

**ANÁLISE DA VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS
COMPRESSIVAS (V_P) E CISALHANTES (V_S) DE QUATRO LITOTIPOS EM
CONDIÇÕES SECA E SATURADA**

Júlia Lopes FIGUEIREDO ¹; Danúbia Germano DAMACENO ²; Matheus Sant'Anna ANDRADE ³;
Bárbara Emilly Vieira Firmino e SOUZA ⁴; Inácio Diniz CARVALHO ⁵; Cibeles CLÁUVER ⁶

Resumo – Este estudo investigou a variação das velocidades de propagação de ondas primárias (V_P) e secundárias (V_S) em quatro litotipos (calcário, calcarenito, filito e sienogranito), decorrente da alteração nas condições de saturação. Para caracterização dos litotipos foram realizados os ensaios dos índices físicos de porosidade (η) e massa específica (ρ_d). Os resultados apontaram que, com exceção do filito, a V_P aumentou na condição saturada, enquanto a V_S reduziu. No filito, pela presença de foliação marcante e, conseqüente, aumento dos vazios, registrou-se redução das velocidades V_P e V_S tanto no estado seco, quanto saturado. Observou-se uma relação inversamente proporcional entre as velocidades e a porosidade, e diretamente proporcional com a massa específica, especialmente para a V_P do calcário no estado seco e a V_S no estado saturado, que apresentou maior ρ_d e menor η . O filito, por outro lado, com menor ρ_d e maior η , exibiu menores valores de V_P e V_S nas duas condições. Tais relações também foram evidentes nas V_S saturadas. O comportamento atípico do calcarenito que, apesar de apresentar a segunda maior ρ_d e a segunda menor η , obteve a maior V_P quando saturado e a terceira menor V_P e V_S quando seco, sugere a necessidade de mais estudos acerca da sua caracterização e morfologia de poros.

Abstract – This study investigated the variation in the propagation velocities of primary (V_P) and secondary (V_S) waves in four lithotypes (limestone, calcarenite, phyllite, and syenogranite) resulting from changes in saturation conditions. Physical property tests, including porosity (η) and specific dry mass (ρ_d), were conducted for lithotype characterization. The results indicated that, with the exception of phyllite, V_P increased under saturated conditions, while V_S decreased. In phyllite, due to the presence of foliation and consequent increase in voids, a reduction in V_P and V_S velocities was observed, both in the dry and saturated states. An inversely proportional relationship was observed between velocities and porosity, and directly proportional to specific dry mass, especially for the V_P of limestone in the dry state and the V_S in the saturated state, which presented higher ρ_d and lower η . On the other hand, the phyllite, with lower ρ_d and higher η , exhibited lower V_P and V_S values in both conditions. These relationships were also evident in the saturated V_S . The atypical behavior of calcarenite, which, despite presenting the second largest ρ_d and the second smallest η , obtained the largest V_P when saturated and the third smallest V_P and V_S when dry, suggests the need for further studies on its characterization and pore morphology.

Palavras-Chave – Litotipos; Ondas primárias (P); Ondas secundárias (S); Saturação; Velocidade de propagação.

¹ Eng., BSc Universidade Federal de Viçosa, (31) 3612-6138, julia.l.figueiredo@ufv.br

² Universidade Federal de Viçosa, (31) 3612-6138, danubia.damaceno@ufv.br

³ Eng., Msc., Universidade Federal de Viçosa, (31) 3612-6138, matheus.andrade@ufv.br

⁴ Eng., Msc., VALE S.A, (31) 3691-4300, barbara.vieira.souza@vale.com

⁵ Geól., PhD, VALE S.A, (31) 3691-4300, inacio.carvalho@vale.com

⁶ Eng., PhD, Universidade Federal de Viçosa, (31) 3612-6138, cibeles.clauver@ufv.br

1. INTRODUÇÃO

A velocidade de propagação das ondas elásticas em um corpo reflete sua capacidade de transmitir essas ondas através do seu interior. No campo da engenharia, sua determinação é importante para a compreensão de propriedades físicas e mecânicas das rochas, essenciais para projetos geotécnicos. As ondas elásticas são resultantes de uma perturbação no meio e se classificam em duas categorias, diferenciando-se pela forma como as partículas se movimentam: as ondas primárias (P) e as secundárias (S). As ondas-P, também chamadas de compressionais, se deslocam com maior velocidade que as ondas-S por movimentos de compressão ou expansão das partículas, deslocando-se longitudinalmente. Já as ondas-S, conhecidas como ondas de cisalhamento ou transversais, propagam-se perpendicularmente à direção de deslocamento da onda (Kearey, Brooks e Hill, 2009; Viana e Simas, 2024).

A propagação de ondas elásticas nas rochas é influenciada por fatores como: porosidade, densidade, forma das partículas do material, além de tensões aplicadas e saturação do meio (Dobrin e Savit, 1976; Thomas, 2000; Vukadin, Orešković e Kutasi 2021; Lemos, 2024). O conhecimento das velocidades V_P e V_S possibilita o cálculo da razão do coeficiente de Poisson e a estimativa de módulos elásticos a partir de correlações, fornecendo informações sobre a resistência de litotipos e seus comportamentos. Além disso, esse parâmetro funciona como um índice para avaliar a qualidade das rochas, especialmente no que diz respeito aos graus de fissuração e alteração (Kearey, Brooks e Hill, 2009; Lemos, 2024).

Determinadas a partir do ensaio indireto de propagação de pulso ultrassônico, as velocidades de propagação de ondas primárias e secundárias podem ser estimadas de maneira rápida e não-destrutiva, fornecendo informações sobre propriedades físicas e mecânicas das rochas. Dessa forma, este trabalho visa analisar as velocidades de propagação das ondas primárias (V_P) e secundárias (V_S) em quatro litotipos, considerando as condições seca e saturadas das amostras, além de correlacionar essas velocidades aos índices físicos das rochas, como porosidade e massa específica aparente seca.

2. METODOLOGIA

2.1. Caracterização dos litotipos

Foram selecionados quatro litotipos para os ensaios, conforme ilustrado na Figura 1: duas rochas sedimentares, calcário (a) e calcarenito (b), uma rocha metamórfica, o filito (c) e uma rocha ígnea, o sienogranito (d). O calcário, o filito e o sienogranito foram analisados em cinco amostras cada, enquanto o calcarenito foi estudado em três amostras, devido a limitações na disponibilidade de materiais.

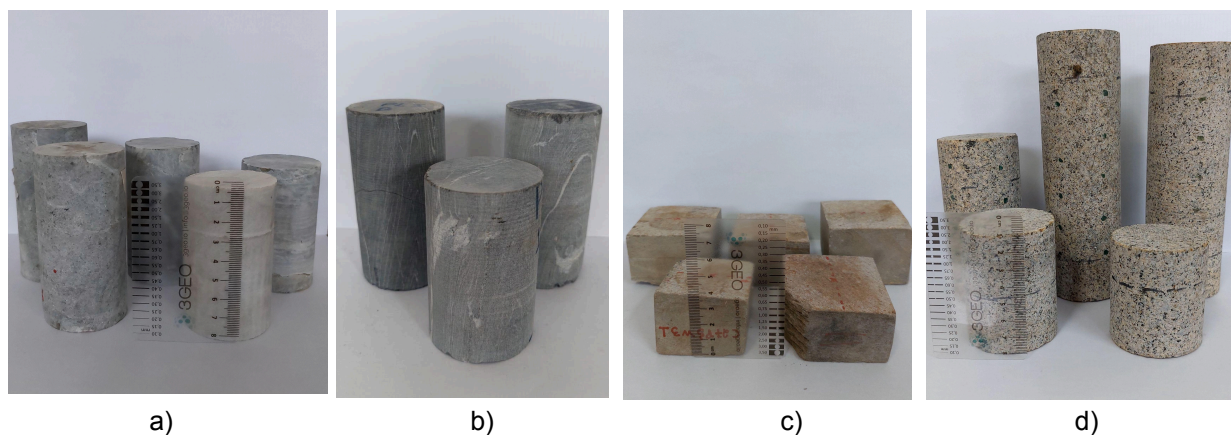


Figura 1. Amostras dos litotipos analisados. a) Calcário; b) Calcarenito; c) Filito; d) Sienogranito

2.2. Ensaios de índices físicos

Os ensaios de massa específica e porosidade foram realizados de acordo com a *International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering* (ISMR) pela ISMR (2007) em cada uma das amostras dos quatro litotipos. Os corpos de prova foram submetidos à saturação vácuo, com dois ciclos de uma hora cada, agitando-se o recipiente para garantir a desaeração das amostras. Após a saturação e a medição de todos parâmetros necessários à pesquisa, as amostras foram submetidas à temperatura de 105°C por 24h, em estufa. Utilizando balança hidrostática, obteve-se a massa submersa, massa saturada com superfície seca e massa seca para posterior cálculo dos índices físicos por equações fundamentais da geotecnia.

2.3. Ensaio de velocidade de propagação de ondas

O ensaio para determinação da velocidade de propagação das ondas compressoriais (V_P) e cisalhantes (V_S) foi conduzido de acordo com as diretrizes da ISRM (2014). O equipamento utilizado foi o Ultrassom Pundit PL-200 da fabricante *Proceq*, o qual conta com dois tipos de transdutores para medição. Os transdutores apresentados na Figura 2a, com frequência de 250kHz, foram empregados para medição das velocidades de ondas V_P , acoplando-se à amostra por meio da aplicação de gel à base de água. Já os transdutores da Figura 2b, de 40 kHz, foram utilizados para medição das velocidades de propagação das ondas V_S , acoplando-se às superfícies da amostra a partir de ponteiras. Para garantir a melhor aderência entre os transdutores e as amostras, os corpos de prova foram retificados para garantir que as superfícies estivessem em paralelo e permitissem alcançar o máximo nível de sinal (Uyanik et al., 2019; Lemos, 2024). Cada corpo de prova foi medido em triplicata para garantir a obtenção de valores médios mais representativos.



a) b)
Figura 2. Medição das velocidades das ondas. a) Ondas P; b) Ondas S.

O ensaio foi conduzido em amostras sob condições secas e saturadas, permitindo avaliar a influência da saturação na propagação de ondas elásticas em rochas. A saturação e a secagem foram realizadas conforme descrito no item 2.2, como processo dos ensaios de parâmetros físicos.

A interpretação do sinal dos dados obtidos no ensaio foi executada no software *PL-Link* da fabricante *Proceq* para definição do tempo de chegada das ondas. Apesar do equipamento definir automaticamente esse valor, ressalta-se que é importante que haja uma análise da forma da onda inicial e se sua amplitude é condizente com as demais, com o intuito de reduzir o impacto de possíveis ruídos iniciais na onda. O tempo de chegada tanto das ondas P (Figura 3a), quanto das ondas S (Figura 3b), foram determinados na amplitude 0% no início de cada vale ou crista, conforme ilustrado nas curvas de sinais da Figura 03.

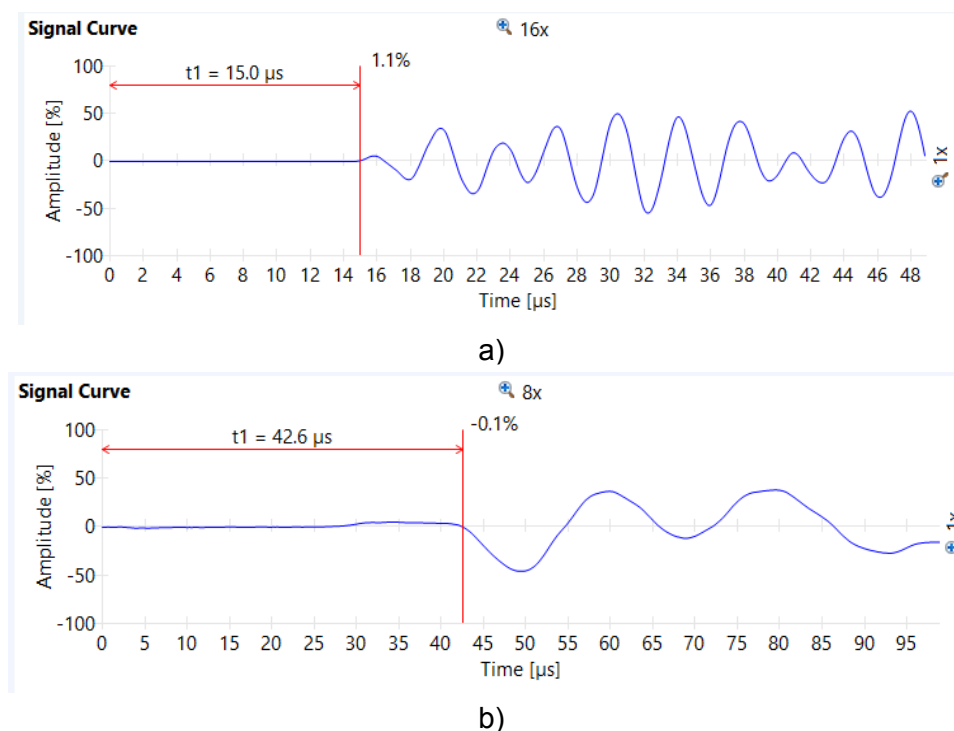


Figura 3. Curvas de sinais. a) Ondas P; b) Ondas S

3. RESULTADOS

No Quadro 1 estão apresentados os resultados obtidos nos ensaios de parâmetros físicos.

Quadro 1. Índices físicos dos litotipos investigados.

Parâmetro	Calcário	Calcarenito	Filito	Sienogranito
ρ_d (g/cm ³)	2,77	2,70	2,17	2,64
η (%)	0,15	0,54	21,55	1,05

Onde: ρ_d - massa específica aparente seca; η - porosidade.

Na Figura 4 está retratado o gráfico comparativo entre V_p e V_s com as amostras secas e saturadas, em cada litotipo. Na interpretação do referido gráfico vê-se que os resultados médios obtidos do calcário, calcarenito e sienogranito se enquadraram dentro dos valores esperados de acordo com a literatura, expostos no Quadro 2.

Quadro 2. Comparação da variação de V_p e V_s em diferentes litotipos na condição seca

Litotipo	V_p (m/s) - Bibliografia	V_s (m/s) - Bibliografia	V_p (m/s) - Presente estudo	V_s (m/s) - Presente estudo
Rochas carbonáticas	4,89 – 6,37*	2,54 – 3,70*	Calcário: 3,45 – 5,54	2,65 – 3,64
			Calcarenito: 3,29 – 5,10	2,48 – 3,11
Filitos	3,8 – 4,01**	-	2,48 – 3,54	1,90 – 2,48
Granitos	4,18 – 5,85*	2,61 – 3,30*	3,45 – 5,17	2,70 – 3,48

Onde: *Schön apud Lima (2014); **Carvalho *et al.* (2020).

Conforme Schön (1998) apud Lima (2014), em rochas carbonáticas, a velocidade das ondas V_p variam no intervalo de 4,89 km/s a 6,37 km/s e 2,54 km/s a 3,7 km/s para as ondas S. Já para

o granito, o autor definiu que os valores de V_p se encontram entre 4,18 km/s a 5,85 km/s, enquanto V_s em 2,61 km/s a 3,30 km/s. Por outro lado, os valores de velocidades de propagação de ondas elásticas no filito encontrados na literatura são superiores aos obtidos neste estudo. Carvalho et al. (2020), por exemplo, reportaram valores de V_p entre 3,8 km/s a 4,01 km/s em amostras de mesma procedência que as utilizadas nesta pesquisa. Após uma extensa pesquisa bibliográfica, não foram encontrados dados sobre a velocidade de propagação de ondas cisalhantes no filito, sugerindo que essa área de estudo ainda se encontra em estágio inicial.

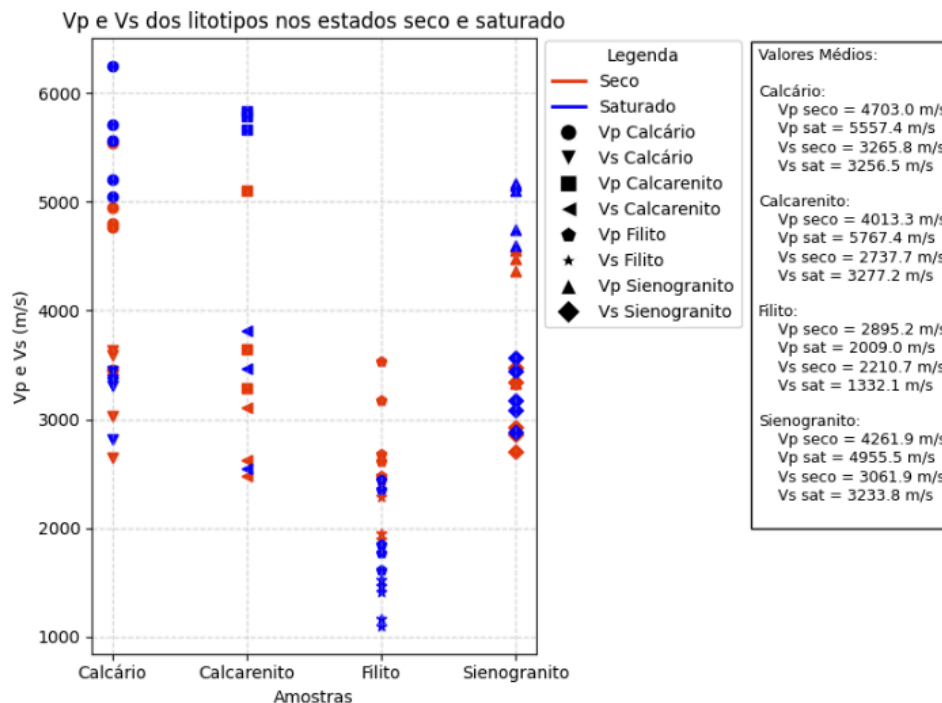


Figura 4. Gráfico de velocidades de propagação de ondas em cada litotipo, nas condições seca e saturada.

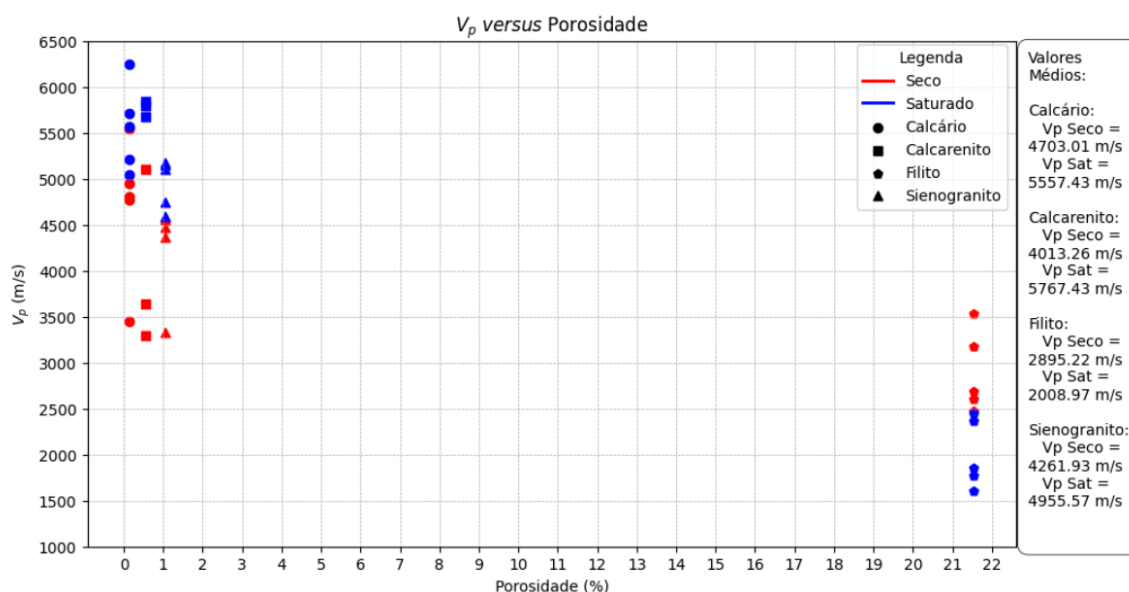
Com exceção do filito, os resultados demonstraram que o valor da velocidade da onda P (V_p) foi maior quando as amostras estavam saturadas, evidenciando a influência dos fluidos na propagação das ondas elásticas compressivas. No calcário, a média da V_p foi cerca de 20% superior em condição saturada quando comparada à seca, já no sienogranito essa alteração foi de 16%. A maior alteração registrada ocorreu no calcarenito que apresentou a significativa diferença de 44%. Esse comportamento de maiores valores de V_p quando a amostra é saturada também foi identificado por Kirsch (2006), Abdi, Khanlari e Jamshidi (2018), Brantut e David (2018), Uyanik et al. (2019), Vukadin, Orešković e Kutasi (2021) e Yuan, Zhang e Han (2025), relacionado, principalmente, ao módulo de compressibilidade e à porosidade da rocha. Ao saturar a rocha, a compressibilidade dos poros é reduzida e o módulo de compressibilidade da rocha aumenta. Esse efeito confere maior rigidez ao material, resultando no aumento da velocidade de propagação da onda P, a qual se propaga no meio líquido (Baechle, 2009; Yuan, Zhang e Han, 2025).

No entanto, a presença de fissuras dificulta a propagação das ondas elásticas, resultando em uma menor velocidade de propagação (Horikawa et al., 2021; Yuan, Zhang e Han, 2025). Essa tendência justificou a redução de 33% na V_p do filito quando saturado. Na Figura 5a, observa-se que o filito apresenta foliação, o que aumenta a quantidade de vazios presentes na amostra quando comparado aos demais litotipos. Durante a saturação, houve a abertura de alguns planos de foliação, ilustrado na Figura 5b, alterando intrinsecamente e visualmente, o volume de vazios. Como a rocha foi submetida ao processo de saturação seguido de secagem, entende-se que o aumento dos vazios na rocha foi um dos fatores, senão o único fator, condicionante da redução da V_p e V_s do filito em comparação aos valores reportados na literatura.



Figura 5. Amostra de filito. a) Planos de foliações; b) Amostra desintegrada após saturação

No que se refere à correlação entre os parâmetros físicos e a velocidade de propagação das ondas, o maior valor de V_p do calcário no estado seco pôde ser associado a sua menor porosidade, como ilustrado no gráfico comparativo da Figura 6a. Quanto menor a porosidade de uma rocha, maior é sua resistência, e maior tende a ser sua velocidade de propagação de ondas P (Do Nascimento, 2015; Watanabe, 1993 apud Brantut e David, 2019; Vukadin, Orešković e Kutasi (2021). Por outro lado, no que diz respeito à massa específica, essa possui uma relação proporcional com um maior valor de V_p , o que também foi observado pela maior V_p do calcário no estado seco, conforme a Figura 06b (Anselmetti e Eberli, 1993; Uyanik et al., 2019). As relações supracitadas com os índices físicos também foram evidentes no filito, o qual apresentou a menor velocidade dentre os litotipos em ambas as condições de saturação, associado à sua menor massa específica e maior porosidade, além das fissuras presentes.



a)

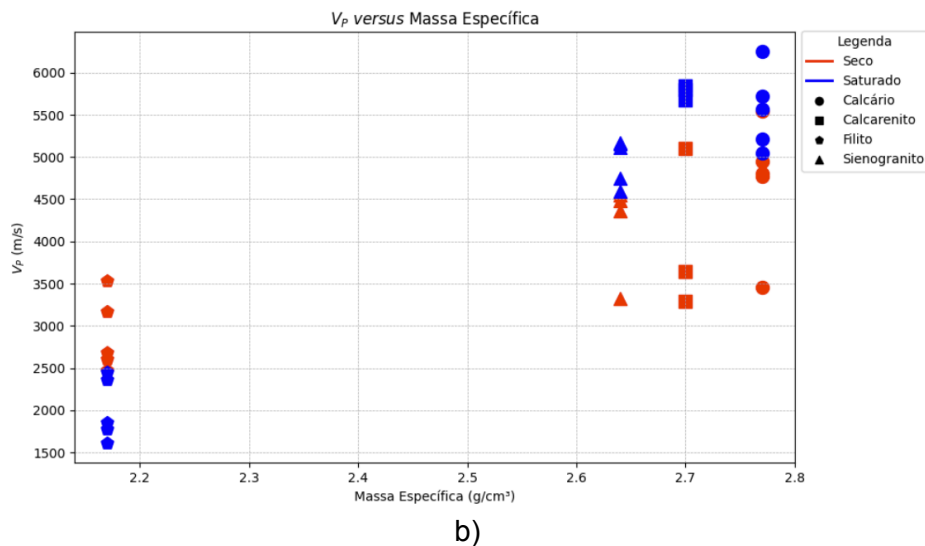
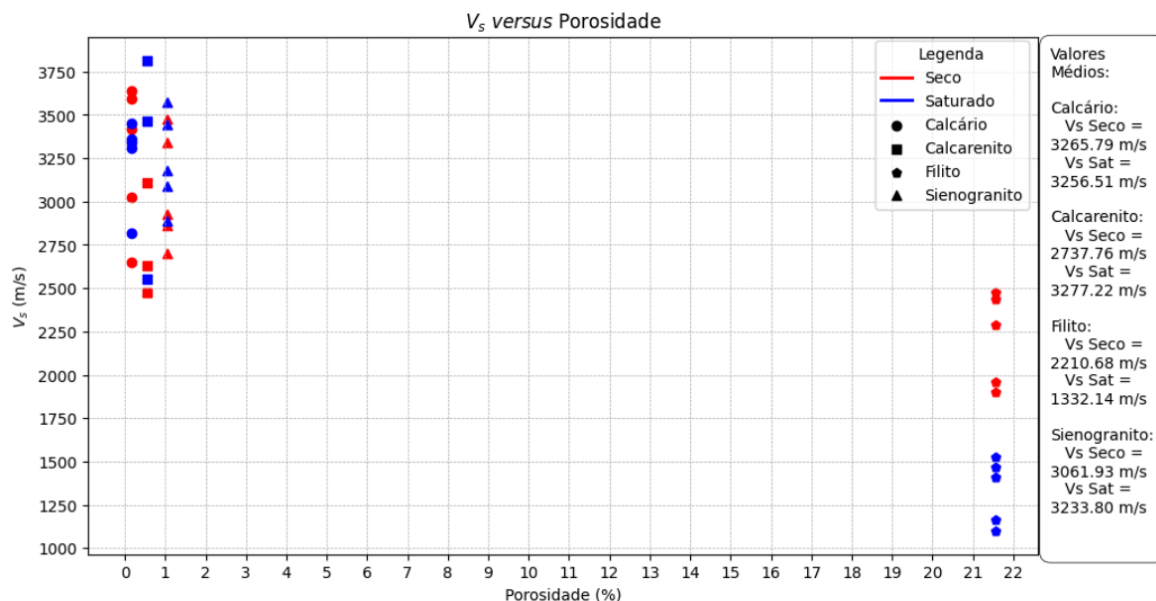


Figura 6. Gráfico relacionando V_p e índices físicos. a) V_p versus porosidade; b) V_p versus massa específica.

Os resultados obtidos para o litotipo calcarenito apresentaram um comportamento distinto em relação aos demais analisados. Apesar de não possuir a maior massa específica e a menor porosidade, é o litotipo que apresenta a maior velocidade das ondas P (V_p) quando saturado e a terceira menor quando seco. Possíveis inconsistências na execução dos ensaios de caracterização e no ensaio de ondas elásticas, associadas ao tamanho amostral reduzido em relação aos outros litotipos, podem ter contribuído para esse desvio, o que compromete a representatividade dos resultados do calcarenito. Além disso, a redução acentuada na velocidade da onda P ao passar do estado saturado para o seco pode estar vinculada às variações nas estruturas dos poros, uma vez que a conectividade entre os vazios exerce influência na velocidade de propagação das ondas elásticas (Yuan, Zhang e Han, 2025; Karakul e Ulusay, 2013). A heterogeneidade do calcarenito, variações na distribuição dos poros e a sensibilidade do material às condições experimentais também podem ter afetado os resultados.

Relacionando-se os índices físicos com as velocidades de ondas cisalhantes, a Figura 7 demonstra que, no estado saturado, a relação direta de V_s com a massa específica (Figura 7a) e a relação inversa com a porosidade (Figura 7b), são confirmadas, com o calcário apresentando a maior V_s e o filito, a menor. No entanto, no estado seco, o calcarenito exibiu um comportamento distinto dos demais litotipos, assim como na V_p seca, apresentando uma menor velocidade que o sienogranito, embora este possua uma menor ρ_d e maior η que o calcarenito.



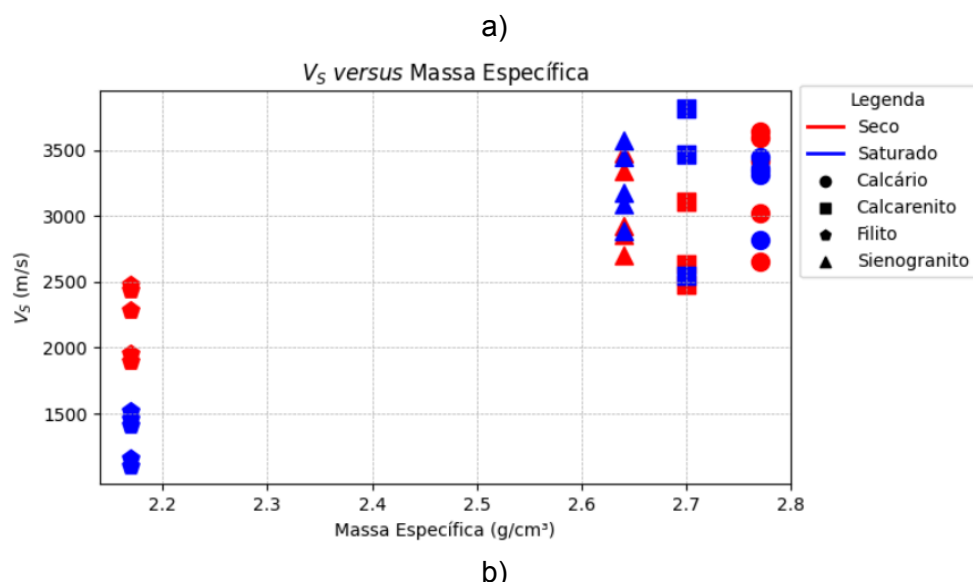


Figura 7. Gráfico relacionando V_s e índices físicos. a) V_s versus porosidade; b) V_s versus massa específica.

Em relação às ondas cisalhantes, exceto no filito, os resultados indicaram maiores valores de velocidade com a saturação, embora essa variação tenha sido significativamente menor em comparação ao aumento observado nas ondas P, com aumento máximo de 20% no calcarenito. Devido à propagação das ondas S somente no meio sólido, é esperado que a V_s não sofra grandes alterações com a mudança do fluido dos poros das rochas para a água, visto que a água não tem resistência ao cisalhamento (Kirsh, 2006; Uyanik et al., 2019; Yuan, Zhang e Han, 2025). Conforme a literatura, as variações nos valores de V_s podem ocorrer devido à mudança da densidade do meio à medida que há a inserção de água em substituição ao ar nos poros (Vukadin, Orešković e Kutasi, 2021).

Quando essa variação de V_s é negativa, ocorre a redução nos valores de velocidade. A presença de fluido nos poros da rocha durante a saturação pode aumentar a densidade do meio, uma vez que a água substitui o ar, que é menos denso. Como a velocidade das ondas S (V_s) está relacionada à rigidez e à densidade do material, esse aumento na densidade pode resultar na diminuição de V_s (Kirsh, 2006; Vukadin, Orešković e Kutasi, 2021). Essa justificativa pode ser aplicada ao comportamento do filito que apresentou uma redução na V_s ao comparar os estados seco e saturado, influenciado não apenas pelo aumento da densidade, mas também pela presença de fissuras em sua estrutura.

O aumento de V_s quando a amostra é saturada é complexo e menos presente na literatura. Uma pesquisa de Baechle et al. (2009) registrou um aumento inesperado de até 10% na V_s de algumas amostras de calcário quando saturadas e atribuíram esse comportamento ao tipo e estrutura dos poros existentes nas rochas. Embora esse fator ainda seja incompreendido devido a sua complexidade, a variabilidade dos tipos de poros presentes em rochas carbonáticas pode influenciar a velocidade de ondas elásticas, tanto enfraquecendo quanto fortalecendo a resistência ao cisalhamento na presença de saturação. No estudo de Baechle et al. (2009), amostras que apresentaram um aumento de V_s quando saturadas continham porosidade interparticular, enquanto aquelas que reduziram os valores de V_s exibiam porosidade intercrystalina e moldiforme. Yan e Han (2016) afirmam que os poros das rochas possuem formas e tamanhos distintos, o que faz com que respondam a diferentes formas quando são preenchidos por fluidos.

Considerando que a morfologia dos poros não foi uma variável analisada neste estudo, os resultados expostos apenas demonstram o aumento de V_s nos três litotipos investigados, sem associar esse efeito a essa característica específica. Além desse parâmetro, a propagação de ondas elásticas nas rochas depende das características físicas do meio, porosidade, densidade, heterogeneidade, temperatura e presença de microfaturas. Portanto, não é possível atrelar o comportamento de um litotipo a uma característica sem considerar um conjunto mais amplo de informações (Dobrin e Savit, 1976; Thomas, 2000).

4. CONCLUSÕES

O estudo das velocidades de propagação de ondas elásticas (P e S) nos litotipos calcário, calcarenito, filito e sienogranito revelou comportamentos distintos das rochas em relação aos estados seco e saturado. Os resultados indicaram que a V_p tende a aumentar na condição saturada, associada especialmente pelo aumento da rigidez da rocha e redução da compressibilidade dos poros. Já a V_s , embora fosse teoricamente pouco afetada, apresentou incremento na maioria das amostras. Esse comportamento, apesar de ainda ser complexo, é atribuído por autores à variabilidade morfológica dos poros, os quais podem ocasionar diferentes efeitos quando preenchidos com fluidos. Em contraste com as demais litologias, o filito reduziu significativamente a velocidade das ondas elásticas em ambos estados de saturação, efeito associado à presença de fissuras no filito originadas pelos diversos planos de foliações.

No que diz respeito à relação com os índices físicos, as velocidades das ondas P e S foram inversamente proporcionais à porosidade e diretamente proporcionais à massa específica, observados no calcário no estado seco (maior ρ_d e menor η) e no filito (menor ρ_d e maior η). O comportamento do calcarenito se destacou por apresentar a maior velocidade das ondas P no estado saturado e uma das menores quando seco, divergindo dos padrões esperados. Esse resultado pode estar relacionado à estrutura e conectividade dos poros, além da heterogeneidade da rocha, sugerindo a necessidade de uma investigação mais detalhada na caracterização do material para verificar a influência desses aspectos nos dados obtidos.

Diante do exposto, este estudo contribui para uma maior compreensão da resposta das ondas elásticas compressivas e cisalhantes em diferentes condições de saturação dos quatro litotipos analisados. Entender o comportamento de V_p e V_s contribui para uma melhor caracterização dos materiais, o que auxilia na elaboração e execução de projetos geológico-geotécnicos. Dessa forma, futuras investigações podem explorar a influência de variáveis como mineralogia, formato e dimensão dos poros, bem como a heterogeneidade das rochas, contribuindo para uma análise mais detalhada acerca da propagação de ondas elásticas em corpos rochosos.

AGRADECIMENTOS

Os autores expressam agradecimentos ao Laboratório de Geofísica Aplicada (LGA) da UFV pelo suporte à Vale S.A pelo financiamento da pesquisa, assim como a todos os colaboradores que ajudaram na obtenção e análise de dados.

REFERÊNCIAS

- ABDI, Y; KHANLARI, G; JAMSHIDI, A. (2018) *“Correlation between mechanical properties of sandstones and P-wave velocity in different degrees of saturation.”* in Geotechnical and Geological Engineering, p. 1-10.
- ANSELMETTI, F. S.; EBERLI, G. P. (1993) *“Controls on sonic velocity in carbonates.”* in Pure and Applied Geophysics, v. 141, p. 287-323.
- BAECHLE, G. T. et al. (2009) *“Changes in dynamic shear moduli of carbonate rocks with fluid substitution.”* in Geophysics, v. 74, n. 3, p. E135-E147.
- BRANTUT, N.; DAVID, E. C. (2019) *“Influence of fluids on VP/VS ratio: increase or decrease?”* in Geophysical Journal International, v. 216, n. 3, p. 2037-2043.

CARVALHO, T. R. R. de et al. (2020) "Influence of weathering and correlations between wave propagation velocity and durability with physical and mechanical parameters in phyllites." in *Soils and Rocks*, v. 43, n. 2, p. 297-230.

DO NASCIMENTO, J. B. S. et al. (2015) "Petrofísica Computacional aplicada à caracterização dos tipos de porosidade em rochas carbonáticas." in *14th International Congress of the Brazilian Geophysical Society & EXPOGEF*, Brazilian Geophysical Society, p. 656-659, Rio de Janeiro, Brazil.

DOBRIN, M. B.; SAVIT, C. H. (1976) *Introduction to Geophysical Prospecting*. 3 ed. USA: McGraw-Hill, 630 p.

HORIKAWA, T. et al. (2021) "Effects of pore water distributions on P-wave velocity–water saturation relations in partially saturated sandstones." in *Geophysical Journal International*, v. 226, n. 3, p. 1558-1573.

ISRM - INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS. (2007) *The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 1974-2006*. 644 p.

ISRM - INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS. *The ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 2007 - 2014*. 293 p.

KARAKUL, H.; ULUSAY, R. (2013) "Empirical Correlations for Predicting Strength Properties of Rocks from P-Wave Velocity Under Different Degrees of Saturation." in *Rock Mechanics and Rock Engineering*, v. 46, n. 5, p. 986.

KEAREY, P.; BROOKS, M.; HILL, I. (2009). *Geofísica de exploração. Oficina de Textos*, ISBN: 978-85-8623-891-8, São Paulo, 483 p.

LIMA, O. A. L. de. (2014) *Propriedades Físicas das Rochas: bases da geofísica aplicada*. Sociedade Brasileira de Geofísica, ISBN: 978-85-88690-21-9, Rio de Janeiro, 342 p.

LE MOS, C. C. S. (2024) "Influência do intemperismo nos parâmetros de Hoek-Brown e nas propriedades geomecânicas de um sienogranito." Dissertação de Mestrado, Programa de Pós Graduação em Geotecnia, Universidade Federal de Viçosa, 152 f.

THOMAS, J. E. (2000) "Velocidades Sísmicas". Universidade Petrobras, Rio de Janeiro, 132 p.

UYANIK, O. et al. (2019) "Prediction of mechanical and physical properties of some sedimentary rocks from ultrasonic velocities." in *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, v. 78, p. 6003-6016.

VUKADIN, D.; OREŠKOVIĆ, J.; KUTASI, C. (2021) "Elastic Properties of Pannonian Basin Limestone under Different Saturation Conditions." in *Energies*, v. 14, n. 21, p. 7291.

VIANA, J. B. A.; SIMAS, J. L. (2024) "Estudo e análise de física das rochas para identificação de propriedades elásticas." in *Geologia de engenharia e ambiental: análises, métodos e técnicas em pesquisa*. Editora Científica Digital, p. 46-56.

YAN, F.; HAN, D. (2016) "Effect of pore geometry on Gassmann fluid substitution." in *Geophysical Prospecting*, v. 64, n. 6, p. 1575–1587.

YUAN, H.; ZHANG, X.; HAN, D. (2025) "Fluid effect on elastic properties of carbonate and implication for CO₂ geologic sequestration monitoring." in *Geophysics*, v. 90, n. 1, p. MR25-MR38.