REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 28/01/2026 - **Accepted:** 08/02/2026
Vol: 02.02
DOI: 10.66104/gdzzdb84
Pages: 1-37

MEDIÇÕES ACÚSTICO-ELÁSTICAS DA DOSE ABSORVIDA EM DOSÍMETRO DE GEL POLIMÉRICO COMO MATERIAL SIMULADOR DE TECIDO MOLE

ACOUSTIC-ELASTIC MEASUREMENTS OF ABSORBED DOSE USING POLYMER GEL DOSIMETER AS SOFT TISSUE-MIMICKING MATERIAL

MEDIDAS ACÚSTICO-ELÁSTICAS DE DOSIS ABSORBIDA EN UN DOSÍMETRO DE GEL POLIMÉRICO COMO SIMULADOR DE TEJIDO BLANDO

Ana Clara Oliveira de Queiroz Teófilo
Mestrado em Engenharia Elétrica e de Computação
Escola de Engenharia, Universidade Federal de Goiás
Goiânia, Goiás, Brasil
E-mail: anateofilo@discente.ufg.br

Pedro Henrique Coelho Dias
Bacharel em Física Médica, especialista em Radioterapia
Cebrom Oncoclínicas
Goiânia, Goiás, Brasil
E-mail: pedro.coelho@oncoclinicas.com

Sílvio Leão Vieira
Doutor em Física Aplicada à Medicina e Biologia
Instituto de Física, Universidade Federal de Goiás
Goiânia, Goiás, Brasil
E-mail: slvieira@ufg.br

Resumo

A dosimetria precisa da dose absorvida é um dos fatores determinantes para a eficácia e a segurança dos tratamentos em radioterapia, especialmente quando se busca a verificação tridimensional da distribuição de dose. Nesse contexto, os dosímetros em gel polimérico destacam-se por permitirem o registro volumétrico da dose, sendo tradicionalmente lidos por meio de ressonância magnética, técnica de alto custo e limitada disponibilidade clínica. Este estudo investiga a aplicabilidade de um sistema ultrassônico como método alternativo para a leitura de dosímetros em gel polimérico MAGIC-F utilizados em radioterapia. Inicialmente, realizou-se a calibração do sistema por meio de amostras homogêneas à base de gelatina bovina em diferentes concentrações, avaliando a resposta da velocidade de propagação do ultrassom, do coeficiente de atenuação e dos módulos elásticos. Em seguida, a metodologia foi aplicada a amostras de gel MAGIC-F irradiadas com doses absorvidas entre 0 e 40 Gy. A velocidade ultrassônica longitudinal e o coeficiente de atenuação foram determinados experimentalmente por meio da técnica de transmissão–recepção, enquanto os módulos elásticos foram estimados a partir de relações empíricas fundamentadas na literatura. Os resultados indicam comportamento aproximadamente linear da atenuação no intervalo de 0 a 30 Gy,

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 28/01/2026 - **Accepted:** 08/02/2026
Vol: 02.02
DOI: 10.66104/gdzzdb84
Pages: 1-37

com variação mais pronunciada em doses elevadas, sugerindo a existência de regimes distintos de resposta do material. Observou-se ainda aumento sistemático da rigidez mecânica com a dose, evidenciado pelo crescimento do módulo de Young. Esses achados demonstram o potencial do ultrassom como ferramenta complementar para a leitura tridimensional da dose absorvida em dosímetros poliméricos.

Palavras-chave: Ultrassom; Velocidade do som; Coeficiente de atenuação, Módulo de Young; Dose absorvida, Dosímetro de gel polimérico.

Abstract

Accurate absorbed dose dosimetry is a key factor for the effectiveness and safety of radiotherapy treatments, particularly when three-dimensional dose verification is required. In this context, polymer gel dosimeters stand out for their ability to record volumetric dose distributions, traditionally read using magnetic resonance imaging, a high-cost technique with limited clinical availability. This study investigates the applicability of an ultrasonic system as an alternative method for reading MAGIC-F polymer gel dosimeters used in radiotherapy. Initially, the system was calibrated using homogeneous gelatin-based samples with different concentrations, evaluating the response of ultrasonic velocity, attenuation coefficient, and elastic moduli. Subsequently, the methodology was applied to MAGIC-F gel samples irradiated with absorbed doses ranging from 0 to 40 Gy. Longitudinal ultrasonic velocity and attenuation coefficient were experimentally determined using the transmission–reception technique, while elastic moduli were estimated based on empirical relations supported by the literature. The results indicate an approximately linear attenuation behavior between 0 and 30 Gy, with a more pronounced variation at higher doses, suggesting distinct material response regimes. A systematic increase in mechanical stiffness with dose was also observed, as evidenced by the increase in Young's modulus. These findings demonstrate the potential of ultrasound as a complementary tool for three-dimensional absorbed dose readout in polymer gel dosimetry.

Keywords: Ultrasound; Speed of sound; Attenuation coefficient; Young's modulus; Absorbed dose; Polymer gel dosimeter.

Resumen

La dosimetría precisa de la dosis absorbida es uno de los factores determinantes para la eficacia y seguridad de los tratamientos en radioterapia, especialmente cuando se requiere la verificación tridimensional de la distribución de dosis. En este contexto, los dosímetros de gel polimérico se destacan por permitir el registro volumétrico de la dosis, siendo tradicionalmente leídos mediante resonancia magnética, una técnica de alto costo y limitada disponibilidad clínica. Este estudio investiga la aplicabilidad de un sistema ultrasónico como método alternativo para la lectura de dosímetros de gel polimérico MAGIC-F utilizados en radioterapia. Inicialmente, se realizó la

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 28/01/2026 - **Accepted:** 08/02/2026
Vol: 02.02
DOI: 10.66104/gdzzdb84
Pages: 1-37

calibración del sistema mediante muestras homogéneas a base de gelatina bovina con diferentes concentraciones, evaluando la respuesta de la velocidad ultrasónica, el coeficiente de atenuación y los módulos elásticos. Posteriormente, la metodología se aplicó a muestras de gel MAGIC-F irradiadas con dosis absorbidas entre 0 y 40 Gy. La velocidad ultrasónica longitudinal y el coeficiente de atenuación se determinaron experimentalmente mediante la técnica de transmisión–recepción, mientras que los módulos elásticos se estimaron a partir de relaciones empíricas fundamentadas en la literatura. Los resultados indican un comportamiento aproximadamente lineal de la atenuación en el intervalo de 0 a 30 Gy, con una variación más pronunciada a dosis elevadas, lo que sugiere la existencia de regímenes distintos de respuesta del material. Asimismo, se observó un aumento sistemático de la rigidez mecánica con la dosis, evidenciado por el incremento del módulo de Young. Estos hallazgos demuestran el potencial del ultrasonido como herramienta complementaria para la lectura tridimensional de la dosis absorbida en dosimetría con geles poliméricos.

Palabras clave: Ultrasonido; Velocidad del sonido; Coeficiente de atenuación; Módulo de Young; Dosis absorbida; Dosímetro de gel polimérico.

1. Introdução

O câncer permanece como uma das principais causas de mortalidade em escala global, configurando-se como um desafio contínuo para os sistemas de saúde pública (BRAY et al., 2024). Nesse contexto, a radioterapia consolidou-se como uma das principais modalidades terapêuticas, baseando-se na aplicação de radiação ionizante para o controle e a erradicação de células tumorais. A eficácia e a segurança desse tratamento estão diretamente relacionadas à precisão na determinação da dose absorvida, o que toma a dosimetria um elemento central no planejamento, na verificação e no controle de qualidade dos procedimentos radioterápicos (SALMAN et al. 2025)

Na rotina clínica, a dosimetria é tradicionalmente realizada por meio de dispositivos como câmaras de ionização, diodos semicondutores, dosímetros termoluminescentes (TLD) e filmes radiocrômicos. Embora amplamente consolidados, esses métodos apresentam limitações quando se deseja avaliar a distribuição tridimensional (3D) da dose absorvida, uma vez que fornecem, em geral, informações pontuais ou bidimensionais. Nesse cenário, os dosímetros em gel polimérico têm sido amplamente investigados como uma alternativa promissora, pois possibilitam o registro volumétrico da dose com elevada resolução espacial,

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 28/01/2026 - **Accepted:** 08/02/2026
Vol: 02.02
DOI: 10.66104/gdzzdb84
Pages: 1-37

permitindo a reconstrução tridimensional do campo irradiado (DOYAN et al., 2025; SALMAN et al., 2025).

O princípio de funcionamento dos dosímetros em gel polimérico baseia-se na radiólise da água induzida pela radiação ionizante, que resulta na formação de radicais livres capazes de iniciar reações em cadeia de polimerização dos monômeros dispersos em uma matriz gelatinosa. As macromoléculas formadas permanecem espacialmente imobilizadas no gel, produzindo um registro físico tridimensional da distribuição da dose absorvida. Esse registro pode ser acessado por diferentes técnicas de leitura, desde que sensíveis às modificações físico-químicas induzidas pelo processo de polimerização (HAMANN; BALDOCK, 2021).

A ressonância magnética (RM) consolidou-se como o método de referência para a leitura de dosímetros em gel polimérico, uma vez que a polimerização induzida pela radiação provoca alterações nas taxas de relaxamento transversal, particularmente no parâmetro R_2, que apresenta forte correlação com a dose absorvida. Em função dessa característica, a RM tem sido amplamente utilizada na leitura de diferentes formulações de gel, incluindo o gel polimérico MAGIC-F (CAVEDINI et al., 2022). Apesar de sua robustez e confiabilidade, a aplicação da RM apresenta limitações associadas ao elevado custo dos equipamentos, à complexidade operacional e à disponibilidade restrita em muitos serviços de radioterapia, o que motiva a investigação de técnicas de leitura alternativas ou complementares.

Nesse contexto, o ultrassom surge como uma alternativa tecnologicamente atrativa, especialmente devido ao seu baixo custo, portabilidade e ampla disponibilidade clínica. O processo de polimerização induzido pela radiação também promove modificações nas propriedades acústicas e mecânicas do gel, como a velocidade de propagação das ondas ultrassônicas, o coeficiente de atenuação e os módulos elásticos. Tais propriedades podem ser avaliadas experimentalmente a partir da análise de pulsos ultrassônicos transmitidos através do material e, posteriormente, correlacionadas com a dose absorvida, indicando o potencial do ultrassom como ferramenta complementar à ressonância magnética para a leitura de distribuições tridimensionais de dose em dosímetros poliméricos

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 28/01/2026 - **Accepted:** 08/02/2026
Vol: 02.02
DOI: 10.66104/gdzzdb84
Pages: 1-37

(SALMAN et al., 2025).

Entretanto, a resposta ultrassônica dos géis poliméricos pode apresentar comportamentos distintos ao longo do intervalo de dose, refletindo diferentes regimes de polimerização e alterações estruturais do material. Além disso, propriedades mecânicas como os módulos elásticos não são determinadas diretamente, mas estimadas a partir de relações empíricas fundamentadas na literatura, o que exige uma análise criteriosa dos resultados e de suas limitações.

Dessa forma, este trabalho tem como objetivo investigar a aplicabilidade de um sistema ultrassônico para a análise de dosímetros em gel polimérico MAGIC-F, avaliando a sensibilidade de parâmetros acústicos e de propriedades mecânicas estimadas à variação da dose absorvida. Inicialmente, realiza-se a calibração do sistema por meio de amostras homogêneas à base de gelatina bovina em diferentes concentrações, visando à caracterização da resposta acústica do material. Em seguida, a metodologia é aplicada a amostras de gel MAGIC-F irradiadas em um intervalo de doses entre 0 e 40 Gy, com o intuito de identificar tendências, regimes distintos de resposta e o potencial do ultrassom como ferramenta complementar para a leitura tridimensional da dose absorvida em radioterapia.

2. Metodologia

2.1. Materiais e 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, ambientais e de preparo rigorosamente controladas em todas as etapas experimentais, com o objetivo de assegurar a reprodutibilidade instrumental e a comparabilidade entre as medições.

Para a calibração do sistema ultrassônico, foram preparados objetos simuladores constituídos por água e gelatina de origem bovina Bloom 250

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 28/01/2026 - **Accepted:** 08/02/2026
Vol: 02.02
DOI: 10.66104/gdzzdb84
Pages: 1-37

(4Wellbrasil™, Itu, SP, Brasil), nas concentrações de 5%, 8%, 10%, 15% e 20% (m/m). O preparo consistiu na adição gradual da gelatina em pó à água sob aquecimento controlado e agitação contínua, até completa dissolução e homogeneização da mistura, evitando a incorporação de bolhas de ar.

Após o preparo, as soluções foram vertidas em recipientes acrílicos idênticos, com dimensões internas de 6 × 6 × 5 cm³ e espessura de parede de 1,00 mm, medidas com paquímetro**,** com incerteza associada de ± 0,05 mm. Esses recipientes foram utilizados em todas as etapas subsequentes do estudo — calibração, irradiação e aquisição dos sinais ultrassônicos — assegurando reprodutibilidade geométrica e constância do caminho de propagação acústica entre as amostras.

O gel polimérico MAGIC-F utilizado neste trabalho é constituído por monômeros de metacrilato 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. O procedimento de preparo seguiu metodologia previamente descrita na literatura, a composição do gel dosimétrico MAGIC-F está resumida na Tabela 1 (FERNANDES et al., 2009).

Tabela 1: Composição do gel dosimétrico MAGIC-F utilizado neste estudo.

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

Fonte: Adaptada FERNANDES et al, 2009

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 28/01/2026 - **Accepted:** 08/02/2026
Vol: 02.02
DOI: 10.66104/gdzzdb84
Pages: 1-37

Inicialmente, a gelatina foi adicionada à água ultrapura à temperatura ambiente em um único recipiente de preparo. Conforme ilustrado na Figura 1, o recipiente foi posicionado sobre um sistema de aquecimento com agitação magnética. A mistura foi aquecida até 50 °C e mantida sob agitação contínua até completa homogeneização. Em seguida, o aquecimento foi interrompido, mantendo-se a agitação até que a solução atingisse aproximadamente 35 °C.

Nessa temperatura, foram adicionados o ácido ascórbico (0,035% m/m) e o sulfato de cobre (0,002% m/m; VETEC®). Após um intervalo de aproximadamente cinco minutos, adicionaram-se o ácido metacrílico (5,87% m/m) e o formaldeído (3,2% m/m; ACROS®), mantendo-se a agitação até completa homogeneização da solução.

Figura 1: Recipiente utilizado no preparo do gel MAGIC-F, posicionado sobre sistema de aquecimento e agitação magnética.



Fonte: A própria autora, 2026.

Após o preparo, o gel MAGIC-F foi vertido nos mesmos recipientes acrílicos utilizados na calibração do sistema ultrassônico, garantindo uniformidade geométrica entre todas as amostras analisadas. As amostras foram então armazenadas no interior de uma geladeira com a temperatura de 4 ˚C por 12 horas,

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 28/01/2026 - **Accepted:** 08/02/2026
Vol: 02.02
DOI: 10.66104/gdzzdb84
Pages: 1-37

antes de serem avaliadas. Após a gelificação, as amostras foram mantidas hermeticamente vedadas durante todo o período de condicionamento, bem como durante as etapas de irradiação e aquisição ultrassônica.

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). Assim, o acondicionamento das amostras em recipientes hermeticamente fechados teve como objetivo minimizar a incorporação de oxigênio no interior do gel, preservando suas propriedades físicas, acústicas e dosimétricas e contribuindo para maior reprodutibilidade dos resultados experimentais.

2.2. Irradiação

A configuração experimental adotada para a irradiação das amostras é apresentada na Figura 2, a qual ilustra o posicionamento real do gel dosimétrico no tanque de água e a geometria esquemática utilizada para garantir a homogeneidade da dose absorvida, conforme práticas consolidadas na irradiação de dosímetros poliméricos tridimensionais (DE DEENE, 2024; SAGSOZ, 2025). A irradiação foi realizada utilizando um acelerador linear Varian TrueBeam STx. O equipamento foi configurado para feixe de fótons com energia nominal de 10 MV, campo aberto de 20 × 20 cm² e irradiação em dose única. Nesse estudo preliminar, foi empregado um lote de quatro amostras, uma única amostra por dose (N = 1 por dose) de gel MAGIC-F, as quais foram irradiadas com doses absorvidas de 10, 20, 30 e 40 Gy.

Com o objetivo de promover a homogeneidade da dose, a irradiação foi realizada com o *gantry* posicionado a 0°, 90°, 180° e 270°, mantendo o eixo central do feixe alinhado ao centro geométrico das amostras por meio de lasers de posicionamento do equipamento, conforme esquematizado na Figura 2. Para evitar efeitos de *build-up* e assegurar condições próximas ao equilíbrio eletrônico, as amostras foram posicionadas no interior de um tanque de água, a uma

REMUNOM
ISSN 2178-6925

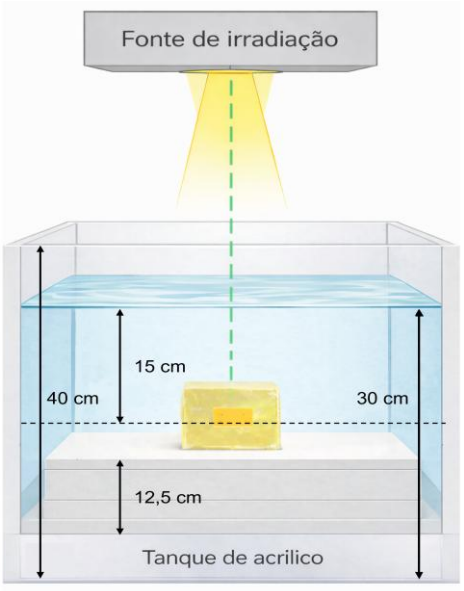
Received: 28/01/2026 - **Accepted:** 08/02/2026
Vol: 02.02
DOI: 10.66104/gdzzdb84
Pages: 1-37

profundidade de 15 cm em relação à superfície livre, no centro de um tanque de acrílico com 30 cm de coluna d'água. Além disso, o tamanho de campo (20 × 20 cm²), foi escolhido de forma a maximizar a cobertura da amostra e minimizar os efeitos de penumbra do campo irradiado.

Para garantir o posicionamento reprodutível das amostras, foram utilizadas placas sólidas de água fixadas no fundo do tanque, sobre as quais as amostras foram apoiadas e fixadas, assegurando a mesma altura em todas as irradiações.

As condições experimentais descritas asseguraram a homogeneidade da dose absorvida no volume sensível das amostras, o posicionamento reprodutível durante as irradiações e a completa cobertura geométrica do campo irradiado. Dessa forma, as variações observadas nos parâmetros acústicos refletem predominantemente a resposta do gel MAGIC-F à dose absorvida.

Figura 2: Representação esquemática da geometria experimental adotada para a irradiação do gel dosimétrico MAGIC-F em um tanque de água, indicando a profundidade de posicionamento da amostra e as dimensões do tanque.



Fonte: A própria autora, 2026.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 28/01/2026 - **Accepted:** 08/02/2026
Vol: 02.02
DOI: 10.66104/gdzzdb84
Pages: 1-37

2.3. Aparato Experimental

A determinação das propriedades acústicas das amostras foi realizada por meio da técnica de transmissão–recepção, amplamente empregada na caracterização ultrassônica de materiais homogêneos e objetos simuladores de tecido (CAFARELLI et al., 2017). Nesse método, a água foi utilizada como meio de referência, permitindo a comparação direta da propagação das ondas ultrassônicas na ausência e na presença das amostras, condição essencial para a posterior estimativa de parâmetros acústicos relativos, como a velocidade de propagação e o coeficiente de atenuação.

O sistema experimental foi composto por dois transdutores de imersão com frequência central de 2,25 MHz, acoplados a um *pulse/receiver* ultrassônico (Olympus, modelo 5072PR). O acoplamento acústico entre os transdutores e as amostras foi realizado exclusivamente por meio do meio aquoso, sem contato direto entre os transdutores e o material analisado como representado na Figura 3. Os sinais transmitido e recebido foram conduzidos por cabos coaxiais blindados de 75 Ω, assegurando a integridade do sinal elétrico e a minimização de interferências externas.

As amostras foram colocadas previamente dentro de um tanque de acrílico de 340,80±0,05 mm de comprimento, 200,80±0,05 mm de altura e 190,00±0,05 mm de largura, com paredes de 10,00±0,05 mm de espessura, contendo água destilada à temperatura ambiente para que entrassem em equilíbrio térmico antes de serem avaliadas.

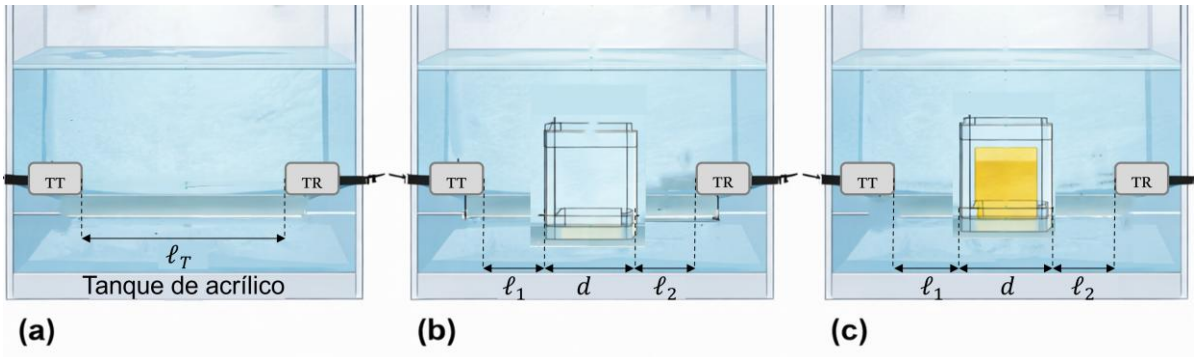
Os sinais ultrassônicos foram visualizados e registrados em um osciloscópio digital (Tektronix, modelo TDS 2024C), permitindo a aquisição das formas de onda necessárias à análise temporal e à extração dos parâmetros acústicos. Durante todo experimento, a temperatura da água foi monitorada por um termopar (MTK-01, Minipa, SP, Brasil), imerso no tanque de acrílico. O termopar empregado possui limite padrão de erro 0,75% do valor medido. Por exemplo, adotando-se 0,75% do valor medido de 25 ºC estimou-se uma incerteza de ± 0,18 ºC. O termopar foi interligado a um módulo de condicionamento de sinais (NI DAQ-9212, National Instruments, TX,

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 28/01/2026 - **Accepted:** 08/02/2026
Vol: 02.02
DOI: 10.66104/gdzzdb84
Pages: 1-37

EUA) integrado a um módulo de comunicação (NI DAQ-9171, National Instruments, TX, EUA), estando este conectado a um computador (DELL Vostro 3250, Core i7-6700, RAM 8 GB, HDD 1 TB, Windows 10 Pro) via cabo USB. O controle do sistema experimental e o armazenamento dos dados adquiridos foram realizados no ambiente MATLAB (MathWorks, Natick, MA, EUA), por meio de um código dedicado à comunicação com o osciloscópio e ao monitoramento dos termopares utilizados no controle térmico do sistema.

Figura 3: Representação esquemática do arranjo experimental utilizado para a aquisição ultrassônica em modo transmissão. TT e TR correspondem, respectivamente, aos transdutores transmissor e receptor, ambos imersos em meio aquoso. Em (a), o sinal de referência é adquirido apenas em água, sendo ℓ_T a distância total entre os transdutores. Em (b), o porta-amostra vazio é posicionado entre os transdutores para correção geométrica. Em (c), a amostra de gel MAGIC-F é inserida no porta-amostra. As distâncias ℓ_1 e ℓ_2 representam, respectivamente, os trajetos da onda ultrassônica entre o transdutor transmissor e a face da amostra, e entre a face oposta da amostra e o transdutor receptor, com $\ell_1 > \ell_2$. A espessura da amostra é indicada por d.



Fonte: A própria autora, 2026.

A Figura 3 apresenta o arranjo experimental e a sequência de aquisição dos sinais adotada neste estudo. Inicialmente, foi adquirido o sinal no meio de referência

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 28/01/2026 - **Accepted:** 08/02/2026
Vol: 02.02
DOI: 10.66104/gdzzdb84
Pages: 1-37

(água), com o objetivo de determinar a distância efetiva entre os transdutores e verificar o correto funcionamento do sistema (Figura 3 (a)). Em seguida, realizou-se a aquisição do sinal com o porta amostra vazio, possibilitando a posterior compensação da influência do material acrílico sobre os sinais ultrassônicos analisados (Figura 3 (b)). Por fim, a amostra foi posicionada no porta amostra, mantendo-se a mesma configuração geométrica, e o sinal transmitido foi adquirido para a determinação dos parâmetros acústicos de interesse (Figura 3 (c)).

2.4. Aquisição e processamento dos sinais ultrassônicos

A caracterização acústica das amostras foi realizada por meio da aquisição de sinais ultrassônicos no modo transmissão–recepção, conforme o arranjo experimental apresentado na Figura 3. Todas as medições foram conduzidas à temperatura controlada de (25,0 ± 0,2) °C, monitorada continuamente por meio de termopares acoplados ao sistema experimental. A temperatura foi registrada em todas as aquisições, assegurando o controle térmico ao longo de todo o procedimento experimental. Antes do início de cada conjunto de medições, foi aguardado o tempo necessário para o estabelecimento do equilíbrio térmico entre o meio de propagação (água), o porta-amostra e a amostra, de modo a minimizar a influência de variações térmicas sobre os parâmetros acústicos estimados.

Para cada condição experimental, todas as etapas de aquisição — sinal no meio de referência (água), sinal do porta-amostra vazio e sinal com a amostra posicionada — foram repetidas cinco vezes, mantendo-se a configuração geométrica em todas as medições. Os parâmetros acústicos foram posteriormente estimados a partir da média dos valores obtidos, sendo a repetibilidade incorporada à análise de incerteza do tipo A.

Para cada nível de dose absorvida, foi utilizada uma única amostra independente de gel polimérico MAGIC-F (N = 1 por dose). As repetições descritas neste estudo referem-se exclusivamente às aquisições ultrassônicas realizadas sobre a mesma amostra, com o objetivo de avaliar a repetibilidade instrumental e a reprodutibilidade temporal de curto prazo do método. Não foi realizada replicação amostral independente por dose. Dessa forma, o presente trabalho deve ser

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 28/01/2026 - **Accepted:** 08/02/2026
Vol: 02.02
DOI: 10.66104/gdzzdb84
Pages: 1-37

interpretado como um estudo piloto, com foco na avaliação da viabilidade e sensibilidade do método ultrassônico à variação de dose, e não como uma análise estatística populacional do material.

A análise dos sinais foi restrita ao primeiro pulso ultrassônico transmitido, identificado pelo instante correspondente à máxima amplitude do sinal recebido. Esse critério foi adotado com o objetivo de evitar a influência de múltiplas reflexões internas e assegurar a consistência das estimativas dos tempos de voo e das amplitudes utilizadas nos cálculos da velocidade de propagação e do coeficiente de atenuação.

Para assegurar a reprodutibilidade do processamento dos sinais, todas as análises foram realizadas a partir de um procedimento padronizado, implementado em ambiente MATLAB. A identificação do primeiro pulso transmitido foi realizada a partir da detecção do máximo global de amplitude dentro de uma janela temporal previamente definida, correspondente ao intervalo esperado de chegada do pulso direto, calculado a partir da distância nominal entre os transdutores e da velocidade do som na água. Essa janela foi mantida fixa para todas as medições de uma mesma campanha experimental.

Antes da extração dos parâmetros temporais e de amplitude, os sinais adquiridos foram submetidos a um pré-processamento consistente, incluindo remoção do nível DC e aplicação de um filtro passa-faixa centrado na frequência nominal dos transdutores (2,25 MHz), com largura de banda compatível com a resposta espectral do sistema. Não foi aplicada correção automática de deriva temporal, uma vez que o sistema experimental permaneceu estável durante as aquisições e o alinhamento geométrico foi mantido constante por meio de um suporte rígido fixado entre os transdutores.

O critério de utilização da amplitude máxima do primeiro pulso para a estimativa do coeficiente de atenuação foi adotado por sua simplicidade e ampla utilização em estudos de caracterização ultrassônica de materiais homogêneos, particularmente quando o objetivo é a comparação relativa entre condições experimentais mantidas constantes. Embora métricas espectrais possam oferecer

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 28/01/2026 - **Accepted:** 08/02/2026
Vol: 02.02
DOI: 10.66104/gdzzdb84
Pages: 1-37

maior robustez em cenários com maior variabilidade de acoplamento, neste estudo as condições geométricas, o meio de propagação e o posicionamento das amostras foram rigorosamente controlados, minimizando variações sistemáticas de acoplamento.

Adicionalmente, a robustez do procedimento foi avaliada por meio da repetição das medições em dias distintos, com reposicionamento completo das amostras e realinhamento do sistema experimental. Os resultados apresentados correspondem à média das campanhas de medição, sendo a variabilidade observada incorporada à análise de incerteza do tipo A, o que permite capturar tanto a repetibilidade instrumental quanto variações associadas ao reposicionamento do sistema.

A velocidade do som na água foi estimada em função da temperatura média do meio, medida durante os experimentos, utilizando uma expressão empírica amplamente empregada na literatura para água pura (LUBBERS; FLETCHER, 1998):

$$\begin{aligned} c_{água}(T) = {} & 1402.385 + 5.038813\,T - 5.799136 \times 10 - 2T^2 \\ & + 3.287156 \times 10 - 4T^3 - 1.398845 \times 10 - 6T^4 \\ & + 2.787860 \times 10 - 9T^5 \end{aligned} \qquad (1)$$

em que $c_{água}$ representa a velocidade do som em m/s e T é a temperatura em graus Celsius. Essa relação reflete a dependência da densidade e da compressibilidade da água com a temperatura, parâmetros que governam a propagação acústica no meio.

A partir do sinal adquirido apenas em água, o tempo de voo foi determinado pela identificação do instante correspondente à máxima amplitude do pulso transmitido. Em seguida, a distância nominal entre os transdutores foi estimada pela relação fundamental entre distância, velocidade e tempo, dada por:

$$\ell_T = c_{água} \cdot t_{água} \qquad (2)$$

em que $t_{água}$ representa o tempo de voo do pulso ultrassônico no meio de referência.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 28/01/2026 - **Accepted:** 08/02/2026
Vol: 02.02
DOI: 10.66104/gdzzdb84
Pages: 1-37

A velocidade do som na amostra foi determinada pelo método do tempo de trânsito, considerando a diferença entre os tempos de voo medidos com o porta-amostra vazio e com a amostra inserida (VIEIRA, 2005). Dessa forma, a velocidade acústica da amostra, $c_{amostra}$, foi obtida por:

$$c_{amostra} = \frac{1}{1/c_{porta} - \Delta t/d} \quad (3)$$

em que c_{porta} é a velocidade efetiva do som no meio água/porta amostra, Δt corresponde à diferença de tempo de voo entre as aquisições com o porta-amostra vazio e com a amostra, e d é a espessura da amostra, medida com paquímetro digital.

O coeficiente de atenuação ultrassônica foi estimado a partir da razão entre as amplitudes máximas dos sinais adquiridos com a presença da amostra (A_s) e do sinal de referência da porta amostra-água (A_p), normalizada pela espessura do gel. No arranjo experimental adotado, a onda ultrassônica atravessa sucessivamente as interfaces água–acrílico e acrílico–água associadas às paredes do porta-amostra**.** Considerando que parte da energia acústica incidente é refletida nas interfaces entre meios com diferentes impedâncias acústicas, foi introduzido um fator de transmissão T, calculado a partir das impedâncias acústicas da água e do acrílico, de modo a corrigir as perdas associadas à transmissão nas interfaces água–acrílico, as quais permanecem invariáveis ao longo de todas as medições. A necessidade dessa correção tem sido destacada em estudos recentes envolvendo materiais poliméricos e hidrogéis, nos quais diferenças de impedância acústica influenciam significativamente a amplitude transmitida e, consequentemente, a estimativa dos parâmetros ultrassônicos (KIM et al., 2022).

O porta-amostra empregado neste estudo é feito de material acrílico, no formato cúbico, com ambas as superfícies planas e paralelas e, portanto, apresenta duas interfaces água–acrílico a serem consideradas na transmissão do sinal ultrassônico. A impedância acústica da água é $Z_{água} = 1{,}5\ \mathrm{MPa.s/m}$ e a impedância acústica da parede de acrílico é $Z_{acr} = 3{,}2\ \mathrm{MPa.s/m}$. Dessa forma, devido à

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 28/01/2026 - **Accepted:** 08/02/2026
Vol: 02.02
DOI: 10.66104/gdzzdb84
Pages: 1-37

diferença de impedâncias entre esses dois meios e o gel, torna-se necessário considerar o coeficiente de transmissão da pressão acústica através dessas camadas (VIEIRA, 2005, VIEIRA et al., 2013). Para entendermos como o porta-amostra interfere na atenuação medida no gel, iremos derivar o coeficiente de atenuação para essas interfaces.

Começando pela análise da amplitude do sinal com porta amostra com gel, observamos que o pulso de ultrassom parte do transdutor emissor viajando pela água, em seguida passa pela primeira parede de acrílico do porta-amostra, em seguida atravessa a camada de gel, e novamente pela segunda parede acrílico, para em seguida percorrer a camada acopladora de água, par finalmente chegar ao transdutor receptor. Nesse percurso o pulso se depara em quatro interfaces, são elas: a interface água/acrílico, cujo coeficiente de transmissão é dado por $T_{w/acr}$, em seguida a interface acrílico/gel, $T_{acr/gel}$, a terceira interface gel/acrílico, $T_{gel/acr}$, e pôr fim a quarta e última interface acrílico/Água, $T_{acr/w}$.

A atenuação α_w da amplitude do pulso de ultrassom na água A_0 é considerada desprezível, por ser um valor muito baixo, da ordem de 0,002 dB/cm a 2,25 MHz (Vieira, 2005). Enquanto no acrílico a amplitude decai exponencialmente $e^{-2\alpha_a t}$, em que α_{acr} representa a atenuação no acrílico, e t é a espessura de cada parede. No gel o sinal também decai de forma exponencial $e^{-\alpha_{gel} d}$, em que α_{gel} é a atenuação, que queremos medir, e d a espessura interna do porta-amostra.
A amplitude total do sinal que atravessa as quatro interfaces é dada por:

$$A_s = A_0 \cdot T_{w/acr} \cdot e^{-\alpha_{arc} t} \cdot T_{arc/gel} \cdot e^{-\alpha_{gel} d} \cdot T_{gel/acr} \cdot e^{-\alpha_{acr} t} \cdot T_{acr/w} \quad (4)$$

Neste estudo, supomos que a impedância do gel é aproximadamente igual ao da água. Como a impedância $Z_{gel} = Z_w$, então $T_{acr/gel} = T_{acr/w}$ e $T_{gel/acr} = T_{w/acr}$:

$$A_s = A_0 \cdot \left(T_{w/acr} T_{acr/w}\right)^2 \cdot e^{-2\alpha_{acr} t} \cdot e^{-\alpha_{gel} d} \quad (5)$$

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 28/01/2026 - **Accepted:** 08/02/2026
Vol: 02.02
DOI: 10.66104/gdzzdb84
Pages: 1-37

Agora, passemos a analisar a amplitude do sinal com porta amostra contendo água para estimar o coeficiente de atenuação é necessário comparar o sinal através da amostra e com um meio de referência. Aqui, adotamos como meio “referência”, a água entre as paredes de acrílicos, ou seja, água dentro e fora do porta-amostra. Nessa situação, a amplitude total do sinal que atravessa as quatro interfaces é dada por:

$$A_p = A_0 \cdot T_{w/acr} \cdot e^{-\alpha_{acr} t} \cdot T_{acr/w} \cdot e^{-\alpha_w d} \cdot T_{w/acr} \cdot e^{-\alpha_{acr} t} \cdot T_{acr/w} \quad (6)$$

Adotando que a atenuação da água dentro e fora do porta-amostra é desprezível, a expressão pode ser simplificada, ficando assim:

$$A_p = A_0 \cdot (T_{w/acr} T_{acr/w})^2 \cdot e^{-2\alpha_{acr} t} \cdot e^{-\alpha_w d} \quad (7)$$

Portanto, ao comparar as amplitudes do sinal do porta-amostra com gel e somente com água, e considerando que $\alpha_w \approx 0$, obtemos o coeficiente de atenuação dado em Np/cm:

$$\frac{A_s}{A_p} = e^{-\alpha_{gel} d} \Rightarrow \alpha_{gel} = -\frac{1}{d} \ln\left(\frac{A_s}{A_p}\right) \quad (8)$$

Convertendo para unidade de dB/cm, obtemos a seguinte expressão final para o coeficiente de atenuação:

$$\alpha'_{gel} = \frac{20}{d_{cm}} \log_{10}\left(\frac{A_p}{A_s}\right) \quad (9)$$

Eventuais variações da impedância acústica do gel com a dose absorvida podem introduzir um efeito sistemático adicional na atenuação estimada; no entanto, como a geometria do porta-amostra e as interfaces água–acrílico permanecem constantes em todas as medições, esse efeito não compromete a análise comparativa da variação da atenuação em função da dose, sendo tratado como uma limitação do modelo adotado.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 28/01/2026 - **Accepted:** 08/02/2026
Vol: 02.02
DOI: 10.66104/gdzzdb84
Pages: 1-37

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

2.5. Estimativa das propriedades elásticas

Os procedimentos descritos nesta subseção foram inicialmente aplicados às amostras de calibração, preparadas com diferentes concentrações de gelatina, com o objetivo de avaliar empiricamente a relação entre a composição do material e seus parâmetros elásticos. Essa etapa teve como finalidade estabelecer uma base metodológica para a posterior aplicação da abordagem às amostras irradiadas de gel polimérico MAGIC-F, nas quais a concentração de gelatina foi mantida constante e a dose absorvida foi variada.

Técnicas acústicas são apropriadas para a determinação não destrutiva de propriedades mecânicas de materiais poliméricos, uma vez que a propagação de ondas ultrassônicas em um meio está diretamente relacionada às forças inerciais e à rigidez elástica do material (MCHUGH, 2008; AULD, 1973). Em meios elásticos lineares, homogêneos e isotrópicos, hipótese usualmente adotada para géis à base de gelatina em regime de pequenas deformações, essas propriedades podem ser inferidas a partir da densidade do meio e das velocidades de propagação das ondas longitudinais e transversais (LANDAU; LIFSHITZ, 1986; ROYER; DIEULESAINT, 2000; ZHANG et al., 2017; LIU et al., 2021).

Neste estudo, as propriedades elásticas são obtidas sob essas hipóteses como aproximação de primeira ordem, devendo os valores estimados ser interpretados como estimativas condicionadas ao modelo adotado, e não como medições diretas independentes.

Cabe destacar que, para materiais suaves e potencialmente viscoelásticos, como géis poliméricos, essas relações são válidas na aproximação linear elástica e em faixas de frequência nas quais os efeitos de dispersão e atenuação são desprezíveis, conforme discutido em revisões e estudos recentes sobre elastografia ultrassônica (ZHANG et al., 2017; LIU et al., 2021).

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 28/01/2026 - **Accepted:** 08/02/2026
Vol: 02.02
DOI: 10.66104/gdzzdb84
Pages: 1-37

Neste estudo, a densidade ρ foi assumida constante e igual aos valores reportados na literatura para géis à base de gelatina bovina em concentrações similares, os quais apresentam variações inferiores a 2% na faixa de interesse, de modo que sua incerteza tem impacto desprezível na estimativa dos módulos elásticos (MASOUMI et al., 2016; VIEIRA et al., 2019; DE DEENE, 2019; BADAWE et al., 2024).

A velocidade transversal c_T não foi medida diretamente neste trabalho. Em vez disso, foi estimada de forma indireta a partir da velocidade longitudinal c_L, por meio de uma razão empírica $(c_T/c_L)_{\text{emp}}$, dependente das propriedades mecânicas do material, conforme proposto em estudos experimentais prévios com géis à base de gelatina e objetos simuladores biomiméticos (MASOUMI et al., 2016; VIEIRA et al., 2019; JAWLI et al., 2024; BADAWE et al., 2024; BADAWE et al., 2024).

Os valores de $(c_T/c_L)_{\text{emp}}$ adotados neste estudo foram selecionados com base em intervalos reportados na literatura independente para materiais comparáveis, não sendo ajustados para reproduzir os resultados experimentais obtidos, de modo a evitar a introdução artificial de uma dependência da rigidez com a dose absorvida. Essa abordagem é justificada pelo fato de que, para materiais quase incompressíveis e com microestrutura homogênea, a razão entre as velocidades longitudinal e transversal apresenta variação sistemática e reprodutível com a composição e o grau de polimerização do gel.

A estimativa indireta de c_T foi realizada segundo:

$$c_T = \left(\frac{c_T}{c_L}\right)_{\text{emp}} \cdot c_L \tag{10}$$

em que $(c_T/c_L)_{\text{emp}}$ foi determinado experimentalmente na etapa de calibração ou adotado a partir de intervalos reportados na literatura (NEIDHARDT, 2021; JAWLI et al., 2024; BADAWE et al., 2024).

Em um meio isotrópico de densidade ρ, o módulo de cisalhamento G, que quantifica a resistência do material a deformações tangenciais, está diretamente relacionado à velocidade da onda transversal c_T segundo (AULD, 1973; LANDAU; LIFSHITZ, 1986; ZHANG et al., 2017; LIU et al., 2021):

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 28/01/2026 - **Accepted:** 08/02/2026
Vol: 02.02
DOI: 10.66104/gdzzdb84
Pages: 1-37

$$G = \rho\, c_T^2 \tag{11}$$

O módulo elástico longitudinal Lestá relacionado à velocidade da onda longitudinal $c_L$segundo (AULD, 1973; ROYER; DIEULESAINT, 2000; LIU et al., 2021):

$$L = \rho\, c_L^2 \tag{12}$$

A partir desses dois parâmetros, pode-se obter o módulo volumétrico K, que descreve a resistência à compressão hidrostática e depende tanto do módulo de cisalhamento quanto do módulo longitudinal (LANDAU; LIFSHITZ, 1986; ZHANG et al., 2017):

$$K = L - \left(\frac{4}{3}\right) G \tag{13}$$

O módulo de Young E caracteriza a rigidez sob carregamento uniaxial, enquanto o coeficiente de Poisson ν descreve o acoplamento entre deformações longitudinais e transversais.

$$E = \frac{9GK}{G + 3K} \tag{14}$$

$$\nu = \frac{3K - 2G}{2(3K + G)} \tag{15}$$

Ressalta-se que o coeficiente de Poisson estimado neste estudo decorre diretamente das hipóteses adotadas para o material, em particular da estimativa indireta da velocidade transversal. Dessa forma, os valores obtidos para ν devem ser interpretados como estimativas condicionadas ao modelo assumido, e não como uma determinação independente dessa propriedade.

Ambos podem ser obtidos a partir dos módulos de cisalhamento e volumétrico por meio das relações clássicas da elasticidade linear, amplamente empregadas em estudos contemporâneos de elastografia e caracterização ultrassônica de phantoms

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 28/01/2026 - **Accepted:** 08/02/2026
Vol: 02.02
DOI: 10.66104/gdzzdb84
Pages: 1-37

(LANDAU; LIFSHITZ, 1986; ROYER; DIEULESAINT, 2000; ZHANG et al., 2017; LIU et al., 2021). Ressalta-se, entretanto, que a aplicação dessas relações neste estudo está condicionada às hipóteses de material homogêneo, isotrópico e de comportamento elástico linear, conforme discutido anteriormente.

Com o objetivo de avaliar a robustez das estimativas do módulo de Young em relação à escolha da razão empírica $(c_T/c_L)_{\text{emp}}$, foi considerada uma análise de sensibilidade conceitual, na qual ré permitido variar dentro de intervalos plausíveis reportados na literatura. Essa análise indica que, embora os valores absolutos de E dependam desta razão empírica, as tendências de variação do módulo de Young com a dose absorvida são preservadas dentro desses intervalos, sustentando a interpretação qualitativa dos resultados.

2.5.1 Amostras de calibração

A caracterização das amostras de calibração foi realizada a partir da determinação experimental da velocidade longitudinal $c_L$para cada concentração de gelatina. A estimativa indireta da velocidade transversal fundamentou-se na teoria da elasticidade linear e em evidências experimentais previamente reportadas, as quais indicam que, em géis à base de gelatina bovina, as propriedades mecânicas, incluindo o módulo de cisalhamento e os parâmetros associados à propagação de ondas transversais, variam de forma sistemática com a concentração do material (NEIDHARDT, 2021; JAWLI et al., 2024; BADAWE et al., 2024).

Os dados obtidos nessa etapa foram utilizados para construir uma relação empírica entre c_T e c_L, dependente da concentração de gelatina, a qual foi empregada como referência metodológica para a análise das propriedades elásticas do material.

2.5.2 Amostras irradiadas

Destaca-se que a aplicação dessas relações a géis poliméricos irradiados tem sido explorada em trabalhos recentes que correlacionam parâmetros ultrassônicos com alterações mecânicas induzidas pela dose, inclusive em dosímetros do tipo

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 28/01/2026 - **Accepted:** 08/02/2026
Vol: 02.02
DOI: 10.66104/gdzzdb84
Pages: 1-37

MAGIC e MAGIC-F, fornecendo suporte empírico à abordagem adotada neste estudo (MASOUMI et al., 2016; VIEIRA et al., 2019; SALMAN et al., 2025; BADAWE et al., 2024).

Para as amostras irradiadas de gel polimérico MAGIC-F, a velocidade transversal c_T foi estimada por meio de uma aproximação empírica específica, fundamentada em estudos previamente reportados para dosímetros poliméricos à base de gelatina, em particular para géis do tipo MAGIC e MAGIC-F (MASOUMI et al., 2016; VIEIRA et al., 2019).

Diferentemente da etapa de calibração, na qual a variação das propriedades mecânicas está associada à concentração de gelatina, nas amostras irradiadas considerou-se que a concentração do material permaneceu constante, sendo as modificações mecânicas atribuídas predominantemente ao processo de polimerização induzido pela radiação ionizante (DE DEENE, 2019; HAMANN; BALDOCK, 2021).

Dessa forma, a razão empírica $(c_T/c_L)_{\text{emp}}$ utilizada para as amostras irradiadas foi definida a partir de intervalos percentuais consistentes com os valores reportados na literatura específica para esse tipo de gel e aplicada aos valores experimentais de c_L medidos após a irradiação (MASOUMI et al., 2016; VIEIRA et al., 2019).

Reconhece-se que a medição direta da velocidade de ondas transversais, por meio de técnicas de onda de cisalhamento ou elastografia ultrassônica, permitiria uma determinação independente e mais robusta das propriedades elásticas do gel. A incorporação dessas técnicas é prevista como etapa futura deste estudo, visando reduzir a dependência de hipóteses empíricas e validar quantitativamente as estimativas aqui apresentadas.

Essa abordagem permite investigar a variação do módulo de Young em função da dose absorvida, fornecendo um parâmetro mecânico complementar para a análise da resposta dosimétrica do gel MAGIC-F e para a avaliação do efeito da polimerização induzida pela radiação sobre a rigidez elástica do material (DE DEENE, 2019; BALDOCK et al., 2021; JIRÁSEK et al., 2022).

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 28/01/2026 - **Accepted:** 08/02/2026
Vol: 02.02
DOI: 10.66104/gdzzdb84
Pages: 1-37

2.6. Análise de incerteza

A análise de incerteza das medições ultrassônicas foi realizada de acordo com as recomendações do *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement* (*GUM*). As incertezas do tipo A foram estimadas a partir do desvio padrão das medições ultrassônicas repetidas, refletindo a repetibilidade instrumental e a reprodutibilidade temporal de curto prazo do método. As incertezas do tipo B foram associadas às resoluções e especificações dos instrumentos de medição utilizados, incluindo paquímetro, osciloscópio e termopar, conforme informações fornecidas pelos fabricantes. A incerteza padrão combinada foi obtida por meio da propagação das contribuições do tipo A e do tipo B, sendo todas as incertezas reportadas expressas como incertezas padrão, com fator de abrangência k = 1.

A velocidade ultrassônica longitudinal (c_L) foi determinada utilizando o modo de transmissão com dois transdutores, a partir da espessura da amostra (d) e da diferença de tempo de trânsito do pulso ultrassônico (Δt), de acordo com a relação apresentada na Equação (3). A incerteza padrão combinada associada à velocidade longitudinal foi obtida por meio da propagação das incertezas da espessura da amostra, medida com paquímetro, e da determinação do tempo de trânsito, que inclui a resolução temporal do osciloscópio e a repetibilidade do método de identificação do pico do sinal ultrassônico:

$$\frac{u_{c_L}}{c_L} = \sqrt{\left(\frac{u_d}{d}\right)^2 + \left(\frac{u_{\Delta t}}{\Delta t}\right)^2} \tag{16}$$

Ressalta-se que a incerteza associada ao tempo de trânsito $u_{\Delta t}$incorpora tanto a contribuição estatística proveniente da repetibilidade do método de identificação do pico do sinal (incerteza do tipo A) quanto a contribuição associada à resolução temporal do osciloscópio (incerteza do tipo B).

O coeficiente de atenuação (α), expresso em dB/cm, foi estimado a partir da razão logarítmica entre as amplitudes máximas dos sinais transmitidos através da amostra e da configuração de referência, normalizada pela espessura da amostra, conforme a Equação (9). A incerteza associada ao coeficiente de atenuação foi

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 28/01/2026 - **Accepted:** 08/02/2026
Vol: 02.02
DOI: 10.66104/gdzzdb84
Pages: 1-37

determinada considerando as incertezas das amplitudes medidas e da espessura da amostra, resultando em:

$$u_\alpha = \sqrt{\left(\frac{20}{dln(10)}\right)^2 \left[\left(\frac{u_{A'porta}}{A'_{porta}}\right)^2 + \left(\frac{U_{am}}{A_{am}}\right)^2\right] + \left(\frac{\alpha u_d}{d}\right)^2} \qquad (17)$$

O fator de transmissão acústica considerado na determinação do coeficiente de atenuação foi tratado como constante, uma vez que a interface água/acrílico, a geometria do sistema e as condições experimentais foram mantidas idênticas em todas as medições. Dessa forma, sua contribuição não foi incluída na propagação da incerteza do coeficiente de atenuação.

Assumindo um meio homogêneo e isotrópico, o módulo de Young (E) foi estimado a partir da velocidade ultrassônica longitudinal. A incerteza padrão combinada associada a E foi obtida pela propagação das incertezas da velocidade longitudinal, da densidade do material e do coeficiente de Poisson. Entre essas contribuições, a incerteza associada à velocidade longitudinal mostrou-se dominante, sendo as incertezas da densidade e do coeficiente de Poisson consideradas desprezíveis em comparação, uma vez que esses parâmetros foram adotados como constantes a partir de valores reportados na literatura para géis à base de gelatina.

Os procedimentos metodológicos descritos permitiram a determinação dos parâmetros acústicos e a estimativa das propriedades elásticas das amostras de calibração e das amostras irradiadas de gel polimérico MAGIC-F. A partir dessa abordagem, os resultados são apresentados inicialmente para as amostras de calibração, com o objetivo de estabelecer as relações empíricas entre a composição do material e os parâmetros acústicos e mecânicos. Em seguida, são apresentados os resultados obtidos para as amostras irradiadas, discutindo-se a resposta do gel MAGIC-F em função da dose absorvida.

3. Resultados e discussão

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 28/01/2026 - **Accepted:** 08/02/2026
Vol: 02.02
DOI: 10.66104/gdzzdb84
Pages: 1-37

3.1. Amostras de calibração

Os experimentos de calibração com géis homogêneos forneceram dados para uma relação entre a concentração de gelatina e a velocidade de propagação, conforme apresentado na Figura 4 (a) e a atenuação do som, na Figura 4 (b), resultando em valores de R^2 iguais a 0,995 e 0,996, respectivamente.

Observa-se uma tendência aproximadamente linear entre a velocidade de propagação do ultrassom e a concentração do gel, no intervalo analisado. Este comportamento também pôde ser visualizado para o coeficiente de atenuação. Modelos não lineares não foram considerados, uma vez que, no intervalo de concentrações estudado, o ajuste linear apresentou coeficientes de determinação elevados e não houve evidência experimental de mudanças abruptas no regime físico do material.

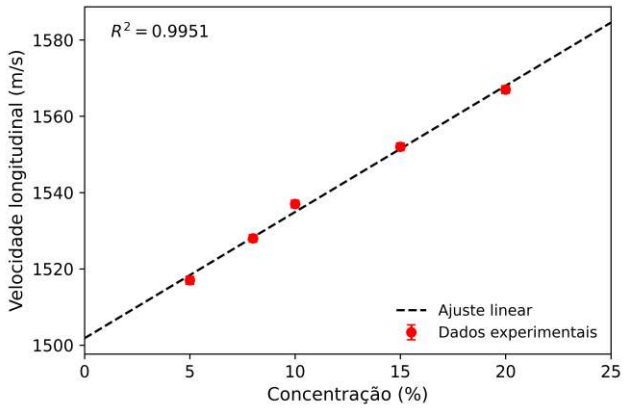
Com base nos ajustes obtidos, torna-se relevante comparar os valores medidos com aqueles reportados na literatura para materiais simuladores de tecido. Os valores de velocidade de propagação determinados neste trabalho (1517–1568 m/s) são compatíveis com aqueles observados em objetos simuladores gelatinosos e poliméricos, permanecendo próximos ao valor de referência comumente adotado em ultrassom diagnóstico (1540 m/s). Nesse contexto, Alves et al. reportaram velocidades de 1537±39 m/s em objetos simuladores de gelatina balística, com coeficientes de atenuação da ordem de 1,07 dB/cm·MHz, valores da mesma ordem de grandeza dos obtidos neste estudo quando expressos de forma comparável (ALVES et al., 2020). 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). Além disso, trabalhos recentes com objetos simuladores de gelatina indicam que o coeficiente de atenuação tende a aumentar com a concentração do material, em concordância com a tendência observada experimentalmente (BADAWE et al., 2024b).

REMUNOM
ISSN 2178-6925

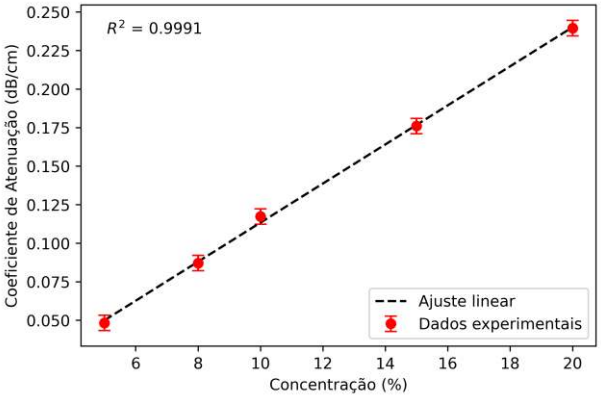
Received: 28/01/2026 - **Accepted:** 08/02/2026
Vol: 02.02
DOI: 10.66104/gdzzdb84
Pages: 1-37

Por fim, revisões sistemáticas recentes mostram que os intervalos de velocidade e atenuação aqui obtidos estão inseridos nas faixas típicas reportadas para materiais simuladores de tecido utilizados em aplicações ultrassônicas (JAWLI et al., 2024a). Esses resultados reforçam a coerência física dos parâmetros acústicos medidos e a adequação do material estudado como objeto simulador acústico.

Figura 4: (a) Velocidade longitudinal de propagação do ultrassom em função da concentração do gel. Os pontos representam os valores experimentais e as barras de erro correspondem à propagação das incertezas associadas à medida da espessura da amostra e à resolução temporal do sistema de aquisição. (b) Coeficiente de atenuação do ultrassom em função da concentração do gel, expresso em dB/cm. Os pontos representam os valores experimentais e as barras de erro correspondem à incerteza associada à medida da espessura da amostra. A linha tracejada, em ambos, indica o ajuste linear dos dados.



(a)



(b)

A velocidade transversal foi estimada a partir da relação percentual $c_T\ /c_L$, obtida com base em valores reportados na literatura (NEIDHARDT, 2021; JAWLI et al., 2024; BADAWE et al., 2024) para materiais gelatinosos com propriedades mecânicas semelhantes, expostos na Tabela 2.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 28/01/2026 - **Accepted:** 08/02/2026
Vol: 02.02
DOI: 10.66104/gdzzdb84
Pages: 1-37

Tabela 2: Valores de concentração do gel, velocidade longitudinal (m/s), relação percentual entre as velocidades transversal e longitudinal (%) e velocidade transversal estimada (m/s).

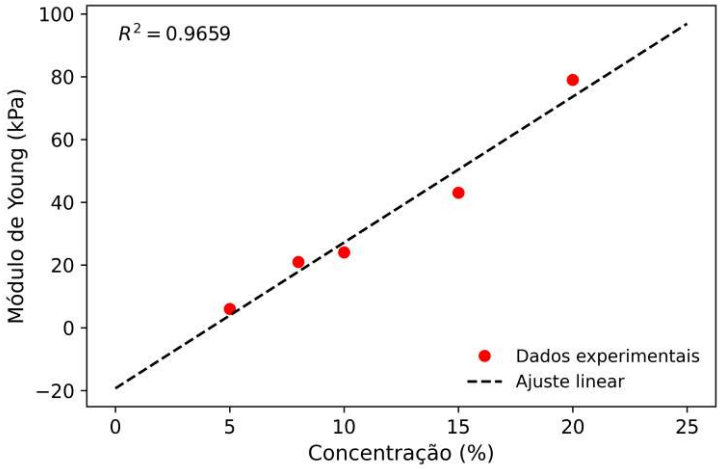
Concentração (%)	$c_L(m/s)$	$c_T/c_L(\%)$	$c_T(m/s)$
5	1516,85	0,09	1,36
8	1527,97	0,17	2,59
10	1537,40	0,18	2,76
15	1551,57	0,24	3,72
20	1567,73	0,32	5,01

O módulo de Young foi estimado a partir dos valores dos módulos de elasticidade transversal e volumétrico, estes por sua vez dependem da velocidade transversal e do módulo elástico longitudinal, respectivamente. Neste trabalho, todos esses valores foram obtidos a partir de relações com a velocidade longitudinal medida experimentalmente, de modo que as incertezas associadas a c_L já contemplam a variabilidade experimental do parâmetro e os resultados obtidos para este estão na Figura 5. Embora o material seja composto apenas por água e gelatina, a gelificação resulta na formação de uma rede polimérica física tridimensional, estabilizada por interações intermoleculares entre cadeias polipeptídicas. O aumento da concentração favorece a formação de zonas de junção e a densidade efetiva dessa rede, levando a um crescimento não linear do módulo de Young. Tal resultado está de acordo com o apresentado na literatura, onde a 20 °C e para a concentração de 20% de gelatina este módulo elástico possui valor de 75 kPa (TABERLET et al., 2017), considerando um aumento de 5 °C resultou em 79 kPa, sendo este coerente.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 28/01/2026 - **Accepted:** 08/02/2026
Vol: 02.02
DOI: 10.66104/gdzzdb84
Pages: 1-37

Figura 5: Módulo de Young estimado em função da concentração do gel. Os valores foram obtidos a partir da velocidade longitudinal de propagação do ultrassom.



3.2. Amostras irradiadas

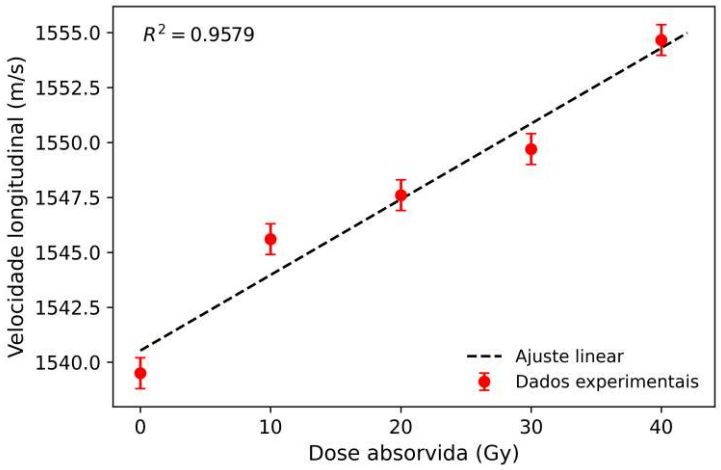
Os resultados experimentais da velocidade ultrassônica longitudinal são apresentados na Figura 6, as incertezas são da ordem de 0,7 m/s para todas as doses, sendo determinada principalmente pela resolução temporal do osciloscópio e pela repetibilidade da determinação do tempo de voo. Observa-se que a variação de 15,18 m/s da velocidade com a dose, no intervalo entre (1539,48 ± 0,79) m/s e (1554,66± 0,19) m/s, para amostras de 0 e 40 Gy, respectivamente. Este resultado é consistente ao longo do intervalo investigado, e estão em concordância com estudos prévios que investigaram a sensibilidade de parâmetros físicos do dosímetro à dose absorvida (DHAKAL et al., 2021; SALMAN et al., 2025). Em particular, Masoumi e colaboradores demonstraram que parâmetros ultrassônicos, como a velocidade de propagação e o coeficiente de atenuação, apresentam variação mensurável com a dose em géis MAGIC-F irradiados, evidenciando o potencial do ultrassom como técnica alternativa de leitura do dosímetro (MASOUMI et al., 2016).

Figura 6: Velocidade longitudinal de propagação do ultrassom em função da dose absorvida para as amostras irradiadas de gel MAGIC-F. Os pontos representam os

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 28/01/2026 - **Accepted:** 08/02/2026
Vol: 02.02
DOI: 10.66104/gdzzdb84
Pages: 1-37

valores médios de cinco medições independentes e as barras de erro correspondem à incerteza combinada associada à medida da espessura da amostra e à resolução temporal do sistema de aquisição. A linha tracejada indica o ajuste linear dos dados.



Como mostrado, observou-se um aumento sistemático da velocidade longitudinal no intervalo de dose absorvida nos géis irradiados. Esse comportamento é esperado, pois conforme a Equação (12) e Equação (11), a velocidade longitudinal e transversal são proporcionais ao módulo elástico longitudinal e transversal. Um outro fator que poderia alterar a elasticidade da amostra seria a própria densidade do gel. No entanto, estudos reportados na literatura indicam que a variação da densidade do gel MAGIC é da ordem de 0,22 kg/m³ na faixa de dose entre 0 e 40 Gy, valor significativamente pequeno quando comparado às variações observadas nos módulos elásticos (MATHER et al., 2002). Sendo assim, observa-se que a flutuação na densidade é desprezível frente às variações do módulo de elasticidade, que podem alcançar até duas ordens de grandeza (VIEIRA et al., 2019).

Dessa forma, eventuais alterações nas propriedades mecânicas do gel são atribuídas predominantemente ao aumento das forças intermoleculares induzidas pelo processo de polimerização, as quais afetam diretamente as velocidades de propagação das ondas ultrassônicas e, consequentemente, o módulo volumétrico efetivo do material. Sabe-se que a absorção de energia ultrassônica em meios

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 28/01/2026 - **Accepted:** 08/02/2026
Vol: 02.02
DOI: 10.66104/gdzzdb84
Pages: 1-37

homogêneos com propriedades equivalentes às da água, como o gel MAGIC, deve-se principalmente à viscosidade volumétrica e às forças intermoleculares, sendo a contribuição da condução de calor geralmente desprezível.

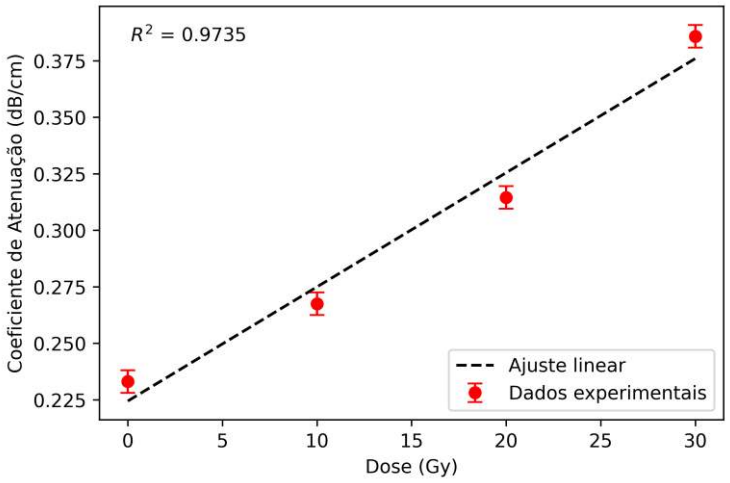
Diversos trabalhos na literatura relatam um aumento sistemático dessas grandezas em função da dose de radiação depositada no gel dosimétrico MAGIC (MATHER et al., 2002; CRESCENTI et al., 2007; VIEIRA et al., 2019), resultados que são compatíveis com o aumento do módulo elástico efetivo do material em função da polimerização induzida pela radiação (MASOUMI et al., 2016).

O coeficiente de atenuação apresentou incerteza aproximada de 0,05 dB/cm, dominada pelas flutuações nas amplitudes dos sinais transmitidos, uma vez que a temperatura dos mesmos fora mantida constante durante as medições. Observa-se na Figura 7 que, no intervalo de doses entre 0 e 30 Gy, o coeficiente de atenuação apresenta crescimento aproximadamente linear, com variações compatíveis com a incerteza experimental. Esse comportamento é consistente com estudos prévios que reportam resposta gradual dos parâmetros ultrassônicos em géis poliméricos para faixas de dose moderadas, associada à polimerização progressiva e relativamente homogênea do material (MASOUMI et al, 2016). Em contraste, a amostra irradiada com 40 Gy resultou em um valor de 1,26 dB/cm, apresentando um aumento significativamente mais pronunciado da atenuação. Esse comportamento sugere um possível desvio da tendência aproximadamente linear observada até 30 Gy, indicando um comportamento diferenciado do material em doses mais elevadas. Ressalta-se, entretanto, que essa interpretação é de caráter descritivo, uma vez que o número de amostras independentes por dose não permite a aplicação de testes estatísticos formais de mudança de regime. Trabalhos sobre o gel MAGIC-F indicam que, em doses mais altas, a intensificação da polimerização pode levar ao aumento da heterogeneidade microestrutural e da densidade da rede polimérica, o que, de acordo com a literatura, pode favorecer mecanismos adicionais de absorção e espalhamento do ultrassom (DHAKAL et al., 2021; CAVEDINI et al., 2022).

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 28/01/2026 - **Accepted:** 08/02/2026
Vol: 02.02
DOI: 10.66104/gdzzdb84
Pages: 1-37

Figura 7: Coeficiente de atenuação ultrassônica em função da dose absorvida para o gel MAGIC-F, com ajuste linear considerado apenas no intervalo de 0 a 30 Gy.



A velocidade transversal foi estimada a partir da relação percentual $c_T\ /c_L$, obtida com base em valores reportados na literatura (VIEIRA et al, 2019) para géis poliméricos MAGIC-F e MAGIC, expostos na Tabela 3. A partir destes valores e mantendo a densidade e o coeficiente de Poisson constantes, o módulo de Young foi calculado.

Tabela 3: Relação percentual entre as velocidades transversal e longitudinal (%) e velocidade transversal estimada (m/s) 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	0,09	1,36
10	1545,61	0,17	2,59
20	1547,55	0,18	2,76
30	1549,72	0,24	3,72
40	1554,66	0,32	5,01

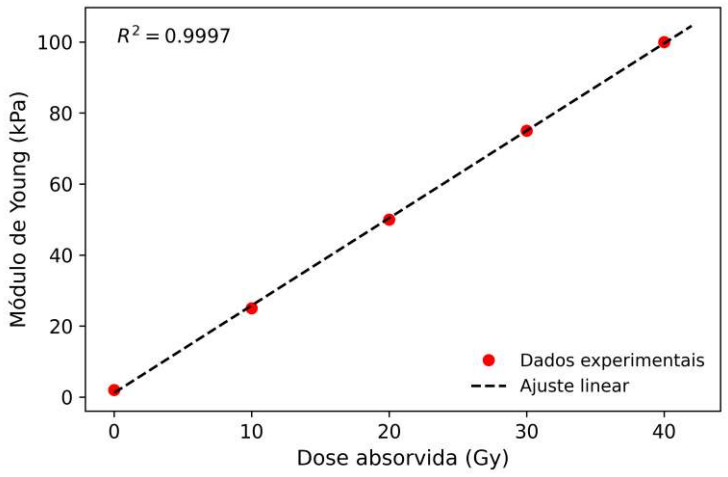
* Fonte: (VIEIRA et al., 2019)

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 28/01/2026 - **Accepted:** 08/02/2026
Vol: 02.02
DOI: 10.66104/gdzzdb84
Pages: 1-37

O módulo de Young apresentou uma variação pronunciada com a dose absorvida como pode ser observado na Figura 8, atingindo um aumento superior a uma ordem de grandeza entre 0 e 40 Gy. A incerteza relativa do módulo de Young foi estimada em aproximadamente 1%, sendo significativamente inferior à variação observada, indicando que o efeito da dose é estatisticamente relevante. Esse resultado evidencia que parâmetros mecânicos derivados de medições ultrassônicas podem atuar como indicadores indiretos da dose absorvida, complementando abordagens consolidadas de leitura do dosímetro.

Figura 8: Módulo de Young estimado em função da dose absorvida para as amostras irradiadas de gel MAGIC-F. Os valores foram obtidos a partir da velocidade longitudinal de propagação do ultrassom, evidenciando o aumento não linear da rigidez do material com a dose.



A estimativa do módulo de Young a partir das velocidades ultrassônicas baseia-se na relação fundamental entre velocidade de propagação, densidade e rigidez elástica do meio, tal como amplamente descrito na literatura de acústica de

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 28/01/2026 - **Accepted:** 08/02/2026
Vol: 02.02
DOI: 10.66104/gdzzdb84
Pages: 1-37

materiais. Estudos clássicos em géis dosimétricos mostraram que alterações nas propriedades ultrassônicas — incluindo velocidade — estão diretamente ligadas a mudanças nos módulos elásticos à medida que a polimerização ocorre após irradiação (MATHER et al., 2002; DE DEENE, 2022).

Se a irradiação alterar a impedância do gel, a atenuação medida contém um erro sistemático significativo que pode mascarar ou amplificar o efeito real. Essa proposição parece bastante plausível uma vez existe trabalhos na literatura que afirmam que não somente a velocidade é alterada, também a densidade do gel com a dose absorvida (MATHER, M. L. *et al*, 2002). Sendo assim, há uma necessidade imperiosa de novos estudos para compreender melhor esse efeito na impedância final do gel irradiado.

Por fim, o coeficiente de Poisson foi estimado a partir das relações da elasticidade linear, conforme a Equação (11), sob as hipóteses adotadas neste estudo, em particular a estimativa indireta da velocidade transversal. Os valores obtidos situam-se próximos àqueles usualmente assumidos para tecidos moles e géis à base de gelatina (VIEIRA, 2009), sendo compatíveis com a aproximação de material quase incompressível frequentemente empregada na literatura. Ressalta-se, entretanto, que esses valores devem ser interpretados como estimativas condicionadas ao modelo adotado, não constituindo uma determinação independente do coeficiente de Poisson.

Cabe destacar que, neste estudo, foi utilizada uma única amostra independente por nível de dose, sendo as incertezas associadas estimadas a partir da repetibilidade instrumental. Dessa forma, as análises estatísticas realizadas possuem caráter descritivo, não sendo possível sustentar inferências estatísticas robustas, como testes formais de mudança de regime ou comparação entre modelos segmentados. A confirmação quantitativa de possíveis transições de comportamento em doses mais elevadas requer estudos futuros com replicação amostral por dose e a aplicação de modelos estatísticos apropriados, como regressões por partes e critérios de informação (AIC/BIC).

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 28/01/2026 - **Accepted:** 08/02/2026
Vol: 02.02
DOI: 10.66104/gdzzdb84
Pages: 1-37

4. Conclusão

Este estudo investigou a aplicabilidade de um sistema ultrassônico como método alternativo para a leitura de dosímetros em gel polimérico MAGIC-F, a partir da análise de parâmetros acústicos e propriedades mecânicas estimadas em função da dose absorvida. 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 do material, com elevados coeficientes de determinação, confirmando a sensibilidade e a reprodutibilidade do sistema para a caracterização acústica de meios gelatinosos.

Para as amostras irradiadas, observou-se aumento sistemático da velocidade ultrassônica longitudinal com a dose absorvida, com variação de aproximadamente 15 m/s entre 0 e 40 Gy, significativamente superior às incertezas experimentais. O coeficiente de atenuação apresentou comportamento aproximadamente linear no intervalo de 0 a 30 Gy, com resposta diferenciada em 40 Gy, indicando a possibilidade de um comportamento diferenciado do material em doses mais elevadas, possivelmente associado ao avanço do processo de polimerização induzida pela radiação. A estimativa do módulo de Young a partir das velocidades ultrassônicas evidenciou aumento superior a uma ordem de grandeza ao longo do intervalo de doses investigado, com incerteza relativa da ordem de 1%, indicando elevada sensibilidade dos parâmetros mecânicos às alterações estruturais do gel. Ressalta-se que as propriedades mecânicas derivadas, incluindo o módulo de Young e o coeficiente de Poisson, foram obtidas como estimativas condicionadas às hipóteses do modelo adotado, particularmente à estimativa indireta da velocidade transversal, não constituindo medições independentes dessas grandezas.

Dessa forma, os resultados demonstram o potencial do ultrassom como ferramenta complementar à ressonância magnética na leitura de dosímetros em gel polimérico, particularmente em contextos nos quais o acesso à RM é limitado. Como perspectivas futuras, destacam-se o refinamento da calibração entre módulo de Young e dose absorvida, a incorporação de modelos viscoelásticos mais completos e a realização de estudos comparativos diretos com a ressonância magnética, visando consolidar o ultrassom como método quantitativo de leitura em dosimetria

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 28/01/2026 - **Accepted:** 08/02/2026
Vol: 02.02
DOI: 10.66104/gdzzdb84
Pages: 1-37

gel tridimensional.

Referências

ALVES, N. *et al.* Cardiac tissue-mimicking ballistic gel phantom for ultrasound imaging in clinical and research applications. *Ultrasound in Medicine & Biology*, v. 46, n. 8, p. 2057–2069, 2020. DOI: 10.1016/j.ultrasmedbio.2020.03.017.

AULD, B. A. *Acoustic fields and waves in solids*. New York: John Wiley & Sons, 1973.

BADAWE, H. M. *et al.* High-resolution acoustic mapping of tunable gelatin-based soft phantoms. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, v. 12, p. 1276143, 2024. DOI: 10.3389/fbioe.2024.1276143.

BALDOCK, C. *et al.* Polymer gel dosimetry. *Physics in Medicine & Biology*, v. 66, n. 12, 2021. DOI: 10.1088/1361-6560/ac0d78.

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*, v. 74, n. 3, p. 229–263, 2024. DOI: 10.3322/caac.21708.

CAFARELLI, A. *et al.* Tuning acoustic and mechanical properties of materials for ultrasound phantoms and smart substrates for cell cultures. *Acta Biomaterialia*, v. 49, p. 368–378, 2017. DOI: 10.1016/j.actbio.2016.11.036.

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, p. 1–15, 2022. DOI: 10.15392/bjrs.v10i4.1732.

CRESCENTI, R. A.; BAMBER, J. C.; BUSH, N. L.; WEBB, S. Characterization of dose-dependent Young's modulus for a radiation-sensitive polymer gel. *Physics in Medicine & Biology*, v. 52, n. 22, p. 665–676, 2007. DOI: 10.1088/0031-9155/52/22/021.

DE DEENE, Y. Radiation dosimetry by use of radiosensitive hydrogels. *Polymers*, v. 14, n. 9, 2022. DOI: 10.3390/polym14091806.

DHAKAL, R. *et al.* Development and application of MAGIC-F gel in radiation dosimetry. *Applied Sciences*, v. 11, n. 17, art. 7783, 2021. DOI: 10.3390/app11177783.

DOYAN, A.; SUSILAWATI; ANNAM, S. Trend research of polymer gel dosimetry: A systematic review. *Journal of Material Science and Radiation*, 2025. Disponível em:

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 28/01/2026 - **Accepted:** 08/02/2026
Vol: 02.02
DOI: 10.66104/gdzzdb84
Pages: 1-37

https://journals.balaipublikasi.id/index.php/jmsr/article/view/362. Acesso em: ___.

FERNANDES, J. P. *et al.* Formaldehyde increases MAGIC gel dosimeter melting point and sensitivity. *Journal of Physics: Conference Series*, v. 164, art. 012004, 2009. DOI: 10.1088/1742-6596/164/1/012004.

FONG, P. M. *et al.* Polymer gels for magnetic resonance imaging of radiation dose distributions at normal room atmosphere. *Physics in Medicine & Biology*, v. 46, n. 12, p. 3105–3113, 2001. DOI: 10.1088/0031-9155/46/12/311.

HAMANN, J. H.; BALDOCK, C. Polymerization mechanisms of polymer gel dosimeters induced by ionizing radiation. *Radiation Physics and Chemistry*, v. 188, art. 109610, 2021. DOI: 10.1016/j.radphyschem.2021.109610.

JAWLI, A. *et al.* Tissue-mimicking material fabrication and properties for multiparametric ultrasound phantoms: A systematic review. *Bioengineering*, v. 11, n. 6, art. 620, 2024. DOI: 10.3390/bioengineering11060620.

JIRÁSEK, A. *et al.* Radiation-induced polymerization in gel dosimeters. *Radiation Physics and Chemistry*, v. 196, art. 110188, 2022. DOI: 10.1016/j.radphyschem.2022.110188.

KIM, H. M. *et al.* Experimental study on properties of ultrasonic coupling and acoustic impedance of polymer hydrogels. *Applied Sciences*, v. 12, n. 3, art. 1236, 2022. DOI: 10.3390/app12031236.

LANDAU, L. D.; LIFSHITZ, E. M. *Theory of elasticity*. 3. ed. Oxford: Pergamon Press, 1986.

LIU, Z. *et al.* Layer-specific shear wave elastography using a multi-layered shear wave dispersion model for assessing viscoelastic properties. *Physics in Medicine & Biology*, v. 66, n. 3, art. 035003, 2021. DOI: 10.1088/1361-6560/abd7b2.

LUBBERS, J.; FLETCHER, C. A. J. A simple and accurate formula for the sound velocity in water. *Ultrasonics*, v. 36, p. 79–82, 1998. DOI: 10.1016/S0041-624X(97)00068-3.

MASOUMI, H.; MOKHTARI-DIZAJI, M.; ARBABI, A.; BAKHSHANDEH, M. Determine the dose distribution using ultrasound parameters in MAGIC-F polymer gels. *Dose-Response*, v. 14, n. 1, p. 1559325815625647, 2016. DOI: 10.1177/1559325815625647.

MATHER, M. L. *et al.* Investigation of ultrasonic properties of PAG and MAGIC polymer gel dosimeters. *Physics in Medicine & Biology*, v. 47, n. 24, p. 4397–4409, 2002. DOI: 10.1088/0031-9155/47/24/304.

MCHUGH, J. *Ultrasound technique for the dynamic mechanical analysis (DMA)*. Berlin: Bundesanstalt

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 28/01/2026 - **Accepted:** 08/02/2026
Vol: 02.02
DOI: 10.66104/gdzzdb84
Pages: 1-37

für Materialforschung und -prüfung, 2008.

NEIDHARDT, M. *Parameter identification for ultrasound shear wave imaging with gelatin phantoms*. 2021. Tese (Doutorado) – Hamburg University of Technology, Hamburg, 2021. Disponível em: https://tubdok.tub.tuhh.de/handle/11420/11263. Acesso em: ___.

ROYER, D.; DIEULESAINT, E. *Elastic waves in solids I: free and guided propagation*. Berlin: Springer, 2000.

SAGSOZ, M. E. Advancements in tissue-equivalent gel dosimeters. *Gels*, 2025. Disponível em: https://www.iris.unict.it/bitstream/20.500.11769/657729/1/Gels_Erdem_2025.pdf. Acesso em: ___.

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*, v. 226, art. 112286, 2025. DOI: 10.1016/j.radphyschem.2024.112286.

TABERLET, N. *et al.* How tall can gelatin towers be? An introduction to elasticity and buckling. *American Journal of Physics*, v. 85, n. 12, p. 908–914, 2017. DOI: 10.1119/1.5003804.

VIEIRA, S. L. *Desenvolvimento de um phantom para treinamento de biópsia de mama guiada por ultrassom*. 2005. Dissertação (Mestrado em Física) – Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, 2005. Disponível em: https://teses.usp.br. Acesso em: ___.

VIEIRA, S. L. *Imagens das propriedades viscoelásticas por ressonância magnética e ultrassom*. 2009. Tese (Doutorado em Física) – Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, 2009. Disponível em: https://teses.usp.br. Acesso em: ___.

VIEIRA, S. L. *et al.* Paraffin-gel tissue-mimicking material for ultrasound-guided needle biopsy phantom. *Ultrasound in Medicine & Biology*, v. 39, n. 12, p. 2477–2484, 2013. DOI: 10.1016/j.ultrasmedbio.2013.06.004.

VIEIRA, S. L. *et al.* Quantitative magnetic resonance elastography for polymer-gel dosimetry phantoms. *Medical Engineering & Physics*, v. 66, p. 102–106, 2019. DOI: 10.1016/j.medengphy.2019.02.005.

ZHANG, X. *et al.* Ultrasound elastography: principles and clinical applications. *Theranostics*, v. 7, n. 5, p. 1303–1329, 2017. DOI: 10.7150/thno.18650.