



# Equação de Gassmann: Condições de Validade e Derivação, Extensão de Berryman e Simulações

Breno M. Damião, IGEO/UFBA; Amin Bassrei, CPGG/IGEO/UFBA & INCT-GP

Copyright 2015, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 14<sup>th</sup> International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, August 3-6, 2015.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 14<sup>th</sup> International Congress of the Brazilian Geophysical Society and do not necessarily represent any position of the SBGf, its officers or members. Electronic reproduction or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of the Brazilian Geophysical Society is prohibited.

## Abstract

Gassmann was one of the first researchers interested in the relationship that the constituents of a rock has with the variation of seismic velocity, establishing the relationship of longitudinal velocities with the bulk modulus and shear modulus of saturated rock and dry rock. In 1951 he published two seminal works. This work reviews the theory of Gassmann (1951), detailing the derivation of the famous equation that bears his name, comparing the original Gassmann notation with modern notation. Finally, this work compares the original approach of Gassmann with the Berryman (1999).

## Introdução

Gassmann foi um dos primeiros estudiosos interessados na relação que os constituintes de uma rocha tem com a variação da velocidade sísmica em estudo, provando de modo sucinto a relação das velocidades compressional e longitudinal com o módulo de incompressibilidade e o módulo cisalhante da rocha saturada e da rocha seca (obtida em laboratório). Em 1951 publicou dois trabalhos seminais. O presente trabalho revisa a teoria de Gassmann (1951), detalhando a derivação da famosa equação que leva o seu nome, comparando a notação original de Gassmann e a notação moderna. Finalmente, o presente trabalho compara a abordagem original de Gassmann com a de Berryman (1999). A importância de tal equação está em relacionar o módulo de incompressibilidade da rocha com a porosidade, o arcabouço e o fluido, tornando possível o estudo de saturações, sendo aplicável tanto na injeção de CO<sub>2</sub> como em outros tipos de fluidos.

## Método

Para a dedução da equação, Gassmann utilizou várias considerações, dentre elas: (i) a rocha deve ser macroscopicamente homogênea e isotrópica; (ii) o movimento dos fluidos não deve ter atrito; (iii) os poros devem ser interconectados; (iv) o sistema deve ser fechado; (v) não deve haver interação química entre o fluido, os minerais e a matriz; (vi) o movimento dos constituintes da rocha deve ser desprezado em relação

ao movimento de toda a formação; (vii) a pressão hidrostática, denotada por  $P_{fl}$ , deve ser constante.

Todo o desenvolvimento algébrico é conduzido na prerrogativa de que a rocha seca é o volume rochoso estudado formado pelos minerais, somada com a parte porosa. Por seu turno, a rocha saturada será a rocha seca mais a porção saturada.

Considere uma superfície  $S_{sat}$  que representa a soma das superfícies composta pela parte dos minerais ( $S_{min}$ ) e com a parcela dos poros saturados ( $S_{fl}$ ). A resultante das forças que atuam no sistema será  $F_{sat}$ , que é força total saturada, resultante da parte dos poros saturados ( $F_{fl}$ ) e da parte dos minerais ( $F_{min}$ ):

$$F_{sat} = F_{fl} + F_{min}.$$

Levando-se em conta que todo o sistema está submetido a pressão hidrostática  $P_{fl}$ , tem-se que:

$$S_{sat}P_{fl} = S_{fl}P_{fl} + S_{min}P_{fl}.$$

A força resultante na parte dos minerais poderá ser escrita como a soma da força da rocha seca ( $F_{seca}$ ) mais a força da área dos minerais submetidas a pressão do fluido ( $P_{fl}$ ):

$$F_{min} = S_{min}P_{fl} + F_{seca}.$$

Assim, a resultante da força na rocha saturada será:

$$F_{sat} = F_{seca} + S_{sat}P_{fl}. \quad (1)$$

Reescrevendo em termos de pressão:

$$F_{sat} = P_{t_{sat}}S_{sat}, \quad (2)$$

onde  $P_{t_{sat}}$  é a pressão total na rocha saturada. A pressão sobre a rocha é

$$F_{seca} = P_{t_{seca}}S_{sat}, \quad (3)$$

onde  $P_{t_{seca}}$  é a pressão total na rocha seca. Substituindo as equações (2) e (3) na equação (1):

$$P_{t_{sat}} = P_{t_{seca}} + P_{fl}.$$

Em um sistema aberto, os poros devem ser expostos, e as variações na pressão dos poros saturados ( $\Delta P_{fl}$ ) e a variação na pressão da rocha seca ( $\Delta P_{t_{seca}}$ ) podem ser separados e tratados de forma independente.

A equação da compressibilidade relaciona a variação relativa de volume com a variação relativa de pressão:

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta p}{k}, \quad (4)$$

onde  $\Delta V$  é a variação no volume,  $V$  é o volume,  $\Delta p$  é variação de pressão e  $k$  é o módulo de incompressibilidade. Gassmann (1951) considerou três situações.

Primeiro caso. Para  $\Delta P_{fl} \neq 0$  e  $\Delta P_{tseca} = 0$ , a rocha seca sofrerá uma contração elástica por conta de uma pressão adicional do poro saturado. Como essa variação será uniforme em todo o volume, então pela auto similaridade, tem-se:

$$\frac{\Delta V_{sat}}{V_{sat}} = \frac{\Delta V_{min}}{V_{min}} = - \frac{\Delta p_{fl}}{k_{min}}.$$

Segundo caso. Para  $\Delta P_{fl} = 0$  e  $\Delta P_{tseca} \neq 0$ , a rocha seca fica com a seguinte expressão:

$$\frac{\Delta V_{sat}}{V_{sat}} = - \frac{\Delta p_{seca}}{k_{seca}}.$$

Terceiro caso.  $V_{min}$  é a parte sólida da rocha seca. Aplicando três vezes o teorema de Love (vide Gassmann, 1951):

$$\Delta V_{min} = \frac{-a^3 \Delta p_{fl}}{3k_{min}} \sum_{i=1}^3 \Delta p_{i seca},$$

onde  $a$  é distância entre dois plano paralelos. Considerando  $a^3 = V_{sat}$

$$\frac{\Delta V_{min}}{V_{sat}} = - \frac{\Delta p_{seca}}{k_{min}}.$$

Para o caso em que o sistema está fechado, ocorrem tensões adicionais  $\Delta p_{fl}$  e  $\Delta p_{seca}$ . A tensão geral  $\Delta p_{sat}$ , podendo ser escrita como:

$$\Delta p_{sat} = \Delta p_{fl} + \Delta p_{seca}. \quad (5)$$

A equação (4) pode ser utilizada para descrever a rocha saturada:

$$\frac{\Delta V_{sat}}{V_{sat}} = - \frac{\Delta p_{sat}}{k_{sat}},$$

e também para a parcela dos poros saturados:

$$\frac{\Delta V_{fl}}{V_{fl}} = - \frac{\Delta p_{fl}}{k_{fl}}.$$

Com a variação dos dois modelos  $\Delta P_{fl} \neq 0$  e  $\Delta P_{seca} \neq 0$ , a compressibilidade da rocha seca será a soma das frações em  $\Delta P_{fl}$  e  $\Delta P_{seca}$ , ficando:

$$\frac{\Delta V_{sat}}{V_{sat}} = - \frac{\Delta p_{fl}}{k_{min}} - \frac{\Delta p_{seca}}{k_{seca}}.$$

Com a mesma variação é possível descrever a compressibilidade da parcela do mineral ficando com a soma dos constituintes para as duas variações:

$$\frac{\Delta V_{min}}{V_{sat}} = - \frac{(1-n)\Delta p_{fl}}{k_{min}} - \frac{\Delta p_{seca}}{k_{min}}.$$

Através das relações de porosidade,

$$\phi = \frac{V_{fl}}{V_{sat}},$$

e

$$(1 - \phi) = \frac{V_{min}}{V_{sat}},$$

e das relações da soma de variações do volume:

$$\Delta V_{sat} = \Delta V_{min} + \Delta V_{fl},$$

e

$$\frac{\Delta V_{sat}}{V_{sat}} = \frac{\Delta V_{min}}{V_{sat}} + \frac{\Delta V_{fl}}{V_{sat}},$$

Com tais definições temos que:

$$\Delta p_{sat} = - \frac{(1-\phi)k_{sat}\Delta p_{fl}}{k_{min}} - \frac{k_{sat}\Delta p_{seca}}{k_{min}} - \frac{\phi k_{sat}\Delta p_{fl}}{k_{fl}}, \quad (6)$$

$$\Delta p_{fl} = \frac{\Delta p_{seca}(-k_{min}k_{fl} + k_{seca}k_{fl})}{k_{seca}k_{fl} - (1-\phi)k_{seca}k_{fl} - k_{seca}k_{min}\phi}, \quad (7)$$

Substituindo as equações (6) e (7) na equação (5) temos a famosa equação de Gassmann:

$$k_{sat} = k_{seca} + \frac{\left(1 - \frac{k_{seca}}{k_{min}}\right)^2}{\frac{\phi}{k_{fl}} + \frac{(1-\phi)}{k_{min}} - \frac{k_{seca}}{k_{min}^2}}. \quad (8)$$

As densidades dos constituintes da rocha saturada e da rocha seca podem ser escritos como:

$$\rho_{sat} = \frac{m_{sat}}{V_{sat}},$$

$$\rho_{min} = \frac{m_{min}}{V_{min}},$$

e

$$\rho_{seca} = \frac{m_{min}}{V_{sat}}.$$

Introduzindo a porosidade nas relações acima, temos que

$$\rho_{seca} = (1-\phi) \rho_{min},$$

e

$$\rho_{sat} = \rho_{seca} + \phi \rho_{fl}.$$

Finalmente, Gassmann (1951) ainda deduz as velocidades cisalhantes e longitudinal:

$$V_C = \sqrt{\frac{\mu_{sat}}{\rho_{sat}}},$$

e

$$V_L = \sqrt{\frac{k_{sat} + \frac{4\mu_{sat}}{3}}{\rho_{sat}}}.$$

### Módulo de Cisalhamento

Para explicar o módulo de cisalhamento, Gassmann (1951) trabalha com mais uma hipótese, tornando um pouco confuso o desenvolvimento da sua teoria. Berryman (1999) consegue resolver esse impasse, provando a igualdade dos módulos de cisalhamento da rocha saturada com a rocha seca. Ele trabalha com a matriz de coeficientes elásticos e acrescenta a influência da pressão do fluido do poro saturado:

$$\begin{pmatrix} e_{11} \\ e_{22} \\ e_{33} \\ \xi \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} seca & S_{12} seca & S_{12} seca & -B \\ S_{12} seca & S_{11} seca & S_{12} seca & -B \\ S_{12} seca & S_{12} seca & S_{11} seca & -B \\ -B & -B & -B & -\gamma \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ -p_f \end{pmatrix}, \quad (9)$$

onde  $e_{ij}$  é a deformação,  $s_{ij} seca$  é a complacência,  $\sigma_{ii}$  é o esforço,  $p_f$  é a pressão do fluido de saturação,  $\xi$  é a deformação causada pela pressão do fluido de saturação.  $B$  e  $\gamma$  são parâmetros que dependem do meio poroso e da complacência do fluido. Os recíprocos dos elementos da matriz de coeficientes elásticos (complacências) podem ser escritos de forma explícita:

$$S_{11} seca = \frac{\lambda_{seca} + \mu_{seca}}{\mu_{seca}(3\lambda_{seca} + 2\mu_{seca})} = \frac{1}{9k_{seca}} + \frac{1}{3\mu_{seca}},$$

$$S_{12} seca = \frac{\nu_{seca}}{E_{seca}} = \frac{1}{9k_{seca}} - \frac{1}{6\mu_{seca}},$$

onde  $\nu_{seca}$  é a razão de Poisson, e  $E_{seca}$  é o módulo de Young,  $\mu_{seca}$  é o módulo de cisalhamento,  $\lambda_{seca}$  é a incompressibilidade do fluido.

Pela hipótese de Gassmann, ocorre uma variação de pressão no volume rochoso sem que haja deformação, de modo que:

$$\xi = 0.$$

Da equação (9) temos que:

$$-p_f = \frac{B}{\gamma} (\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}).$$

De modo que igualando-se as matrizes descritas pela complacência da rocha saturada com a rocha seca, obtém-se as seguintes expressões:

$$\begin{pmatrix} S_{11} sat & S_{12} sat & S_{12} sat \\ S_{12} sat & S_{11} sat & S_{12} sat \\ S_{12} sat & S_{12} sat & S_{11} sat \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} seca & S_{12} seca & S_{12} seca \\ S_{12} seca & S_{11} seca & S_{12} seca \\ S_{12} seca & S_{12} seca & S_{11} seca \end{pmatrix} - \frac{B^2}{\gamma} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}.$$

Da última equação podemos explicitar as seguintes relações

$$S_{11} sat = S_{11} seca - \frac{B^2}{\gamma},$$

e

$$S_{12} sat = S_{12} seca - \frac{B^2}{\gamma}.$$

Reescrevendo:

$$\frac{1}{9k_{sat}} + \frac{1}{3\mu_{sat}} = \frac{1}{9k_{seca}} + \frac{1}{3\mu_{seca}} - \frac{B^2}{\gamma}, \quad (10)$$

e

$$\frac{1}{9k_{sat}} - \frac{1}{6\mu_{sat}} = \frac{1}{9k_{seca}} - \frac{1}{6\mu_{seca}} - \frac{B^2}{\gamma}. \quad (11)$$

Subtraindo a equação (11) da equação (10), temos a chamada hipótese de Gassmann:

$$\mu_{seca} = \mu_{sat}. \quad (12)$$

### Exemplo Ilustrativo de Gassmann

Considere os seguintes dados de entrada, no CGS, para um sistema fechado, obtidos em laboratório (Gassmann, 1951): (i) porosidade aparente ( $\phi$ ): 13,3%; (ii) porosidade verdadeira ( $\phi_v$ ): 17,1%; densidade da rocha seca ( $\rho_{seca}$ ): 2,23 g/cm<sup>3</sup>; (iv) velocidade da onda longitudinal na rocha seca ( $V_{L seca}$ ): 2,3 x 10<sup>5</sup> cm/s; (v) velocidade da onda transversal na rocha seca ( $V_{T seca}$ ): 1,3 x 10<sup>5</sup> cm/s; (vi) velocidade da onda longitudinal da parcela fluida ( $V_{L fl}$ ): 1,435 x 10<sup>5</sup> cm/s; (vii) densidade da água ( $\rho_{\acute{a}gua}$ ): 1 g/cm<sup>3</sup>; (viii) densidade do gás preso na porosidade fechada ( $\rho_{g\acute{a}s}$ ): 0,0013 g/cm<sup>3</sup>; (ix) densidade da água ( $\rho_{\acute{a}gua}$ ): 1 g/cm<sup>3</sup>; e (x) módulo de incompressibilidade do mineral ( $\kappa_{min}$ ): 25 x 10<sup>10</sup> dina/cm<sup>2</sup>.

A densidade do fluido da parte sólida é:

$$\rho_{min} = \frac{\rho_{seca}}{1-\phi} = 2,57 \text{ g/cm}^3.$$

Considerando a expressão da velocidade de propagação da onda longitudinal na rocha seca como sendo

$$V_{L\text{ seca}} = \sqrt{\frac{M_{\text{seca}}}{\rho_{\text{seca}}}},$$

o módulo da onda P para a rocha seca pode ser determinado, e no caso,  $M_{\text{seca}} = 11,8 \times 10^{10}$  dina/cm<sup>2</sup>.

Considerando a expressão da velocidade de propagação da onda transversal na rocha seca como sendo

$$V_{C\text{ seca}} = \sqrt{\frac{\mu_{\text{seca}}}{\rho_{\text{seca}}}},$$

o módulo de rigidez para a rocha seca pode ser determinado, e no caso,  $\mu_{\text{seca}} = 3,77 \times 10^{10}$  dina/cm<sup>2</sup>.

O módulo de incompressibilidade na rocha seca ( $k_{\text{seca}}$ ) pode ser calculado pela expressão

$$k_{\text{seca}} = M_{\text{seca}} + \frac{4\mu_{\text{seca}}}{3} = 6,8 \times 10^{10} \frac{\text{dina}}{\text{cm}^2}.$$

Considerando a expressão da velocidade de propagação da onda longitudinal na parcela fluida como sendo

$$V_{L\text{ fl}} = \sqrt{\frac{M_{\text{fl}}}{\rho_{\text{fl}}}},$$

o módulo da onda P na parcela fluida ( $M_{\text{fl}}$ ) pode ser determinado, e no caso,  $M_{\text{fl}} = 2,06 \times 10^{10}$  dina/cm<sup>2</sup>.

O módulo de incompressibilidade na rocha seca ( $k_{\text{seca}}$ ) pode ser calculado pela expressão

$$k_{\text{fl}} = M_{\text{fl}} + \frac{4\mu_{\text{fl}}}{3} = 2,06 \times 10^{10} \text{ dina/cm}^2.$$

Note que  $\mu_{\text{fl}} = 0$ . Finalmente, utilizando a equação de Gassmann, podemos encontrar o módulo de incompressibilidade da rocha saturada:

$$k_{\text{sat}} = 12,8 \times 10^{10} \text{ dina/cm}^2.$$

Considerando  $\mu_{\text{seca}} = \mu_{\text{sat}}$ , tem-se que  $\mu_{\text{sat}} = 3,77 \times 10^{10}$  dina/cm<sup>2</sup>.

A densidade da rocha saturada é determinada por:

$$\rho_{\text{sat}} = \rho_{\text{seca}} + \phi \rho_{\text{fl}} = 2,363 \text{ g/cm}^3.$$

Introduzindo esses valores na expressão da velocidade na rocha saturada:

$$V_{\text{sat}} = 2,748394 \times 10^5 \text{ cm/s}.$$

## Aplicabilidade da Equação de Gassmann

A pressão dos poros, juntamente com a saturação, o tipo de rocha, fluido, idade, razão entre arenito e argila, e a profundidade, irão influenciar os dados para o uso da equação de Gassmann. O dióxido de carbono quando injetado altera as características do meio, precipitando minerais e alterando a própria porosidade. O módulo de incompressibilidade da rocha seca será determinante na mudança da porosidade porque com altos valores, determina-se pouca variação da velocidade, implicando em baixo sucesso para o estudo sísmico de monitoramento de injeção. A porosidade determinará a mudança da velocidade nos modelos, portanto, menores valores de porosidades implicarão em aproximação para o módulo de incompressibilidade da rocha seca com a rocha saturada, dificultando o estudo sísmico de monitoramento.

## Resultado de Simulações

A equação da velocidade pode ser escrita em termos da parte porosa, da parte fluida, da rocha seca e da rocha saturada. O módulo cisalhante foi provado ser igual tanto para a parte da rocha seca quanto para a parcela da rocha saturada. O fluido pode ser estendido adicionando uma nova parcela de saturação, possibilitando assim o trabalho de substituição de fluidos encontrados em reservatórios, tomando a equação de Gassmann um grande marco da indústria do petróleo. A densidade da rocha saturada também é escrita em termos de parcelas de todo o material envolvido nos estudos. Levando em conta a porosidade aparente que é a base para todos os tipos de relação que condizem boa aproximação para o estudo adotado. O ar que é o fluido que preenche a rocha seca, em termos de módulo de incompressibilidade é desconsiderado, devido sua baixa influencia, porém, nos cálculos para a densidade é levado em conta o que torna a densidade da rocha seca diferente da densidade da rocha saturada.

Os fluidos são prioridade no processo de monitoramento, e os mesmos devem ser mapeados e delimitados. É possível observar as diferentes velocidades compressoriais para diferentes saturações; quanto maior for a porosidade e a saturação, maior será a velocidade. Em um reservatório contendo fluido, vários agentes internos são responsáveis por alterar a porosidade da rocha, como por exemplo: diagênese, sedimentação de minerais contido em fluidos que estejam dentro do poro, esforços compressoriais ou distensionais (tectônico), a quantidade de argila que compõe a rocha, temperatura de todo o sistema, forma da deposição de material sedimentar, dentre outros. A Figura 1 mostra o módulo de incompressibilidade em função da porosidade e a Figura 2 a velocidade compressional em função da porosidade.

Quanto maior for a porosidade, menor será a velocidade compressional e o módulo de incompressibilidade. A satisfatória para porosidades entre 0.0 e 0.5, porque quando ultrapassa esse valor, a porosidade é considerada inversa, de modo que não se tem fluido na rocha e sim fragmentos de rocha dentro do fluido. Então,

o decréscimo da velocidade começa a sofrer pouca variação a partir da porosidade igual a 0.5.

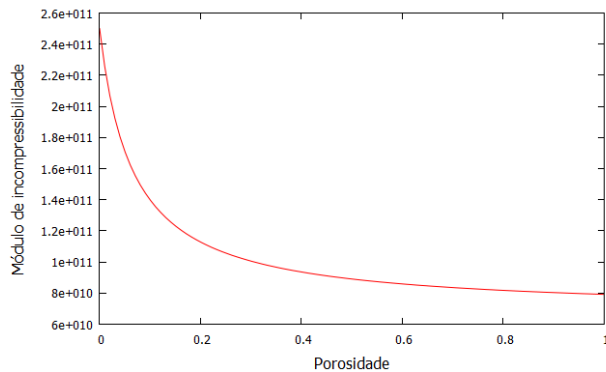


Figura 1: Módulo de incompressibilidade (em  $dina/cm^2$ ) em função da porosidade.

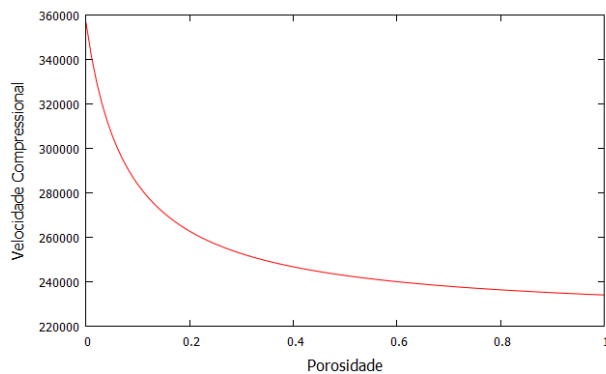


Figura 2: Velocidade compressional (em cm/s) em função da porosidade.

## Conclusões

A equação de Gassmann continua válida, apesar de ter sido demonstrada em 1951, e baseada numa série de premissas. Ela tem sido comprovada por ter suas conjecturas provadas, possibilitando o aprofundamento de pesquisas sobre as propriedades petrofísicas das rochas. Os resultados mostram influência direta da porosidade aparente na determinação da velocidade compressional. Para o uso de dados laboratório, a aproximação da rocha quase seca para a rocha seca é admitida, visto que a módulo de incompressibilidade do ar é muito baixo comparada aos módulos de incompressibilidade do fluido do sistema e dos minerais, que são, respectivamente, da ordem de  $10^{10} \text{ dina/cm}^2$  e  $10^6 \text{ dina/cm}^2$ .

## Agradecimentos

Os autores agradecem à FINEP pelo apoio à Rede Cooperativa de Pesquisa em Geofísica de Exploração (Rede 01 – Fase 5), e ao CNPq e PETROBRAS pelo apoio ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia de Geofísica de Petróleo (INCT-GP). Breno M. Damião agradece ao CNPq pela bolsa de Iniciação Tecnológica associada ao projeto Rede 01. Amin Bassrei agradece ao CNPq pelo projeto 308.690/2013-3 (bolsa de produtividade de pesquisa).

## Referências

- Gassmann, F., 1951, Über die Elastizität poröser Medien. Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zurich, vol. 96, 1 – 23. A tradução para o inglês está disponível em M. A. Pelissier et al, 2007, Classics of Elastic Wave Theory (Geophysical Reprint No. 24), Society of Exploration Geophysicists.
- Berryman, J. G., 1999, Tutorial Origin of Gassmann's equations. Geophysics, vol. 64, n. 5, 1627-1629.
- Quintilliano, J. D. M., 2014, Influência da porosidade e da saturação de água sobre o módulo bulk da rocha seca via equação de Gassmann. VI Simpósio Brasileiro de Geofísica.
- Russell, B. et al., 2001, Fluid-property discrimination with AVO: A Biot-Gassmann perspective. CREWES Research Report, vol. 13.
- Mavko, G. & Mukerji, T., 1995, Seismic por space compressibility and Gassmann's relation. Geophysics, vol. 60, n. 6, 1743-1749.

Nomenclatura	Notação de Gassmann	Notação Moderna
Porosidade aparente	$n$	$\phi$
Porosidade verdadeira	$n_w$	$\phi_v$
Porosidade do sólido	$n_f$	$\phi_{min}$
Força	$\beta$	F
Área da rocha saturada	$F$	$S_{sat}$
Área da parte sólida	$\hat{F}$	$S_{min}$
Área da parte fluida	$\tilde{F}$	$S_{fl}$
Volume da parte sólida	$\hat{V}$	$V_{min}$
Volume da parte fluida	$\tilde{V}$	$V_{fl}$
Volume da rocha saturada	$V$	$V_{sat}$
Volume de poro inacessível para a água	$\tilde{V}'$	$V_{fLI}$
Diferença de volume da parte sólida	$\Delta\hat{V}$	$\Delta V_{min}$
Diferença de volume na parte fluida	$\Delta\tilde{V}$	$\Delta V_{fl}$
Diferença de volume da rocha saturada	$\Delta V$	$\Delta V_{sat}$
Diferença de volume da rocha seca	$\Delta\bar{V}$	$\Delta V_{seca}$
Massa da parte sólida	$\hat{m}$	$m_{min}$
Massa da parte fluida	$\tilde{m}$	$m_{fl}$
Massa da rocha saturada	$m$	$m_{sat}$
Densidade da parte sólida	$\hat{\rho}$	$\rho_{min}$
Densidade da parte fluida	$\tilde{\rho}$	$\rho_{fl}$
Densidade da rocha seca	$\bar{\rho}$	$\rho_{seca}$
Densidade da rocha saturada	$\rho$	$\rho_{sat}$
Pressão da parte sólida	$\hat{p}$	$p_{min}$
Pressão da parte fluida	$\tilde{p}$	$p_{fl}$
Pressão da rocha saturada	$p$	$p_{sat}$
Pressão da rocha seca	$\bar{p}$	$p_{seca}$
Pressão total da rocha seca	$\bar{p}_N$	$Pt_{seca}$
Pressão total da rocha saturada	$p_N$	$Pt_{sat}$
Diferença de pressão da parte sólida	$\Delta\hat{p}$	$\Delta p_{min}$
Diferença de pressão da parte fluida	$\Delta\tilde{p}$	$\Delta p_{fl}$
Diferença de pressão da rocha saturada	$\Delta p$	$\Delta p_{sat}$
Diferença de pressão da rocha seca	$\Delta\bar{p}$	$\Delta p_{seca}$
Módulo de incompressibilidade da parte sólida	$\hat{k}$	$k_{min}$
Módulo de incompressibilidade da parte fluida	$\tilde{k}$	$k_{fl}$
Módulo de incompressibilidade da rocha saturada	$k$	$k_{sat}$
Módulo de incompressibilidade da rocha seca	$\bar{k}$	$k_{seca}$
Módulo de cisalhamento da parte sólida	$\hat{\mu}$	$\mu_{min}$
Módulo de cisalhamento da parte fluida	$\tilde{\mu}$	$\mu_{fl}$
Módulo de cisalhamento da rocha saturada	$\mu$	$\mu_{sat}$
Módulo de cisalhamento da rocha seca	$\bar{\mu}$	$\mu_{seca}$
Módulo da onda P da parte sólida	$\hat{M}$	$M_{min}$
Módulo da onda P da parte fluida	$\tilde{M}$	$M_{fl}$
Módulo da onda P da rocha saturada	$M$	$M_{sat}$
Módulo da onda P da rocha seca	$\bar{M}$	$M_{seca}$
Velocidade da onda longitudinal na rocha seca	$v_t$	$V_{L\ seca}$
Velocidade da onda transversal na rocha seca	$w_t$	$V_{T\ seca}$
Velocidade da onda longitudinal na parcela fluida	$\tilde{v}$	$V_{L\ fl}$
Velocidade da onda longitudinal na rocha saturada	$v$	$V_{L\ sat}$
Velocidade da onda transversal na rocha saturada	$w$	$V_{T\ sat}$

Tabela 1: Correspondência entre a notação original de Gassmann (1951) e a notação moderna.