendo cerca de 1 h 30 min em ambiente externo e 30 min imersas no tanque, a fim de promover o equilíbrio térmico com o meio de propagação.

A temperatura da água foi monitorada durante os experimentos por meio de termopares, permitindo determinar a velocidade do som no meio de referência. A temperatura da água foi monitorada durante os experimentos por meio de termopares, não havendo controle térmico ativo. Essa variável foi utilizada para determinar a velocidade do som no meio de referência, sendo considerada nos cálculos dos parâmetros acústicos.

A Figura 5.7 apresenta o arranjo experimental utilizado durante as aquisições. Inicialmente, foi adquirido um sinal de referência com o porta-amostras vazio, correspondente à propagação da onda ultrassônica apenas no meio aquoso e nas interfaces do recipiente acrílico.

Na configuração com a amostra, foram adquiridos os ecos provenientes das interfaces frontal e posterior do gel. Ressalta-se que o porta-amostras possui uma superfície refletora rígida na face oposta ao transdutor, que atua como referência para a identificação do eco de fundo, contribuindo para a determinação dos tempos de voo.

Figura 5.7 – Arranjo experimental utilizado para medições ultrassônicas no modo pulso-eco com transdutor de imersão. (a) Aquisição do sinal de referência com o porta-amostras vazio. (b) Aquisição do sinal com a amostra posicionada no tanque acústico.



Fonte: A própria autora, 2026.

O posicionamento do porta-amostras no interior do tanque foi mantido fixo ao longo das aquisições, utilizando uma referência geométrica no fundo do tanque, garantindo a repetibilidade do alinhamento e da distância entre transdutor e amostra.

Durante as medições deste método, o pulser/receiver foi operado com os mesmos parâmetros já apresentados, mantendo-se constantes a frequência de repetição de pulsos (PRF), a energia de excitação, o amortecimento (damping) e os filtros eletrônicos, de modo a garantir a comparabilidade entre os métodos.

A única modificação realizada foi no ganho do receptor, ajustado conforme o sinal adquirido. Para a aquisição do sinal de referência com o porta-amostras vazio e do eco proveniente da face traseira da amostra, o ganho foi mantido em 0 dB, enquanto para a aquisição do eco correspondente à face frontal da amostra, foi utilizado ganho de 30 dB, de modo a melhorar a visualização e a identificação do sinal refletido nessa interface. Esse ajuste foi necessário devido às diferenças de amplitude entre os sinais refletidos nas diferentes interfaces, uma vez que o eco proveniente da face frontal apresenta menor amplitude do que os demais.

Durante as medições, o transdutor foi alinhado e fixado de modo a garantir a incidência aproximadamente normal da onda ultrassônica sobre a superfície da amostra, minimizando perdas por reflexão angular e assegurando maior estabilidade dos sinais

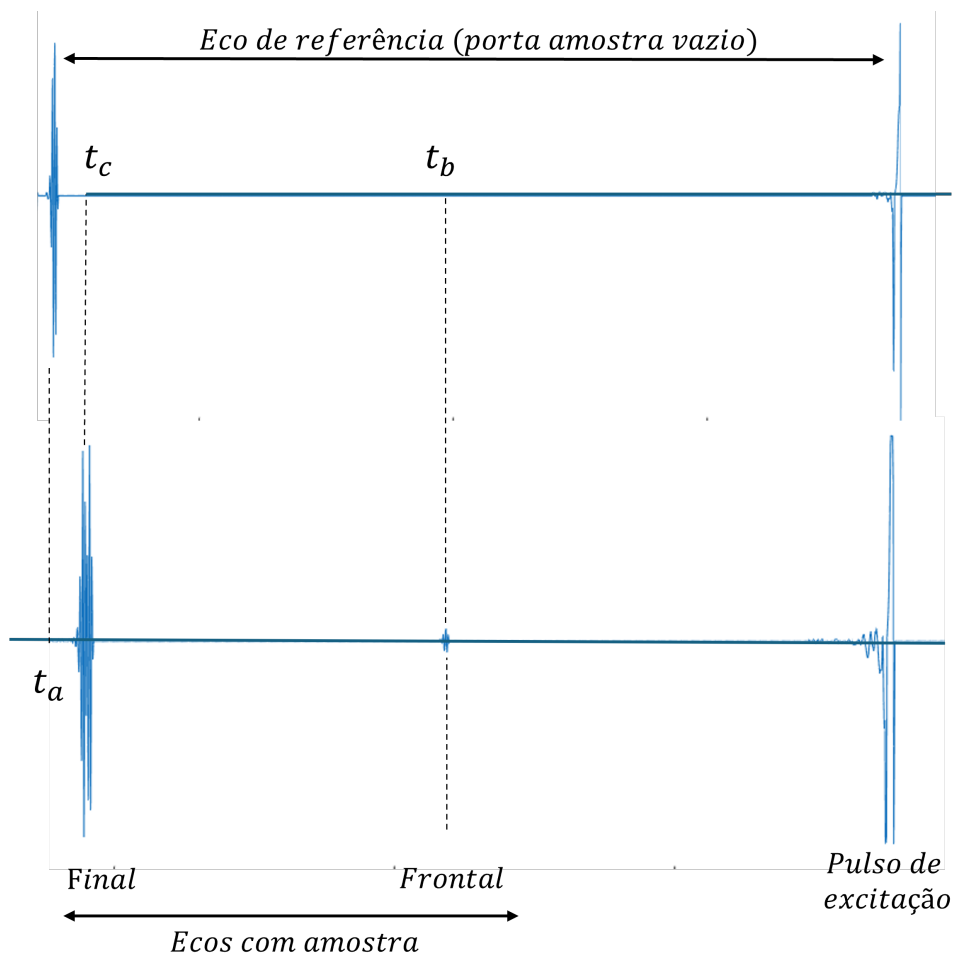
adquiridos.

### 5.2.2.2 Aquisição dos sinais

Foram adquiridos o pulso de excitação, o sinal de referência no meio aquoso e os ecos provenientes das interfaces frontal e posterior da amostra, conforme ilustrado na Figura 5.8.

O sinal de referência foi utilizado para caracterizar a propagação no meio de acoplamento e como base para a estimativa da atenuação, enquanto os ecos das interfaces da amostra foram empregados na determinação dos tempos de voo e, conseqüentemente, da velocidade de propagação no gel.

Figura 5.8 – Exemplo de sinais ultrassônicos adquiridos no modo pulso-eco, indicando os tempos característicos utilizados na determinação dos parâmetros acústicos.



Fonte: A própria autora, 2026.

Após a aquisição, os sinais foram transferidos para um computador e armazenados para processamento posterior.

### 5.2.2.3 Processamento dos sinais

O processamento dos sinais foi realizado por meio de rotinas desenvolvidas em *MATLAB*, responsáveis pela organização dos dados, pela determinação dos atrasos temporais e pelo cálculo dos parâmetros acústicos.

A determinação dos tempos de voo foi realizada por meio de correlação cruzada entre os sinais, considerando janelas temporais selecionadas em torno dos ecos de interesse. O atraso temporal foi estimado a partir da posição do máximo da função de correlação, correspondente ao melhor alinhamento entre os sinais comparados.

Essa abordagem permite reduzir a influência de ruído, variações na forma do pulso e distorções introduzidas pelo meio, proporcionando maior robustez na estimativa do tempo de voo em comparação à identificação direta de picos de amplitude.

A partir dos atrasos temporais obtidos, foram calculadas a diferença de tempo entre os ecos, a espessura da amostra, a velocidade de propagação da onda ultrassônica e o coeficiente de atenuação, por meio de análise no domínio da frequência com a Transformada Rápida de Fourier (FFT), na qual o coeficiente de atenuação foi estimado a partir da razão espectral entre os sinais de referência e os sinais obtidos com a amostra, considerando a dependência da amplitude com a frequência.

A espessura das amostras não foi determinada por medição mecânica neste método, sendo estimada acusticamente a partir dos atrasos temporais entre os ecos e da velocidade de propagação do som no meio de referência (água), determinada com base na temperatura monitorada durante o experimento.

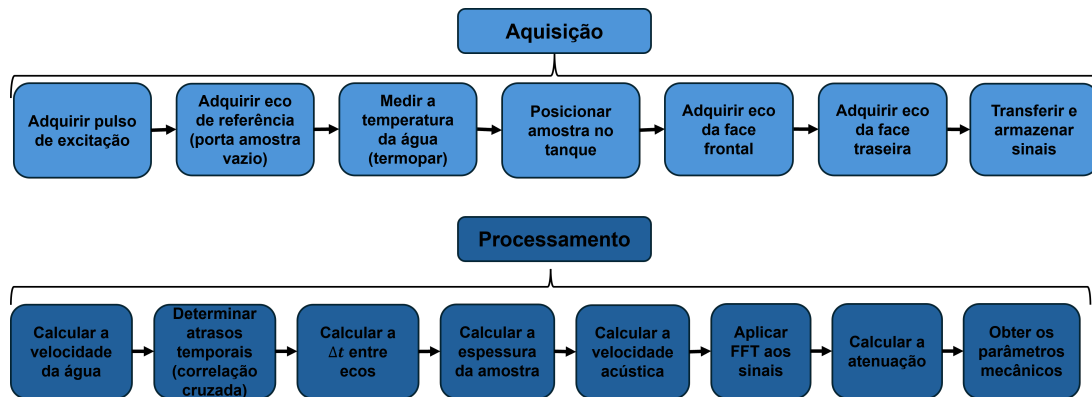
Essa abordagem é consistente com a configuração experimental adotada, na qual o transdutor não está em contato direto com a amostra, e permite obter uma estimativa da espessura compatível com o percurso acústico efetivo da onda ultrassônica.

A sequência completa de aquisição e processamento dos dados está apresentada no fluxograma da Figura 5.9.

Esse conjunto de procedimentos permitiu obter estimativas reproduzíveis dos parâmetros acústicos das amostras, mantendo o controle das principais fontes de incerteza associadas à aquisição e ao processamento dos sinais.

Ressalta-se que, neste método, a espessura da amostra é estimada indiretamente a partir dos tempos de voo e da velocidade do som na água, o que introduz contribuições adicionais para a incerteza combinada, associadas principalmente à medição temporal e à estimativa da temperatura. No entanto, essa abordagem permite reduzir as incertezas relacionadas à medição mecânica direta em materiais deformáveis, como géis, representando um compromisso entre precisão geométrica e consistência acústica.

Figura 5.9 – Fluxograma do procedimento de aquisição e de processamento dos sinais ultrassônicos no Método 2.



Fonte: A própria autora, 2026.

### 5.2.3 Método 3: Transdutores de imersão no modo transmissão–recepção

No terceiro método, as propriedades acústicas das amostras foram determinadas por meio da técnica de transmissão–recepção com transdutores de imersão. Diferentemente dos métodos baseados em pulso-eco, nesse arranjo, o sinal ultrassônico é transmitido por um transdutor emissor, atravessa o meio de propagação e a amostra e é posteriormente detectado por um transdutor receptor posicionado no lado oposto.

Esse método é amplamente empregado na caracterização ultrassônica de materiais homogêneos e de objetos simuladores de tecido, pois permite determinar diretamente o tempo de trânsito e a atenuação do pulso transmitido, com menor influência de múltiplas reflexões internas em comparação com o modo pulso-eco.

A água foi utilizada como meio de referência, permitindo a aquisição de um sinal de base para determinação da velocidade no meio líquido. O sinal obtido com o porta-amostra vazio foi utilizado como referência para a estimativa do coeficiente de atenuação, enquanto o sinal com a amostra foi empregado na determinação do tempo de trânsito e da atenuação associada ao material.

#### 5.2.3.1 Arranjo experimental

O sistema experimental foi composto por dois transdutores de imersão com frequência central de 2,25 MHz, acoplados a um equipamento pulser/receiver (Olympus, modelo 5072PR), responsável pela excitação do transdutor transmissor e pela amplificação do sinal recebido.

Os sinais foram visualizados e registrados em um osciloscópio digital (Tektronix, modelo TDS 2024C) e, posteriormente, transferidos para um computador, onde foram processados por um algoritmo desenvolvido em *MATLAB*.

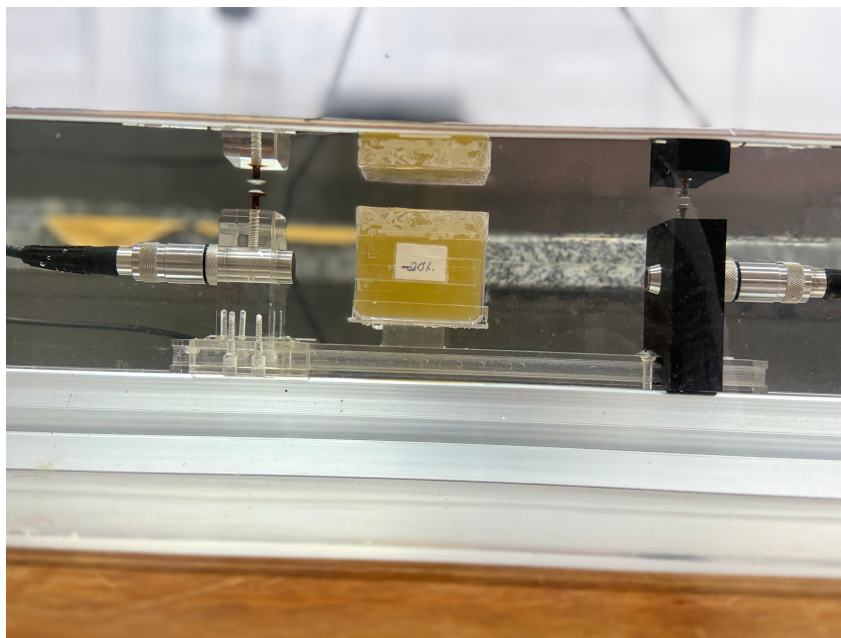
Durante as aquisições deste método, o pulser/receiver foi operado com as mesmas configurações básicas descritas anteriormente, mantendo-se constantes a PRF, a energia de excitação, o amortecimento e os filtros eletrônicos. O ganho do receptor foi mantido em 0 dB em todas as aquisições, de modo a preservar a proporcionalidade entre as amplitudes dos sinais transmitidos e permitir a comparação direta entre as diferentes condições experimentais.

As amostras foram posicionadas em porta-amostras de acrílico, imersas em um tanque com água da torneira à temperatura ambiente, permanecendo em repouso por aproximadamente 2 horas antes das medições, sendo cerca de 1 h 30 min em ambiente externo e 30 min imersas no tanque acústico, a fim de promover o equilíbrio térmico com o meio de propagação.

A temperatura da água foi monitorada continuamente por meio de um termopar conectado a um sistema de aquisição de dados, não havendo controle térmico ativo, mas apenas monitoramento dessa variável ao longo do experimento.

A Figura 5.10 apresenta o arranjo experimental utilizado, evidenciando o posicionamento dos transdutores, do porta-amostra e do sistema de aquisição.

Figura 5.10 – Arranjo experimental do Método 3, mostrando os transdutores de imersão, o porta-amostra e o sistema de aquisição ultrassônica.

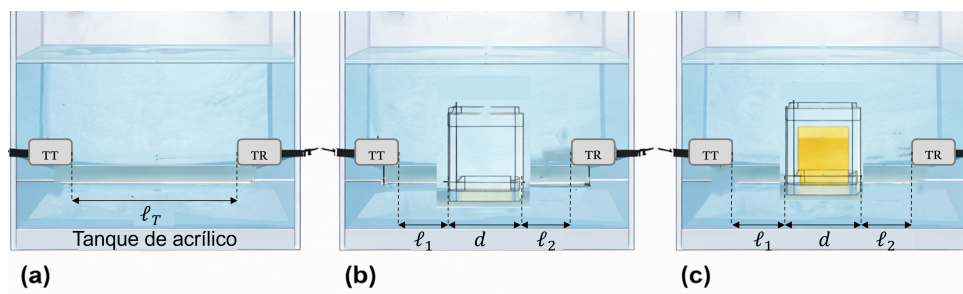


Fonte: A própria autora, 2026.

Os transdutores utilizados apresentam frequências nominais equivalentes (2,25 MHz), porém com diferentes diâmetros de elemento ativo, sendo o transdutor receptor de menor diâmetro. Essa diferença pode influenciar a sensibilidade e o padrão de recepção do sinal, devendo ser considerada na interpretação dos resultados.

A geometria de aquisição de sinais é ilustrada na Figura 5.11. Inicialmente, foi adquirido o sinal de referência apenas em água, em seguida, o sinal com o porta-amostra vazio e, por fim, o sinal com a amostra posicionada no interior do porta-amostra, mantendo-se a mesma configuração geométrica em todas as medições.

Figura 5.11 – Representação esquemática da sequência de aquisição dos sinais no Método 3: (a) aquisição em água; (b) aquisição com o porta-amostra vazio; e (c) aquisição com a amostra.



Fonte: A própria autora, 2026.

### 5.2.3.2 Aquisição dos sinais

Todas as medições foram realizadas a aproximadamente  $25,0 \pm 0,2$  °C, com temperatura monitorada continuamente por meio de termopares ao longo das aquisições. Antes do início de cada conjunto de medições, foi aguardado um período de aproximadamente 30 minutos, após a imersão no tanque, para o estabelecimento do equilíbrio térmico entre a água, o porta-amostra e a amostra.

Para cada condição experimental, as aquisições foram repetidas cinco vezes, mantendo-se a mesma configuração geométrica e, posteriormente, utilizou-se o valor médio das amplitudes e dos tempos de voo para estimar os parâmetros acústicos. Esse procedimento permitiu avaliar a repetibilidade instrumental e incorporar a variabilidade observada à análise de incerteza do tipo A.

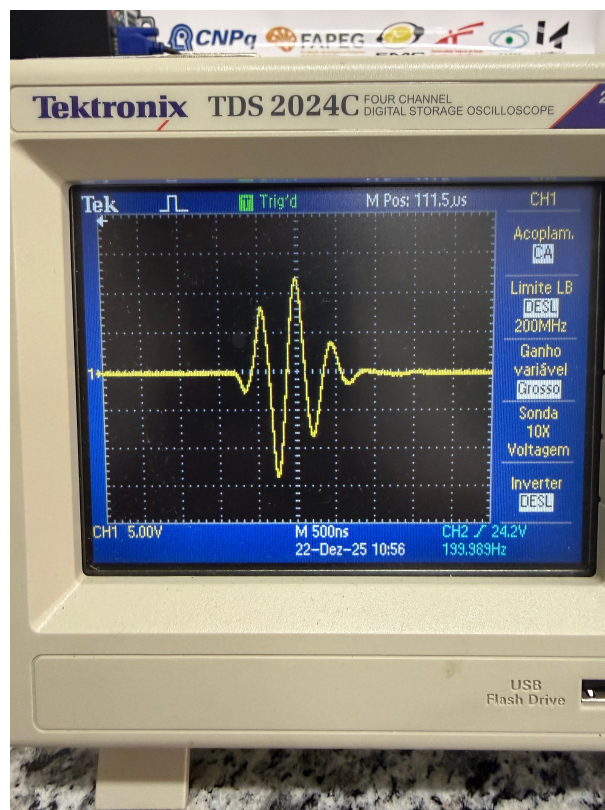
Para cada nível de dose absorvida, utilizou-se uma única amostra independente de gel polimérico MAGIC-F, e as repetições referiam-se exclusivamente às aquisições ultrassônicas realizadas na mesma amostra.

Durante a análise, foi considerado apenas o primeiro pulso ultrassônico transmitido, identificado pelo instante correspondente à máxima amplitude do sinal recebido, de modo a evitar a influência de múltiplas reflexões internas e assegurar a consistência das estimativas temporais e de amplitude.

Exemplos típicos de sinais adquiridos são apresentados na Figura 5.12.

Os sinais foram adquiridos com frequência de amostragem de 500 MS/s no osciloscópio digital, garantindo resolução temporal adequada para a determinação precisa dos

Figura 5.12 – Exemplos de sinais ultrassônicos adquiridos no Método 3 para as diferentes condições experimentais: água, porta-amostra vazio e amostra.



Fonte: A própria autora, 2026.

tempos de voo.

### 5.2.3.3 Processamento dos sinais

O processamento dos sinais foi realizado no ambiente *MATLAB*, seguindo um procedimento padronizado. Inicialmente, identificaram-se automaticamente os instantes correspondentes às amplitudes máximas dos sinais adquiridos em cada condição experimental, o que permitiu determinar os tempos de voo.

A velocidade do som na água foi estimada a partir da temperatura medida experimentalmente, utilizando a relação empírica apresentada no Capítulo de Fundamentação Teórica. A distância efetiva entre os transdutores foi então determinada com base no tempo de voo do sinal de referência em água.

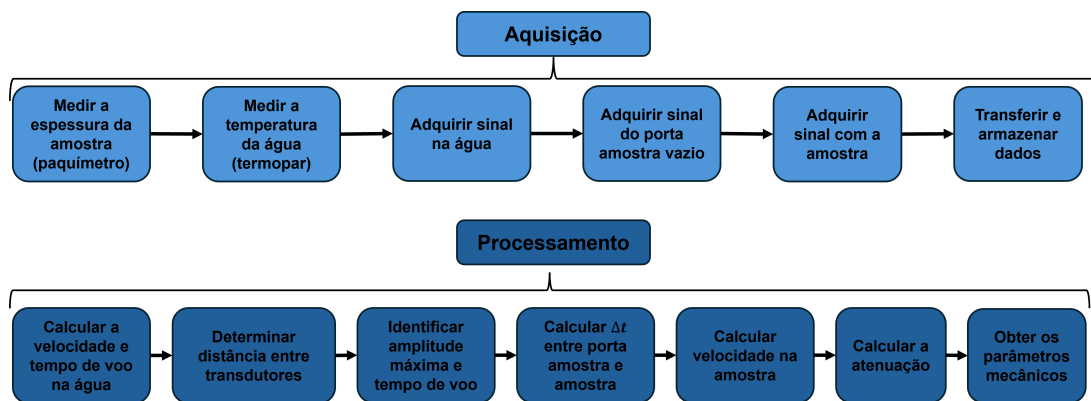
A velocidade acústica das amostras foi estimada pelo método do tempo de trânsito, considerando a diferença entre os tempos de voo medidos com o porta-amostra vazio e com a amostra posicionada, conforme descrito no referencial teórico na Equação ??.

O coeficiente de atenuação foi determinado a partir da razão entre as amplitudes máximas dos sinais adquiridos com a amostra presente e com o porta-amostra vazio,

normalizada pela espessura da amostra, conforme as relações apresentadas na seção ???. A utilização do sinal do porta-amostra como referência permite compensar os efeitos associados às interfaces e ao material acrílico, mantendo constante a contribuição geométrica do sistema.

A sequência completa das etapas de aquisição e de processamento de dados está apresentada no fluxograma da Figura 5.13.

Figura 5.13 – Fluxograma das etapas de aquisição e de processamento dos sinais ultrassônicos no Método 3.



Fonte: A própria autora, 2026.

Esse procedimento permitiu a determinação consistente da velocidade longitudinal de propagação e do coeficiente de atenuação ultrassônica das amostras, minimizando efeitos geométricos, térmicos e de interface.

Os três métodos descritos foram aplicados às amostras de calibração e às amostras irradiadas, permitindo determinar a velocidade de propagação e o coeficiente de atenuação ultrassônica em diferentes condições experimentais. A análise conjunta dos resultados permitiu avaliar a reprodutibilidade dos procedimentos, a sensibilidade dos métodos às variações induzidas pela dose absorvida e as principais fontes de incerteza associadas à aquisição e ao processamento dos sinais. Na seção seguinte, são apresentados os resultados experimentais, a análise comparativa entre os métodos e a discussão da resposta acústica do gel em função da dose absorvida.

## Parte III

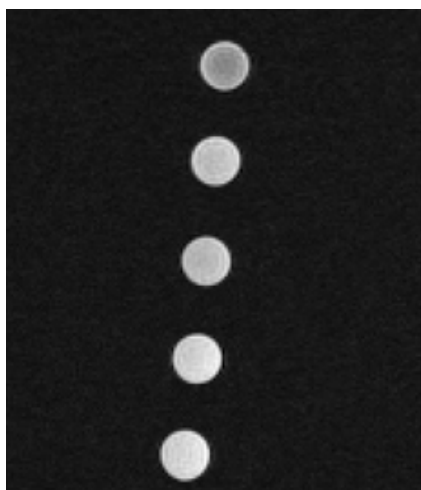
### Resultados e Discussões

Nesta parte, são apresentados e discutidos os resultados obtidos com as técnicas experimentais descritas anteriormente. Inicialmente, são analisadas as imagens obtidas por Ressonância Magnética, utilizadas como verificação qualitativa da resposta das amostras à irradiação. Em seguida, são apresentados os resultados das medições ultrassônicas realizadas por três métodos experimentais distintos, e discutem-se as relações entre os parâmetros físicos e acústicos das amostras.

## 6 Resultados por Ressonância Magnética

A Figura 6.1 apresenta imagens de ressonância magnética ponderadas em T2 obtidas para amostras de gel polimérico submetidas a diferentes doses absorvidas. As imagens correspondem a cortes axiais, isto é, seções transversais ao eixo longitudinal dos tubos. De cima para baixo, observam-se as amostras correspondentes às doses de 0, 1, 6, 8 e 40 Gy, permitindo a comparação qualitativa da intensidade de sinal na região sensível do gel.

Figura 6.1 – Imagem de ressonância magnética ponderada em T2 de amostras de gel polimérico irradiadas com diferentes doses, com cortes axiais dos tubos.



Observam-se, qualitativamente, variações na intensidade do sinal entre as amostras, associadas ao processo de polimerização induzido pela radiação. As diferenças visuais entre os níveis de cinza indicam alterações nas propriedades físico-químicas do gel em função da dose absorvida, comportamento esperado para dosímetros poliméricos e amplamente descrito na literatura.

Neste trabalho, as imagens por ressonância magnética foram utilizadas exclusivamente como etapa preliminar de verificação qualitativa, com o objetivo de confirmar a resposta do gel à irradiação e avaliar visualmente a homogeneidade das amostras. Não

foram realizadas análises quantitativas do sinal nem a determinação de parâmetros relaxométricos, uma vez que o foco principal da investigação foi a avaliação acústica do material.

Dessa forma, a ressonância magnética foi empregada como ferramenta complementar de validação experimental, contribuindo para a interpretação dos resultados obtidos pelos métodos ultrassônicos, que constituem o foco principal deste estudo e são apresentados no capítulo seguinte.

## 7 Resultados das avaliações nos sistemas ultrassônicos

Após a verificação qualitativa da resposta das amostras por meio de imagens de ressonância magnética, foram realizadas medições quantitativas com o sistema ultrassônico montado no laboratório.

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos a partir dessas medições, realizadas por três métodos experimentais distintos. Para cada método, são apresentados, inicialmente, os resultados das amostras de calibração, utilizados para avaliar a estabilidade e a reprodutibilidade das medições, seguidos dos resultados obtidos nas amostras irradiadas. Ao final de cada seção, discutem-se as principais limitações experimentais observadas, bem como as motivações para o desenvolvimento dos métodos subsequentes.

O objetivo principal desta etapa foi avaliar a sensibilidade dos parâmetros acústicos às variações de concentração e de dose absorvida, bem como investigar a reprodutibilidade entre as diferentes configurações experimentais.

### 7.1 Método 1: transdutor de contato no modo pulso-eco

Após a validação qualitativa das amostras por meio de imagens de ressonância magnética, iniciou-se a etapa de caracterização quantitativa com o sistema ultrassônico desenvolvido no laboratório. O primeiro procedimento investigado foi o método de medição por contato direto entre o transdutor e a amostra, empregado para determinar a velocidade longitudinal e o coeficiente de atenuação.

Para avaliar o desempenho do sistema e a confiabilidade das medições, foram realizadas aquisições inicialmente em amostras de calibração e, posteriormente, em amostras irradiadas.

#### 7.1.1 Amostras de calibração

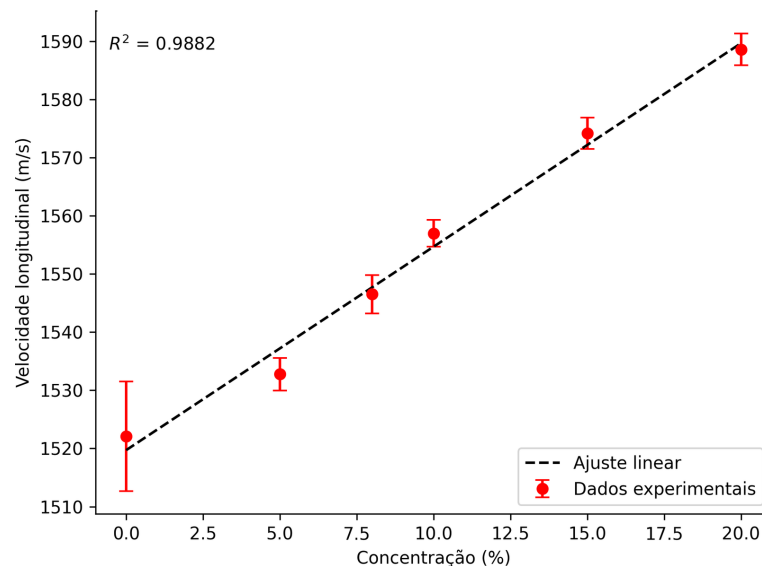
Com o intuito de reduzir erros sistemáticos e avaliar a resposta do sistema em condições mais controladas, foram preparadas amostras de calibração com diferentes concentrações de gelatina bovina.

Inicialmente, as medições foram realizadas com o transdutor em contato direto com as amostras, mantendo-se a altura variável entre as aquisições, o que exigia a leitura do paquímetro a cada reposicionamento. Observou-se que esse procedimento introduzia variações adicionais nas medidas, principalmente devido à dificuldade de reposicionar o transdutor sob as mesmas condições geométricas. Posteriormente, buscou-se padronizar o

posicionamento do transdutor em uma mesma amostra, mantendo sua altura constante ao longo das aquisições, a fim de reduzir a variabilidade associada ao reposicionamento manual.

Os resultados obtidos para a velocidade longitudinal em função da concentração de gelatina bovina são apresentados na Figura 7.1. Observa-se aumento da velocidade longitudinal com a concentração de gelatina no intervalo investigado, com ajuste linear apresentando elevado coeficiente de determinação. Esse comportamento está de acordo com a tendência esperada para materiais gelatinosos, nos quais o aumento da concentração está associado ao aumento da rigidez efetiva do meio (TABERLET et al., 2017).

Figura 7.1 – Velocidade longitudinal em função da concentração de gelatina bovina obtida pelo método de contato.

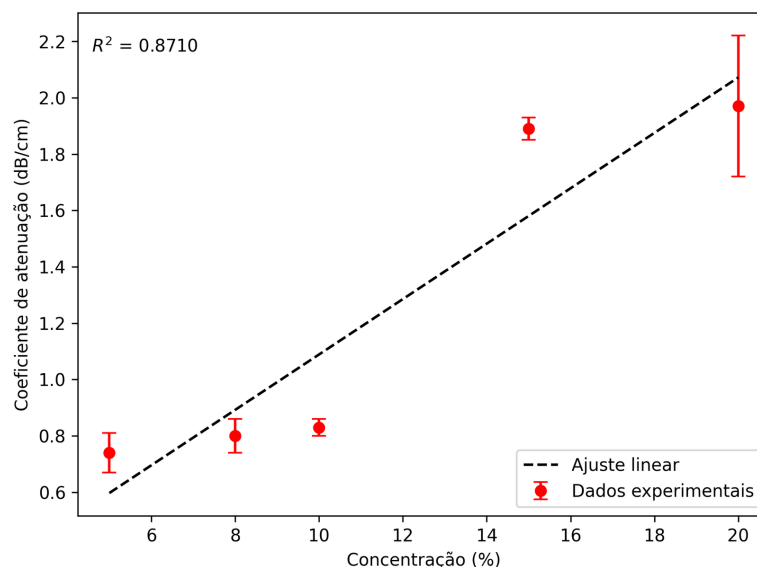


Em contraste, o coeficiente de atenuação apresentou maior dispersão experimental em função da concentração, conforme ilustrado na Figura 7.2. Diferentemente da velocidade, cuja estimativa depende principalmente da determinação temporal entre ecos, a atenuação é obtida a partir da amplitude dos sinais, tornando-se mais sensível a pequenas variações de alinhamento, acoplamento acústico e estabilidade térmica durante as aquisições.

A maior variabilidade observada na atenuação pode ser explicada por fatores associados ao próprio método de aquisição. Entre os principais, destacam-se o alinhamento do transdutor em relação à superfície da amostra e a estabilidade térmica durante as medições. Pequenas inclinações angulares podem alterar a intensidade do eco refletido, reduzindo a amplitude do sinal recebido e introduzindo erros sistemáticos na estimativa do coeficiente de atenuação.

Além disso, as propriedades acústicas de materiais gelatinosos são sensíveis à temperatura, de modo que variações térmicas, mesmo moderadas, podem influenciar tanto a velocidade quanto a atenuação, o que contribui para a dispersão dos resultados.

Figura 7.2 – Coeficiente de atenuação em função da concentração de gelatina bovina obtido pelo método de contato.



Apesar dessas limitações, o método por contato apresenta vantagens importantes do ponto de vista experimental. Por não requerer tanque acústico nem vedação completa do sistema, a montagem é simplificada, sendo necessário apenas o monitoramento das condições ambientais e o uso de gel de acoplamento acústico entre o transdutor e a superfície da amostra.

Entretanto, para que o método por contato apresente maior robustez e reprodutibilidade, seria necessário um refinamento adicional do sistema experimental, incluindo melhor controle do alinhamento do transdutor, padronização do acoplamento acústico e maior estabilidade térmica durante as aquisições, fatores já identificados como sensíveis nesta configuração experimental.

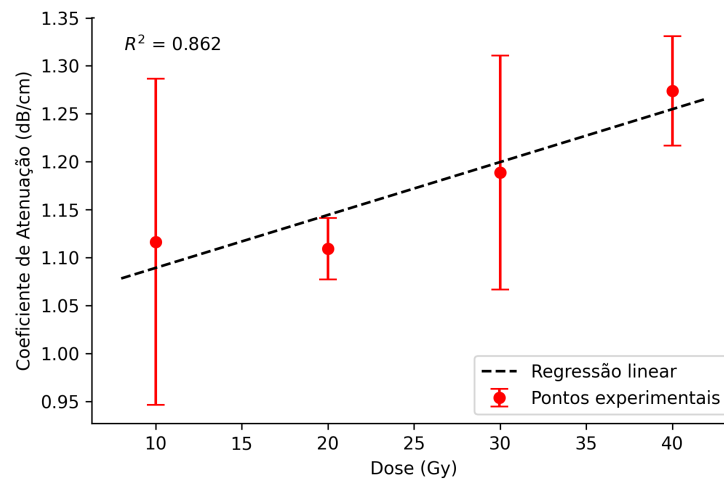
### 7.1.2 Amostras irradiadas

Após a etapa de calibração e a avaliação das limitações experimentais do método, foram realizadas medições em amostras irradiadas de acordo com a metodologia descrita na Seção 4.2.

A Figura 7.3 apresenta os valores médios do coeficiente de atenuação em função da dose absorvida. Embora os pontos indiquem aumento global da atenuação entre 0 e 40 Gy, a dispersão experimental é elevada, de modo que esse resultado deve ser interpretado como uma tendência descritiva, e não como evidência estatística conclusiva de dependência com a dose. Ainda assim, o comportamento observado é qualitativamente compatível com o esperado para géis poliméricos irradiados.

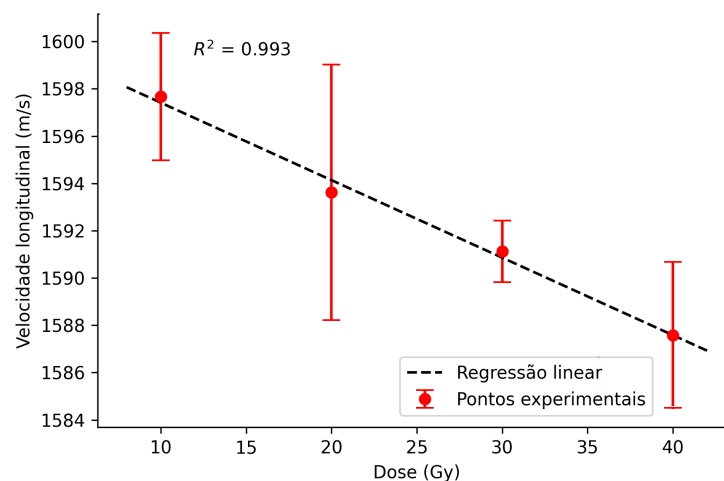
Os resultados da velocidade longitudinal em função da dose absorvida são apresentados na Figura 7.4. Embora haja variação dos valores medidos com a dose, o comportamento

Figura 7.3 – Coeficiente de atenuação em função da dose absorvida, obtido pelo método de contato.



observado não reproduz a tendência crescente usualmente reportada na literatura para géis poliméricos irradiados (MASOUMI et al., 2016; GOHARPEY; MOKHTARI-DIZAJI; BAKHSHANDEH, 2020; DEENE, 2022; XIE et al., 2020; MATHER et al., 2002). Esse resultado sugere que, nas condições experimentais adotadas para o Método 1, a reprodutibilidade e a precisão ainda são insuficientes para caracterizar de forma confiável a resposta da velocidade ultrassônica à dose absorvida.

Figura 7.4 – Velocidade longitudinal em função da dose absorvida, obtida pelo método de contato.



De modo geral, os resultados obtidos com o Método 1 mostraram que o sistema foi capaz de reproduzir tendências coerentes com a concentração nas amostras de calibração, especialmente para a velocidade longitudinal. No entanto, para as amostras irradiadas, os resultados evidenciaram limitações importantes de reprodutibilidade experimental, particularmente para a velocidade em função da dose. Além disso, deve-se considerar que, na etapa de irradiação dessas amostras, a região de *build-up* não foi explicitamente

contemplada na geometria adotada, o que pode ter contribuído para perfis de dose menos homogêneos no volume do gel. Em conjunto, esses fatores indicam que as limitações observadas decorrem tanto das condições de aquisição ultrassônica quanto das condições de irradiação, motivando a investigação das configurações experimentais alternativas apresentadas nos Métodos 2 e 3.

## 7.2 Método 2: Transdutor de imersão no modo pulso-eco

A aplicação do método pulso-eco com transdutor de imersão permitiu obter medições estáveis e reprodutíveis dos parâmetros acústicos das amostras de calibração. O uso do tanque acústico proporcionou um acoplamento mais uniforme e maior estabilidade dos sinais, quando comparado ao método de acoplamento direto, reduzindo as flutuações associadas ao contato mecânico e facilitando a identificação dos tempos característicos.

As medições foram realizadas após o estabelecimento do equilíbrio térmico entre as amostras e a água do tanque acústico, monitorada em torno de 23 °C nas aquisições iniciais. Ressalta-se que não houve controle térmico ativo da água do tanque, e que parte das medições foi realizada em dias distintos, com temperaturas ligeiramente diferentes. Por esse motivo, a temperatura deve ser entendida como variável monitorada experimentalmente, e não como condição rigidamente controlada.

Esse procedimento é importante, uma vez que a velocidade de propagação do som depende da temperatura, e pequenas variações térmicas podem levar a diferenças nos valores absolutos medidos. Observou-se que, uma vez atingido o equilíbrio térmico, os resultados apresentaram boa reprodutibilidade e mantiveram comportamento consistente entre repetições sucessivas.

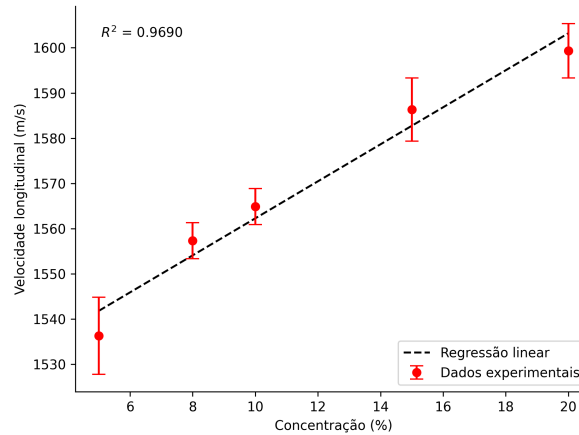
### 7.2.1 Velocidade de propagação

A Figura 7.5 apresenta a velocidade longitudinal média em função da concentração das amostras de calibração, com barras de erro correspondentes à dispersão experimental observada entre as medições repetidas.

Observa-se uma tendência geral de aumento da velocidade à medida que aumenta a concentração de gelatina, comportamento esperado em materiais à base de gel, em que o aumento da concentração está associado à rigidez efetiva do meio. Embora pequenas variações sejam observadas entre pontos consecutivos, a tendência global é crescente, o que indica coerência física dos resultados.

A análise da dispersão experimental mostrou que a variabilidade entre medições sucessivas foi superior à contribuição instrumental estimada a partir da resolução temporal do osciloscópio, indicando que as principais fontes de incerteza estão relacionadas às condi-

Figura 7.5 – Velocidade de propagação longitudinal do ultrassom em função da concentração das amostras de calibração, obtida pelo Método 2. Os pontos representam os valores médios das medições; com barras de erro correspondentes à dispersão experimental observada entre as medições repetidas; e a linha contínua indica o ajuste linear.

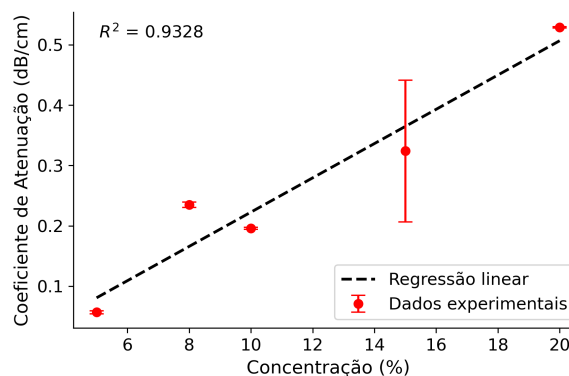


ções experimentais, como pequenas variações de alinhamento, estabilidade do acoplamento acústico e flutuações do sinal.

## 7.2.2 Coeficiente de atenuação

Os resultados obtidos para o coeficiente de atenuação são apresentados na Figura 7.6. Observa-se aumento global da atenuação com a concentração das amostras, compatível com uma tendência aproximadamente linear no intervalo investigado.

Figura 7.6 – Coeficiente de atenuação ultrassônica em função da concentração das amostras de calibração, obtido pelo Método 2. Os pontos representam os valores médios das medições; barras de erro correspondentes à dispersão experimental observada entre as medições repetidas; e a linha contínua indica o ajuste linear.



A relação aproximadamente linear entre atenuação e concentração indica que esse parâmetro apresenta maior sensibilidade às modificações estruturais do meio, o que está de acordo com o comportamento esperado para materiais viscoelásticos, nos quais o aumento

da fração de gelatina implica maior dissipação de energia acústica por mecanismos de absorção e de espalhamento.

Assim como observado para a velocidade, a análise das incertezas mostrou que a dispersão experimental foi a principal contribuição para a incerteza total, enquanto a contribuição instrumental foi relativamente pequena em comparação com a variabilidade entre medições.

Observou-se, a partir dos dados da Tabela 7.1, que a velocidade longitudinal apresenta tendência linear de aumento com a concentração de gelatina. Esse comportamento é esperado para géis aquosos, uma vez que o aumento da fração sólida eleva a rigidez efetiva do meio e, conseqüentemente, a velocidade de propagação ultrassônica. A inclinação positiva da curva de velocidade em função da concentração indica que a variação da composição do gel exerce influência sistemática e mensurável sobre as propriedades acústicas do material, confirmando a sensibilidade do método empregado para discriminar pequenas diferenças de concentração entre as amostras.

O coeficiente de atenuação também apresentou variação com a concentração, embora com maior dispersão em relação à velocidade. Esse comportamento é compatível com a literatura, uma vez que a atenuação é mais sensível a pequenas heterogeneidades, microbolhas residuais e variações locais de estrutura, além de depender de múltiplos mecanismos de dissipação, como a absorção e o espalhamento.

Além disso, verificaram-se diferenças entre medições realizadas com variações de aproximadamente 1 a 2 °C na temperatura da água, bem como em função do tempo de imersão das amostras. As medições a aproximadamente 23 °C foram realizadas inicialmente e, no dia seguinte, as mesmas amostras foram medidas a aproximadamente 21 °C. Embora a variação térmica seja relativamente pequena, a permanência adicional das amostras em meio aquoso pode ter favorecido a hidratação gradual do gel, especialmente em casos de vedação não completamente eficiente. Esse processo tende a alterar ligeiramente as propriedades mecânicas e acústicas do material, podendo contribuir para a redução ou dispersão dos valores medidos.

A comparação direta entre pares de medições indica que, em alguns casos, as diferenças observadas na velocidade longitudinal superam as esperadas apenas pela variação de temperatura nessa faixa, sugerindo que o estado de hidratação das amostras também influenciou os resultados. Como a geometria experimental foi mantida constante — com o transdutor rigidamente fixado, posicionamento reprodutível das amostras e cuidado na eliminação de bolhas de ar ao longo do trajeto do feixe ultrassônico —, as variações observadas são atribuídas predominantemente às propriedades físicas do material e às condições ambientais, e não às instabilidades do sistema de aquisição.

Dessa forma, a análise quantitativa baseou-se nos valores médios das medições para

Tabela 7.1 – Valores medidos da velocidade longitudinal e do coeficiente de atenuação para amostras de gel em diferentes concentrações, obtidos em duas condições de temperatura da água (aproximadamente 21 e 23 °C). As medições foram realizadas em momentos distintos utilizando a mesma configuração experimental.

Concentração (%)	Temperatura (°C)	Velocidade Longitudinal (m/s)	Coeficiente de atenuação (dB/cm)
5	21,870	1479,570	0,222
	23,570	1536,320	0,057
8	21,600	1525,190	0,356
	23,550	1557,340	0,235
10	21,940	1540,960	0,355
	23,600	1564,880	0,196
15	22,000	1527,530	0,542
	23,590	1586,320	0,324
20	22,050	1563,860	0,904
	23,600	1599,300	0,529

cada concentração, buscando reduzir a influência da variabilidade experimental associada às condições térmicas e ao tempo de imersão. Ainda assim, esses valores médios devem ser interpretados com cautela, uma vez que parte da dispersão observada reflete diferenças reais entre aquisições realizadas em momentos distintos.

### 7.2.3 Medições em amostras irradiadas

Foram realizadas medições em amostras de gel dosimétrico submetidas a diferentes condições de irradiação, incluindo uma amostra controle (0 Gy) e outra irradiada com 40 Gy. Para a velocidade de propagação do som, foram obtidos valores de aproximadamente 1538 m/s para a amostra controle e 1565 m/s para a amostra irradiada. Esse aumento da velocidade com a dose é qualitativamente compatível com resultados reportados na literatura para géis poliméricos do tipo MAGIC, nos quais a polimerização induzida pela radiação provoca aumento das propriedades mecânicas do material e, conseqüentemente, da velocidade de propagação ultrassônica (MATHER et al., 2002; BALDOCK et al., 2010; DHAKAL; YOSOFVAND; MOUSSA, 2021).

Em relação ao coeficiente de atenuação, foram obtidos valores de 0,58 dB/cm para a amostra controle e de 2,36 dB/cm para a amostra irradiada com 40 Gy, evidenciando um aumento significativo da atenuação com a dose absorvida. Trabalhos anteriores relatam comportamento semelhante, com aumento da atenuação em função da dose e elevada sensibilidade dos parâmetros acústicos às alterações estruturais do gel após a irradiação, associada ao aumento da viscosidade e das perdas viscoelásticas do material (MATHER et al., 2002; CAVEDINI et al., 2022b). De modo geral, os valores obtidos neste trabalho apresentaram ordem de grandeza e tendências compatíveis com as observadas na literatura, o que indica a consistência dos resultados experimentais.

De modo geral, as medições realizadas pelo Método 2 apresentaram boa consistência

interna, comportamento físico coerente com o esperado e sensibilidade suficiente para distinguir variações tanto na concentração das amostras quanto nas condições de irradiação.

Os resultados obtidos indicam que o sistema ultrassônico empregado apresenta potencial para utilização como leitor dosimétrico, uma vez que os parâmetros acústicos medidos, em especial o coeficiente de atenuação, mostraram sensibilidade às variações de concentração e de dose absorvida, além de comportamento consistente com o descrito na literatura para géis poliméricos.

Entretanto, durante a realização dos experimentos, foram observadas variações nos valores medidos entre repetições realizadas em momentos distintos. Essas variações foram atribuídas principalmente à permanência das amostras em meio aquoso por períodos prolongados, o que pode levar a alterações graduais em suas propriedades, bem como a pequenas diferenças nas condições experimentais e térmicas.

Diante dessas limitações, buscou-se investigar um arranjo experimental alternativo que permitisse reduzir o tempo de imersão das amostras e minimizar as variações associadas à hidratação e às condições de aquisição. Assim, foi desenvolvido e testado um terceiro método experimental, descrito na seção seguinte.

### 7.3 Método 3: Transdutores de imersão no modo de transmissão

Conforme discutido na seção anterior, o método baseado em transdutor de imersão apresentou resultados consistentes e sensíveis às variações de concentração e de dose. Entretanto, foram observadas variações nos valores medidos ao longo do tempo, atribuídas principalmente à permanência das amostras em meio aquoso e às condições experimentais associadas ao processo de aquisição.

Diante dessas limitações, foi desenvolvido um arranjo experimental alternativo baseado no modo de transmissão, no qual o tempo de imersão das amostras é reduzido. O objetivo foi minimizar os efeitos associados à hidratação e às variações temporais das propriedades do gel, visando maior estabilidade e reprodutibilidade das medições.

Os resultados obtidos com esse arranjo são apresentados a seguir, inicialmente para as amostras de calibração e, em seguida, para as amostras irradiadas, permitindo avaliar a sensibilidade do método tanto à concentração quanto à dose absorvida.

#### 7.3.1 Amostras de calibração

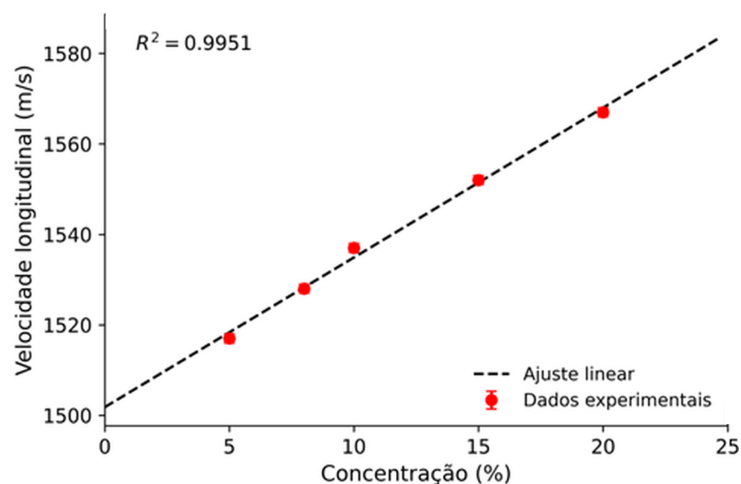
Os experimentos de calibração com géis homogêneos permitiram estabelecer relações entre a concentração de gelatina e os parâmetros acústicos medidos. A Figura 7.7 apresenta a velocidade de propagação longitudinal em função da concentração, enquanto a Figura 7.8 mostra o coeficiente de atenuação correspondente.

Observa-se que, no intervalo de concentrações analisado, tanto a velocidade de propagação do ultrassom quanto o coeficiente de atenuação aumentam progressivamente com a concentração do gel. Esse comportamento pode ser adequadamente descrito por um ajuste linear, não havendo evidência experimental de mudanças de regime que justificassem a adoção de modelos não lineares.

Os valores de velocidade de propagação determinados neste trabalho (1517–1568 m/s) são compatíveis com os reportados na literatura para materiais simuladores de tecido, permanecendo próximos do valor de referência frequentemente adotado no ultrassom diagnóstico (1540 m/s). Trabalhos prévios com materiais simuladores gelatinosos e poliméricos reportam velocidades longitudinais na faixa de aproximadamente 1500 a 1600 m/s e coeficientes de atenuação crescentes com a concentração do material, em concordância com a ordem de grandeza observada neste estudo (MASOUMI et al., 2016; VIEIRA et al., 2019; BADAWE et al., 2024).

Ressalta-se que, no presente estudo, o coeficiente de atenuação é expresso em dB/cm para a frequência central fixa de 2,25 MHz, enquanto alguns trabalhos da literatura reportam valores normalizados por frequência (dB/cm · MHz). Estudos com materiais gelatinosos e simuladores de tecido também indicam aumento do coeficiente de atenuação com a concentração e com a frequência de operação (MASOUMI et al., 2016; BADAWE et al., 2024).

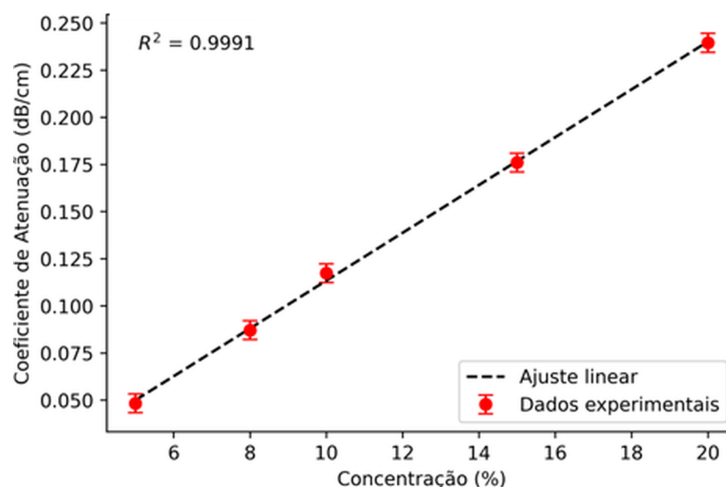
Figura 7.7 – Velocidade de propagação longitudinal do ultrassom em função da concentração do gel. As barras de erro correspondem ao desvio padrão das medições repetidas



Os resultados apresentados indicam que a variação da concentração influencia diretamente os parâmetros acústicos de propagação. Esses parâmetros estão diretamente relacionados às propriedades mecânicas do material, uma vez que a velocidade de propagação das ondas depende dos módulos elásticos e da densidade do meio.

A velocidade transversal foi estimada a partir da relação percentual  $c_T/c_L$ , obtida

Figura 7.8 – Coeficiente de atenuação ultrassônica em função da concentração do gel. As barras de erro correspondem ao desvio padrão das medições repetidas.



com base em valores reportados na literatura para materiais gelatinosos com propriedades mecânicas semelhantes. Os valores utilizados e as velocidades transversais estimadas são apresentados na Tabela 7.2.

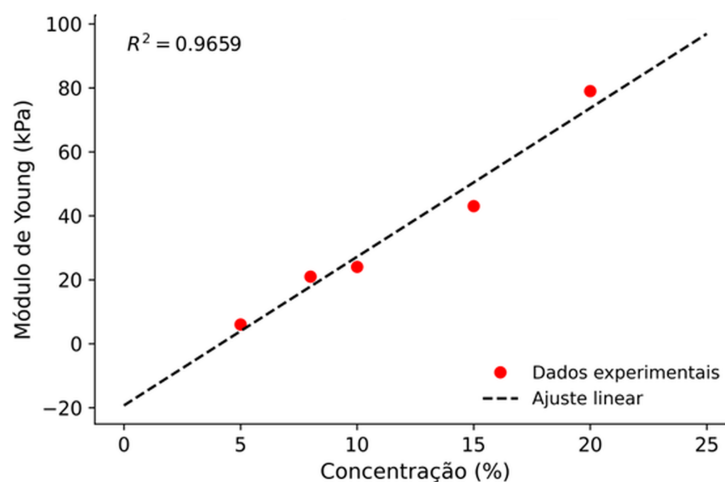
Tabela 7.2 – Valores de concentração do gel, velocidade longitudinal, relação percentual entre as velocidades transversais e longitudinais e velocidade transversal estimada.

Concentração (%)	$c_L$ (m/s)	$c_T/c_L$ (%)	$c_T$ (m/s)
5	1516,85	0,09	1,36
8	1527,97	0,17	2,59
10	1537,40	0,18	2,76
15	1551,57	0,24	3,72
20	1567,73	0,32	5,01

Observa-se que a velocidade transversal aumenta com a concentração, o que reflete a rigidez efetiva do material. A partir desses valores, estimaram-se os módulos elásticos, sendo o módulo de Young calculado com base nas relações entre os módulos longitudinal, transversal e volumétrico.

Embora o material seja composto majoritariamente por água e gelatina, o processo de gelificação resulta na formação de uma rede tridimensional estabilizada por interações intermoleculares. Nessas condições, o aumento da concentração favorece a elevação da rigidez efetiva do meio. Como os hidrogéis podem ser tratados, em primeira aproximação, como materiais quase incompressíveis, o aumento da velocidade transversal estimada implica aumento do módulo de cisalhamento e, conseqüentemente, do módulo de Young, conforme mostrado na Figura 7.9.

Figura 7.9 – Módulo de Young estimado em função da concentração do gel.



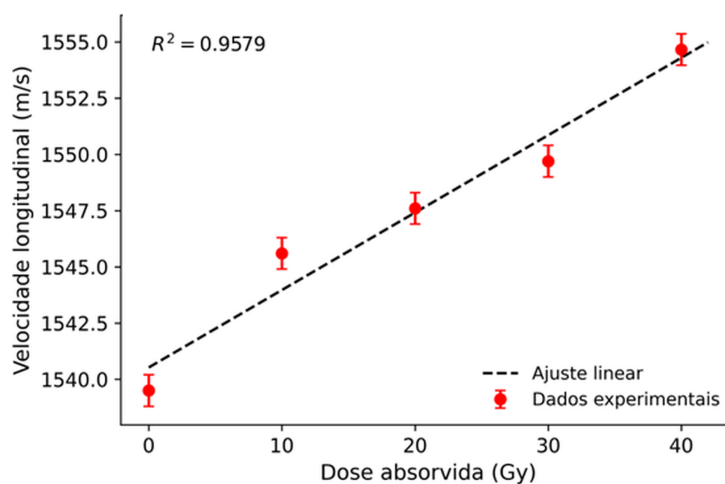
### 7.3.2 Amostras irradiadas

Os resultados experimentais da velocidade ultrassônica longitudinal em função da dose absorvida são apresentados na Figura 7.10. As incertezas experimentais foram da ordem de 0,7 m/s para todas as doses, sendo determinadas principalmente pela resolução temporal do sistema de aquisição e pela repetibilidade da determinação do tempo de voo.

Observa-se um aumento sistemático da velocidade longitudinal com a dose absorvida ao longo do intervalo investigado. Esse comportamento é consistente com estudos prévios que investigaram a sensibilidade de parâmetros ultrassônicos à dose em géis poliméricos e pode ser associado ao aumento da rigidez efetiva do material decorrente do processo de polimerização induzido pela radiação.

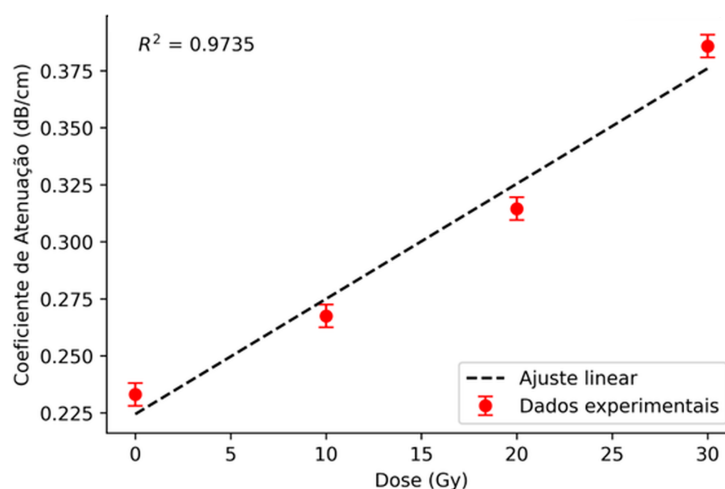
Embora a densidade do gel possa sofrer pequenas variações com a dose, estudos indicam que tais variações são desprezíveis em comparação às observadas nos módulos elásticos.

Figura 7.10 – Velocidade de propagação longitudinal do ultrassom em função da dose absorvida para as amostras irradiadas de gel MAGIC-F. As barras de erro correspondem ao desvio padrão das medições repetidas.



O coeficiente de atenuação apresentou dispersão experimental da ordem de 0,05 dB/cm, dominada pelas flutuações nas amplitudes dos sinais transmitidos. A Figura 7.11 mostra aumento do coeficiente de atenuação com a dose absorvida no intervalo analisado. Embora os pontos entre 0 e 30 Gy sugiram crescimento monotônico, a ausência do ponto correspondente a 40 Gy nessa figura impede discutir de forma conclusiva eventual mudança de regime em doses mais elevadas.

Figura 7.11 – Coeficiente de atenuação ultrassônica em função da dose absorvida do gel MAGIC-F. As barras de erro correspondem ao desvio padrão das medições repetidas.



Como observado nas amostras de calibração, os parâmetros acústicos permitem estimar propriedades mecânicas efetivas do material dentro das hipóteses adotadas no modelo, devendo esses valores ser interpretados como estimativas comparativas e não como validações absolutas independentes das propriedades mecânicas.

A velocidade transversal foi estimada a partir da relação percentual  $c_T/c_L$ , obtida com base em valores reportados na literatura para géis poliméricos MAGIC e MAGIC-F (VIEIRA et al., 2019). Os valores utilizados e as velocidades transversais estimadas são apresentados na Tabela 7.3.

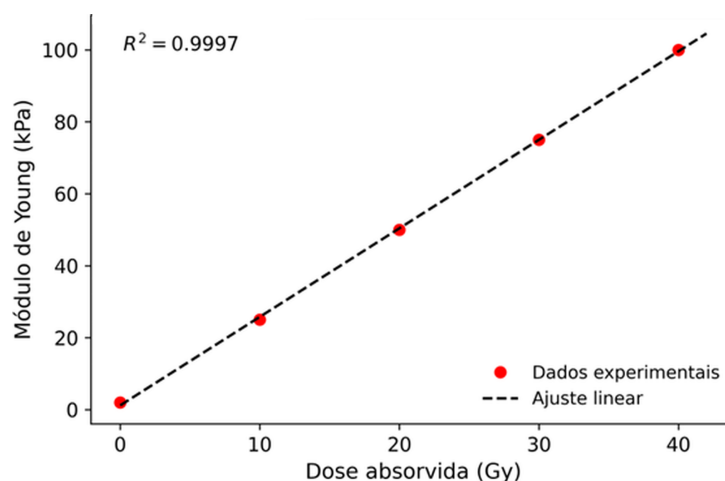
Tabela 7.3 – Relação percentual entre as velocidades transversais e longitudinais e a velocidade transversal estimada para as amostras irradiadas de gel MAGIC-F.

Dose (Gy)	$c_L$ (m/s)	$c_T/c_L$ (%)	$c_T$ (m/s)
0	1539,48	0,05	0,73
10	1545,61	0,19	2,93
20	1547,55	0,27	4,13
30	1549,72	0,32	5,05
40	1554,66	0,37	5,79

Com base nesses valores, estimaram-se os módulos elásticos do material. O módulo de Young apresentou variação pronunciada com a dose absorvida, atingindo um aumento

superior a uma ordem de grandeza entre 0 e 40 Gy, conforme mostrado na Figura 7.12. Esse resultado evidencia que parâmetros mecânicos derivados de medições ultrassônicas podem atuar como indicadores indiretos da dose absorvida.

Figura 7.12 – Módulo de Young estimado em função da dose absorvida para as amostras irradiadas de gel MAGIC-F.



Cabe destacar que, neste estudo, utilizou-se uma única amostra independente por nível de dose, sendo as barras de erro obtidas a partir da repetibilidade instrumental das aquisições realizadas em cada amostra, e não de replicação amostral entre diferentes preparações. Dessa forma, as análises estatísticas têm caráter descritivo, e a confirmação quantitativa de possíveis transições de comportamento em doses mais elevadas requer estudos futuros com replicação amostral por dose.

De modo geral, os resultados indicam que o sistema ultrassônico desenvolvido é capaz de detectar alterações nas propriedades do gel associadas à concentração e à dose absorvida, confirmando a viabilidade da técnica como ferramenta de caracterização e com potencial para aplicação em dosimetria.

Em conjunto, os resultados apresentados ao longo deste capítulo indicam que as medições ultrassônicas foram capazes de detectar variações sistemáticas nos parâmetros acústicos dos géis em função da concentração e, no caso do Método 3, também em função da dose absorvida. No que se refere às propriedades mecânicas estimadas, os resultados devem ser interpretados como consistentes com as hipóteses do modelo adotado e úteis para análise comparativa interna, sem que isso implique validação absoluta dessas propriedades para o material.

Além disso, a comparação entre diferentes arranjos experimentais permitiu identificar as principais fontes de incerteza e as limitações práticas associadas às medições, contribuindo para o aperfeiçoamento do sistema e para a definição de procedimentos mais robustos. Esses aspectos, bem como as implicações dos resultados obtidos e as perspectivas para trabalhos futuros, serão discutidos de forma integrada no capítulo de conclusões.

Ressalta-se que os três métodos foram aplicados a conjuntos equivalentes de amostras de calibração, preparados com as mesmas concentrações nominais, de modo a permitir comparação qualitativa entre os diferentes arranjos experimentais. Contudo, como as aquisições foram realizadas em condições experimentais distintas e com procedimentos específicos de cada método, a comparação entre eles deve ser interpretada principalmente em termos de sensibilidade, estabilidade e reprodutibilidade relativa.

Parte IV

Conclusão

## 8 Conclusões

O presente trabalho teve como objetivo investigar a aplicabilidade de técnicas ultrassônicas na análise de dosímetros em gel polimérico MAGIC-F, avaliando a sensibilidade de parâmetros acústicos, como a velocidade de propagação e o coeficiente de atenuação, em função da concentração e da dose absorvida, bem como comparar diferentes configurações experimentais de aquisição.

A etapa inicial foi dedicada ao desenvolvimento e à validação experimental de um sistema ultrassônico para leitura de géis dosimétricos. Os ensaios de calibração com amostras homogêneas de gelatina evidenciaram comportamento aproximadamente linear da velocidade ultrassônica e do coeficiente de atenuação em função da concentração, confirmando a sensibilidade do sistema à caracterização acústica de meios gelatinosos.

A verificação qualitativa por ressonância magnética permitiu confirmar a resposta do gel à irradiação e avaliar a homogeneidade das amostras, fornecendo uma referência para a interpretação dos resultados ultrassônicos.

A comparação entre os métodos de aquisição evidenciou diferenças importantes em termos de estabilidade e reprodutibilidade. O método por contato apresentou maior simplicidade experimental, porém maior sensibilidade a fatores como alinhamento, acoplamento acústico e variações térmicas, resultando em maior dispersão dos dados. O método de imersão no modo pulso-eco proporcionou medições mais estáveis e reprodutíveis, enquanto o método em modo de transmissão–recepção apresentou os resultados mais consistentes, ao reduzir efeitos associados a múltiplas reflexões e ao tempo de interação das amostras com o meio de imersão.

Para as amostras irradiadas, observou-se aumento da velocidade ultrassônica longitudinal e do coeficiente de atenuação com a dose absorvida, comportamentos coerentes com o processo de polimerização induzido pela radiação e com resultados reportados na literatura. No entanto, considerando a ausência de replicação amostral independente por dose e a predominância da variabilidade experimental, esses resultados devem ser interpretados de forma descritiva.

Entre os parâmetros avaliados, o coeficiente de atenuação apresentou maior sensibilidade às variações induzidas pela radiação, embora com maior dispersão experimental, enquanto a velocidade de propagação mostrou maior estabilidade, podendo atuar como parâmetro complementar.

De modo geral, os resultados demonstram o potencial do ultrassom como ferramenta complementar à ressonância magnética na leitura de dosímetros gel poliméricos, especialmente em contextos com acesso limitado à RM. A análise dos arranjos experimentais permitiu ainda identificar as principais fontes de incerteza, como variações térmicas, estado

de hidratação das amostras e condições de alinhamento.

Com base nos resultados obtidos, conclui-se que o método de transmissão–recepção apresenta o melhor desempenho global entre os métodos investigados, devido à maior estabilidade experimental e consistência dos resultados. Entretanto, sua aplicação requer maior complexidade experimental, enquanto o método por contato pode ser vantajoso em situações onde a simplicidade operacional é prioritária.

Como perspectivas futuras, destacam-se a implementação de controle térmico mais rigoroso, a realização de experimentos com replicação amostral independente, a investigação da dependência com a frequência ultrassônica e a validação quantitativa dos resultados por meio de comparações diretas com técnicas estabelecidas, como a ressonância magnética.

Dessa forma, este trabalho contribui para a compreensão da resposta acústica de géis dosimétricos e demonstra a viabilidade do uso do ultrassom como ferramenta promissora para a caracterização desses materiais.

Além disso, a aplicação de abordagens de validação independente, como testes cegos baseados em curvas de calibração, pode contribuir para a consolidação do método como ferramenta quantitativa em dosimetria.

# Referências

- ATKINS, T. J. et al. Investigation of ultrasonic properties of magic gels for pulse-echo gel dosimetry. In: IOP PUBLISHING. *Journal of Physics: Conference Series*. [S.l.], 2010. v. 250, n. 1, p. 012075. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 26.
- AZADEH, P. et al. Evaluation of magic-f polymer gel dosimeter for dose profile measurement in small fields and stereotactic irradiation. *Radiation Physics and Chemistry*, Elsevier, v. 194, p. 109991, 2022. Citado na página 25.
- BADAWI, H. M. et al. High-resolution acoustic mapping of tunable gelatin-based soft phantoms. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, v. 12, p. 1276143, 2024. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 75.
- BALDOCK, C. et al. Polymer gel dosimetry. *Physics in Medicine & Biology*, IOP Publishing, v. 55, n. 5, p. R1, 2010. Citado 4 vezes nas páginas 23, 24, 25 e 73.
- BRAY, F. et al. Global cancer statistics 2022: Globocan estimates of incidence and mortality worldwide for 36 cancers in 185 countries. *CA: a cancer journal for clinicians*, Wiley Online Library, v. 74, n. 3, p. 229–263, 2024. Citado na página 17.
- BUSHBERG, J. T.; BOONE, J. M. *The essential physics of medical imaging*. [S.l.]: Lippincott Williams & Wilkins, 2011. Citado na página 27.
- BUSHONG, S. C. *Radiologic Science for Technologists*. [S.l.]: Mosby, 1994. Citado na página 23.
- CAVEDINI, L. et al. Magnetic resonance readout of magic-f polymer gel dosimeters. *Radiation Physics and Chemistry*, 2022. Citado na página 18.
- CAVEDINI, N. G. et al. Dose sensitivity of magic-f polymer gel using different mri sequences. *Brazilian Journal of Radiation Sciences*, v. 10, n. 4, 2022. Citado na página 73.
- CHEN, H. et al. Ultrasound-based techniques for mechanical characterization of soft materials. *Ultrasonics*, v. 120, p. 106656, 2022. Citado na página 51.
- COSTA, Y. L. S. e. Monografia de Graduação, *Estudo de técnicas para medição da velocidade de propagação do som em líquidos*. João Monlevade: [s.n.], 2022. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 28.
- de Carvalho, I. M. et al. polyvinyl chloride plastisol breast phantoms for ultrasound imaging. *Ultrasonics*, 2016. Citado na página 29.
- De Matheo, L. L. et al. pvcp-based anthropomorphic breast phantoms containing structures similar to lactiferous ducts for ultrasound imaging: a comparison with human breasts. *Ultrasonics*, v. 90, p. 144–152, 2018. Citado na página 29.
- DEENE, Y. D. Essential characteristics of polymer gel dosimeters. In: IOP PUBLISHING. *Journal of Physics: Conference Series*. [S.l.], 2004. v. 3, n. 1, p. 34. Citado na página 23.
- DEENE, Y. D. Radiation dosimetry by use of radiosensitive hydrogels and polymers: Mechanisms, state-of-the-art and perspective from 3d to 4d. *Gels*, v. 8, n. 9, p. 599, sep 2022. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 69.

- DEENE, Y. D. Gel dosimetry: Mri. In: IOP PUBLISHING. *Journal of Physics: Conference Series*. [S.l.], 2023. v. 2630, n. 1, p. 012003. Citado na página 25.
- DEENE, Y. D.; JIRASEK, A. Uncertainty in 3d gel dosimetry. *Journal of Physics: Conference Series*, v. 573, p. 012008, jan 2015. Citado na página 18.
- DEENE, Y. D.; VANDECASTEELE, J. On the reliability of 3d gel dosimetry. *Journal of Physics: Conference Series*, v. 444, p. 012015, jun 2013. Citado na página 18.
- DEENE, Y. D. et al. Dose–response stability and integrity of the dose distribution of various polymer gel dosimeters. *Physics in Medicine & Biology*, v. 47, n. 14, p. 2459–2470, jul 2002. Citado na página 23.
- DEENE, Y. D. et al. The fundamental radiation properties of normoxic polymer gel dosimeters: a comparison between a methacrylic acid based gel and acrylamide based gels. *Physics in Medicine & Biology*, IOP Publishing, v. 51, n. 3, p. 653, 2006. Citado na página 25.
- DHAKAL, R.; YOSOFVAND, M.; MOUSSA, H. Development and application of magic-f gel in cancer research and medical imaging. *Applied Sciences*, v. 11, n. 17, p. 7783, 2021. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 73.
- DOYAN, A. et al. Trend research of polymer gel dosimetry: A systematic review. *Journal of Material Science and Radiation*, v. 1, n. 1, p. 21–28, 2025. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 28.
- ELMINA, B. C. F. et al. Precise measurement of sound speed in hydrogel tissue-mimicking material by a through-transmission method. *Journal of the Korean Physical Society*, Springer, v. 81, n. 10, p. 921–930, 2022. Citado na página 27.
- FARAJOLLAHI, A. et al. The basic radiation properties of the n-isopropylacrylamide based polymer gel dosimeter. *International Journal of Radiation Research*, 2014. Citado na página 25.
- FERNANDES, J. P. et al. Magic-f polymer gel for radiation dosimetry. *Radiation Measurements*, 2009. Citado na página 19.
- FERNANDES, J. P. et al. Formaldehyde increases magic gel dosimeter melting point and sensitivity. In: IOP PUBLISHING. *Journal of Physics: Conference Series*. [S.l.], 2009. v. 164, n. 1, p. 012004. Citado na página 36.
- FONG, P. M. et al. Polymer gels for magnetic resonance imaging of radiation dose distributions at normal room atmosphere. *Physics in Medicine & Biology*, IOP Publishing, v. 46, n. 12, p. 3105, 2001. Citado na página 36.
- GOHARPEY, N.; MOKHTARI-DIZAJI, M.; BAKHSHANDEH, M. A novel ultrasonic gel phantom dosimetry for evaluation of the dose response. *Journal of the Korean Physical Society*, Springer, v. 77, n. 12, p. 1238–1247, 2020. Citado na página 69.
- HAMANN, J. H.; PEIXOTO, J. G. P. Polymerization mechanisms of the gel dosimeter type npag by high energy x radiation and response curve determination employing trs 398. *Brazilian Journal of Radiation Sciences*, v. 9, n. 2C (Suppl.), 2021. Citado na página 18.

- HILTS, M. et al. Polymer gel dosimetry using x-ray computed tomography: a feasibility study. *Physics in Medicine & Biology*, IOP Publishing, v. 45, n. 9, p. 2559, 2000. Citado na página 25.
- JAVAHERI, N. et al. Improvement of sensitivity of x-ray ct reading method for polymer gel in radiation therapy. *Reports of Practical Oncology & Radiotherapy*, Elsevier, v. 25, n. 1, p. 100–103, 2020. Citado na página 25.
- JÚNIOR, J. F. S. C.; PEREIRA, W. C. d. A.; LIMA, K. M. M. e. Elastografia ultrassônica: Conceito, princípios de funcionamento, aplicações clínicas e impacto na sociedade. In: *Novas Tecnologias Aplicadas à Saúde*. [S.l.]: EDUERN, 2019. Citado na página 19.
- KHAN, F. M.; GIBBONS, J. P. *The Physics of Radiation Therapy*. 5. ed. [S.l.]: Lippincott Williams & Wilkins, 2014. Citado na página 17.
- LIU, Y. et al. Ultrasonic methods for material characterization: A review. *Measurement*, v. 179, p. 109464, 2021. Citado na página 29.
- LUBBERS, J.; FLETCHER, C. A. J. A simple and accurate formula for the sound velocity in water. *Ultrasonics*, v. 36, p. 79–82, 1998. Citado na página 27.
- MARYANSKI, M.; ZASTAVKER, Y.; GORE, J. Radiation dose distributions in three dimensions from tomographic optical density scanning of polymer gels: II. optical properties of the bang polymer gel. *Physics in Medicine & Biology*, IOP Publishing, v. 41, n. 12, p. 2705, 1996. Citado na página 25.
- MASOUMI, H. et al. Determine the dose distribution using ultrasound parameters in magic-f polymer gels. *Dose-Response*, SAGE Publications Sage CA: Los Angeles, CA, v. 14, n. 1, p. 1559325815625647, 2016. Citado 5 vezes nas páginas 25, 26, 29, 69 e 75.
- MATHER, M. L. et al. Investigation of ultrasonic properties of pag and magic polymer gel dosimeters. *Physics in Medicine & Biology*, IOP Publishing, v. 47, n. 24, p. 4397, 2002. Citado 5 vezes nas páginas 25, 26, 51, 69 e 73.
- MCJURY, M. et al. Radiation dosimetry using polymer gels: methods and applications. *The British Journal of Radiology*, The British Institute of Radiology, v. 73, n. 873, p. 919–929, 2000. Citado na página 24.
- MEZIRI, M. et al. In vitro chronic hepatic disease characterization with a multiparametric ultrasonic approach. *Ultrasonics*, Elsevier, v. 43, n. 5, p. 305–313, 2005. Citado na página 27.
- ODIAN, G. *Principles of Polymerization*. 4. ed. [S.l.]: Wiley, 2004. Citado na página 18.
- ODONNELL, M.; JAYNES, E.; MILLER, J. Kramers-kronig relationship between ultrasonic attenuation and phase velocity. *Acoustical Society of America, Journal*, v. 69, p. 696–701, 1981. Citado na página 27.
- OLDHAM, M. et al. High resolution gel-dosimetry by optical-ct and mr scanning. *Medical physics*, Wiley Online Library, v. 28, n. 7, p. 1436–1445, 2001. Citado na página 25.
- PAVONI, J. F.; BAFFA, O. An evaluation of dosimetric characteristics of magic gel modified by adding formaldehyde (magic-f). *Radiation Measurements*, v. 47, n. 11-12, p. 1074–1082, 2012. Citado na página 19.

- PAVONI, J. F. et al. Applications of polymer gel dosimetry in radiotherapy. *Radiation Measurements*, 2010. Citado na página 19.
- PETERS, F.; PETIT, L. A broad band spectroscopy method for ultrasound wave velocity and attenuation measurement in dispersive media. *Ultrasonics*, Elsevier, v. 41, n. 5, p. 357–363, 2003. Citado na página 28.
- PODGORSKAK, E. B. *Radiation Oncology Physics: A Handbook for Teachers and Students*. [S.l.]: IAEA, 2005. Citado na página 17.
- SALMAN, M. D. et al. A novel 3d polymer gel dosimeter based on polymethyl methacrylate gel (pmmag) for radiotherapy: ultrasonic evaluation. *Radiation Physics and Chemistry*, Elsevier, v. 226, p. 112286, 2025. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 19.
- SILVA, A. L. Q. R. d. *Dosimetria gel polimérica usando imagem de ressonância magnética para aplicação em radioterapia*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2018. Citado na página 24.
- TABERLET, N. et al. How tall can gelatin towers be? an introduction to elasticity and buckling. *American Journal of Physics*, AIP Publishing, v. 85, n. 12, p. 908–914, 2017. Citado na página 67.
- TRAPP, J. et al. An experimental study of the dose response of polymer gel dosimeters imaged with x-ray computed tomography. *Physics in Medicine & Biology*, IOP Publishing, v. 46, n. 11, p. 2939, 2001. Citado na página 25.
- VANDECASTEELE, J.; DEENE, Y. D. On the validity of 3d polymer gel dosimetry: I. reproducibility study. *Physics in Medicine & Biology*, v. 58, n. 1, p. 19–42, dec 2012. Citado na página 18.
- VIEIRA, S. L. et al. Quantitative magnetic resonance elastography for polymer-gel dosimetry phantoms. *Medical Engineering & Physics*, v. 66, p. 102–106, 2019. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 75.
- VIEIRA, S. L. et al. paraffin-gel tissue-mimicking material for ultrasound-guided needle biopsy phantom. *Ultrasound in Medicine and Biology*, v. 39, n. 12, p. 2477–2484, 2013. Citado na página 29.
- WAGTER, C. D. The ideal dosimeter for 3d dose verification. *Radiotherapy and Oncology*, 2004. Citado na página 17.
- XIE, W.-H. et al. Radiotherapy dose characterization of gel dosimetry using shear wave elasticity imaging. *Medical Physics*, Wiley Online Library, v. 47, n. 3, p. 1404–1410, 2020. Citado na página 69.
- ZELL, K. et al. acoustical properties of selected tissue phantom materials for ultrasound imaging. *Physics in Medicine and Biology*, v. 52, n. 20, p. N475–N484, 2007. Citado na página 29.
- ZHANG, X. et al. Ultrasonic evaluation of elastic properties in polymer and hydrogel materials. *Polymer Testing*, v. 76, p. 46–52, 2019. Citado na página 51.