

Relação Empírica entre Velocidades de Propagação de Ondas Cislhantes e Compressivas de um Sienogranito

Carolina Crissafe dos Santos Lemos

Estudante de doutorado, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Brasil, carolina.crissafe@ufv.br

Eduardo Antonio Gomes Marques

Professor titular, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Brasil, emarques@ufv.br

Cibele Cláuver de Aguiar

Professora adjunta, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Brasil, cibeles.clauver@ufv.br

Flávio Antônio Ferreira

Professor adjunto, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Brasil, flavioferreira@ufv.br

Ana Carolina Dias Baêso

Estudante de doutorado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, anacarolinabaesso@gmail.com

RESUMO: O presente trabalho teve como objetivo determinar as velocidades de propagação de ondas compressivas e cislhantes, bem como a relação V_s/V_p , para um sienogranito da região sudeste do Brasil, envolvendo amostras desde rocha sã até medianamente alterada. Foram ensaiados 46 corpos de prova pelo método do pulso ultrassônico, com transdutores de 250 kHz para a medição das velocidades de ondas compressivas e de 40 kHz para as ondas cislhantes. Adicionalmente, foram determinados os índices físicos de massa específica aparente seca, massa específica aparente natural e porosidade aparente, a fim de auxiliar a identificação dos graus de alteração das amostras. Os resultados obtidos forneceram uma razão média de V_s/V_p igual a 0,47, com um desvio padrão de 0,04 e coeficiente de variação igual a 7,53%. Além disso, observou-se que a razão V_s/V_p manteve-se consistente, sem variações drásticas entre os diferentes graus de alteração da rocha, mostrando-se semelhante a estudos anteriores disponíveis na literatura. Esses resultados possuem implicações práticas relevantes na engenharia geotécnica, uma vez que a partir da relação entre V_s e V_p é possível estimar propriedades importantes, como o módulo de elasticidade dinâmico e o coeficiente de Poisson, que são muito utilizadas em projetos geotécnicos.

PALAVRAS-CHAVE: Sienogranito, Velocidade de Propagação de Ondas, Propriedades-Índice, Caracterização Física, Relação Empírica.

ABSTRACT: This study aimed to determine the compressional and shear wave propagation velocities, as well as the V_s/V_p ratio, for a syenogranite from the southeastern region of Brazil, covering samples ranging from intact to moderately altered rock. A total of 46 specimens were tested using the ultrasonic pulse method, with 250 kHz transducers for measuring compressional wave velocities and 40 kHz for shear wave velocities. Additionally, physical indices of apparent dry bulk density, apparent natural density and apparent porosity were determined to assist in identifying the degrees of weathering of the samples. The results provided an average V_s/V_p ratio of 0.47, with a standard deviation of 0.04 and a coefficient of variation of 7.53%. Furthermore, it was observed that the V_s/V_p ratio remained consistent across different degrees of rock weathering, similar to previous studies available in the literature. These results have relevant practical implications in geotechnical engineering, as the relationship between V_s and V_p allows for the estimation of important properties such as dynamic modulus of elasticity and Poisson's ratio, which are widely used in geotechnical projects.

KEYWORDS: Syenogranite, Wave Propagation Velocity, Index Properties, Physical Characterization, Empirical Relationship.

1 INTRODUÇÃO

Os projetos de engenharia no âmbito da Mecânica das Rochas estão em constante evolução, assumindo dimensões cada vez maiores e mostrando-se notavelmente mais complexos. Esse avanço, conforme destacado por Lamas e Lemos (2021), é uma resposta à crescente ocupação do terreno, tanto em superfície quanto em subsuperfície, o que tem levado à necessidade de construir em maciços rochosos mais desafiadores.

Nesse contexto, a determinação das propriedades-índice das rochas é fundamental para prever o seu comportamento em projetos geotécnicos. Dentre essas propriedades, destacam-se as velocidades de propagação de ondas compressivas (V_p) e cisalhantes (V_s), que estão intimamente relacionadas com as características físicas, mecânicas e microestruturais da rocha intacta. A partir da obtenção dessas velocidades, é possível determinar as constantes elásticas dinâmicas de coeficiente de Poisson (ν_d) e módulo de elasticidade (E_d), possibilitando a compreensão do comportamento geomecânico de diversas estruturas geotécnicas, incluindo projetos de túneis, estabilidade de taludes, escavações subterrâneas e a céu aberto, perfurações e detonações (SARKAR; VISHAL; SINGH, 2012).

Além disso, Marques e Vargas Jr. (2022) destacam que, na prática da engenharia, observa-se que o grau de fissuração e o grau de alteração intempérica interferem na medida da velocidade de propagação das ondas, de forma que, quanto maior for o peso específico e menor for a porosidade, maior será o valor registrado para a velocidade. Desta forma, a velocidade de propagação de ondas pode ser utilizada como um índice para avaliar a integridade da rocha, quanto aos graus de fissuração e alteração intempérica.

Diante desse cenário, devido à importância da obtenção das velocidades ultrassônicas e ao efeito do intemperismo nas propriedades geomecânicas das rochas, o presente estudo teve como objetivo determinar os valores de V_p e V_s , bem como a razão V_s/V_p , para amostras de um sienogranito da região sudeste do Brasil, incluindo desde a condição de rocha sã até moderadamente intemperizada. Assim, foi possível observar se essa razão se altera com a influência do intemperismo, além de comparar os resultados com demais estudos apresentados na literatura técnica. Adicionalmente, foram determinados os índices físicos de massa específica aparente seca e porosidade aparente, a fim de auxiliar na identificação dos graus de alteração das amostras e complementar a caracterização do material em questão.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Sienogranito

Para a realização deste estudo, foram utilizados cinco blocos de rocha intacta de um sienogranito. Dentre esses blocos, um deles foi classificado como rocha sã (W1), dois como levemente intemperizados (W2) e os dois restantes foram considerados como moderadamente intemperizados (W3), de acordo com a classificação da *International Society for Rock Mechanics* – ISRM (1981). Esses blocos foram coletados em uma pedreira de extração de rochas ornamentais, localizada no município de Cachoeiro de Itapemirim, no sul do estado do Espírito Santo. Segundo dados do Centro Brasileiro Exportador de Rochas Ornamentais – CENTROROCHAS (2023), o Espírito Santo foi responsável por 82,2% da receita de exportação de rochas ornamentais do Brasil em 2023, evidenciando a importância econômica e geológica desta região.

2.2 Métodos

2.2.1 Preparação das amostras

Inicialmente, os testemunhos foram extraídos dos blocos de rocha por meio de uma máquina perfuratriz, composta por um cálice cilíndrico com duas coroas diamantadas, sendo a primeira delas com diâmetro interno de 67,5 mm e outra com diâmetro interno de 54 mm. Posteriormente, os corpos de prova foram serrados e retificados, a fim de atenderem às dimensões necessárias para a realização dos ensaios, além de garantir que as suas extremidades estivessem lisas e paralelas.

No total, foram preparadas 32 amostras cilíndricas com diâmetro de 54 mm e relação altura/diâmetro (H/D) entre 2,0 e 2,5, sendo 14 na condição W1, 6 de W2 e 12 de W3. Adicionalmente, foram preparadas 14

amostras com diâmetro de 67,5 mm e altura mínima de 160 mm, sendo 3 de W1, 7 de W2 e 4 de W3. Na Figura 1 são exemplificadas amostras referentes aos três graus de alteração intempérica.

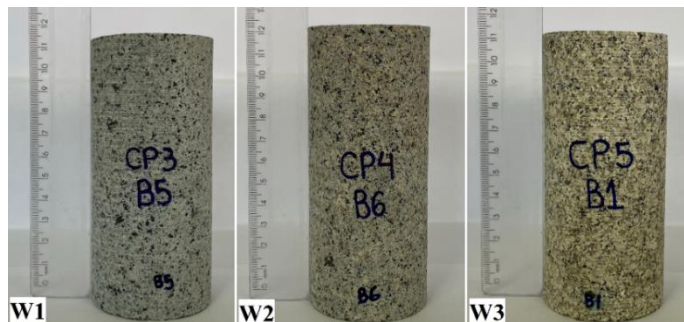


Figura 1. Exemplos de amostras preparadas das classes W1, W2 e W3.

2.2.2 Velocidade de propagação do pulso ultrassônico

Para a realização desse ensaio, utilizou-se o equipamento “Pundit PL-200”, da fabricante Proceq, apresentado na Figura 2 (a). A determinação da velocidade de propagação de ondas compressivas, também conhecidas como ondas P, foi efetuada através de um par de transdutores de 250 kHz, apresentados na Figura 2 (b). Com o intuito de garantir uma boa aderência entre a amostra e esses transdutores, além de otimizar a qualidade do sinal registrado, utilizou-se um gel à base de água para a leitura dessas ondas, conforme indicado na Figura 2 (c). Em relação à determinação da velocidade de propagação das ondas cisalhantes, também denominadas ondas S, foi empregado um par de transdutores DPC (*Dry Point Shear Wave Transducers*) de 40 kHz, como mostrado na Figura 2 (d). Esse modelo de transdutor dispensa a necessidade de gel de acoplamento, uma vez que a transmissão e recepção do sinal são realizadas diretamente pelas pontes do transdutor.

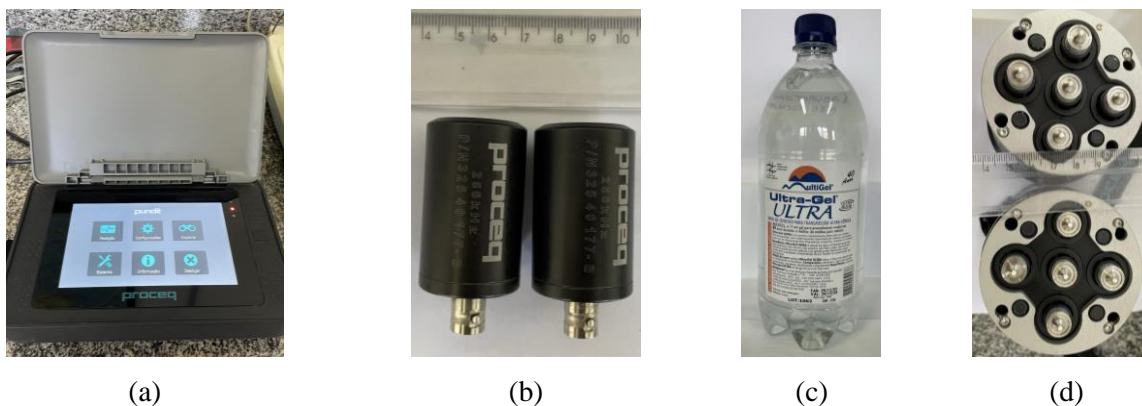


Figura 2. Equipamentos utilizados no ensaio de velocidade do pulso ultrassônico: (a) Pundit PL-200, (b) transdutores de onda P, (c) gel de acoplamento e (d) transdutores DPC de onda S.

O ensaio foi realizado seguindo as recomendações da *ASTM International* (ASTM, 2000). O instante de chegada da onda P foi definido como o último ponto de amplitude 0,0% antes do início do primeiro sinal registrado. Em relação à onda S, o seu tempo de chegada foi determinado como o ponto de amplitude 0,0% anterior ao primeiro pico negativo significativo da curva, conforme indicado pelo “Manual de referência rápida dos transdutores DPC de onda de cisalhamento” da Proceq (2023). Além disso, ressalta-se que essa metodologia foi previamente empregada nos estudos conduzidos por Rios *et al.* (2017), Candelaria *et al.* (2020) e Ferreira *et al.* (2021). A determinação dos tempos de chegada das ondas P e S foi realizada com o auxílio do software *PL-Link*, da fabricante Proceq.

2.2.3 Índices físicos

Neste ensaio, foram determinados os índices físicos de massa específica aparente seca (ρ_d) e porosidade aparente (η), pela técnica de flutuação, conforme o procedimento sugerido pela ISRM (2007). Além disso, foi

determinada a massa específica aparente natural (ρ) das amostras, através da medição direta das dimensões de diâmetro e altura, bem como da massa de cada corpo de prova.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Índices físicos

Os resultados do ensaio de índices físicos estão apresentados na Tabela 1. Desta forma, constatou-se uma relação inversamente proporcional entre o grau de alteração intemperica e os valores de ρ_d e ρ das amostras, enquanto o valor de η demonstrou uma relação diretamente proporcional com a alteração intemperica. Além disso, foi possível observar uma mudança sutil nas propriedades-índice do sienogranito entre as classes de W1 e W2, enquanto uma modificação mais acentuada foi registrada entre as classes W2 e W3. A determinação dessas propriedades possibilitou a quantificação do efeito do intemperismo sobre a rocha, auxiliando a distinção dos graus de alteração intemperica.

Tabela 1. Resultados dos índices físicos

Propriedade	W1	W2	W3
Massa específica aparente seca - ρ_d (g/cm ³)	2,67	2,66	2,47
Massa específica aparente natural - ρ (g/cm ³)	2,64	2,63	2,43
Porosidade aparente - η (%)	1,00	1,74	7,55

3.2 Velocidade de propagação do pulso ultrassônico

Os resultados do ensaio de velocidade de propagação das ondas compressivas (V_p) e cisalhantes (V_s) estão apresentados na Tabela 2. Nota-se que tanto para V_p quanto para V_s foi registrado um aumento nos valores obtidos para as amostras levemente alteradas (W2) em relação às amostras de rocha sã (W1), sendo contrário ao comportamento esperado. Esse resultado pode ser atribuído a possíveis diferenças mineralógicas, texturais, microfissuras, ou outros fatores que podem ter exercido maior influência sobre essa propriedade do que o intemperismo, uma vez que de W1 para W2 a degradação das propriedades físicas da rocha foi pouco notória, conforme evidenciado pelos índices físicos. Contudo, em W3 foi observada uma diminuição nos valores de V_p e V_s em relação à rocha sã, indicando que a influência do intemperismo foi mais expressiva nessa classe. Adicionalmente, em todas as classes o desvio padrão obtido foi baixo, o que demonstra a homogeneidade dos grupos de amostras e indica que a diferença no tamanho dos corpos de prova ensaiados não influenciou essas medições.

Tabela 2. Resultados das velocidades de propagação das ondas P e S

Estatística	V_p (m/s)			V_s (m/s)		
	W1	W2	W3	W1	W2	W3
Valor médio (m/s)	4859,4	5443,2	3277,2	2256,0	2384,2	1665,1
Desvio padrão (m/s)	200,99	237,42	140,14	37,28	44,50	113,37
Coefficiente de variação (%)	4,10%	4,40%	4,30%	1,70%	1,90%	6,80%
Número de amostras	17	13	16	17	13	16

A Tabela 3 apresenta a razão V_s/V_p para as amostras ensaiadas.

Tabela 3. Valores da razão V_s/V_p .

Estatística	Razão V_s/V_p			
	W1	W2	W3	Total
Valor médio	0,46	0,44	0,51	0,47
Desvio padrão	0,02	0,02	0,03	0,04
Coefficiente de variação (%)	3,33%	4,07%	5,79%	7,53%
Número de amostras	17	13	16	46

Desta forma, nota-se que a razão V_s/V_p variou de 0,44 a 0,51 entre as classes de alteração intempélica estudadas, resultando em uma média geral de 0,47 ao considerar todas as amostras em conjunto. Esses resultados indicam que não há uma variação tão discrepante dessa razão entre os diferentes graus de alteração intempélica estudados. A Tabela 4 apresenta os resultados encontrados por demais autores na literatura técnica para rochas graníticas, para fins de comparação. Nesse contexto, evidencia-se que os valores obtidos no presente estudo se aproximam dos que foram determinados por outros autores, mostrando-se consistentes.

Tabela 4. Comparação dos valores de V_s/V_p obtidos por demais autores

Autores	Litotipo	Localização	V_s/V_p
Presente estudo (2024)	Sienogranito	Brasil	0,40 - 0,56
Lamas (2023)	Granito	Portugal	0,57 - 0,59
Ajalloeian, Jamshidi e Khorasani (2020)	Sienogranito	Irã	0,56 - 0,60
	Granito	Irã	0,60 - 0,61
	Monzogranito	Irã	0,55 - 0,56
Antão e Quinta-Ferreira (2015)	Granodiorito	Irã	0,56 - 0,58
	Granito	Portugal	0,34 - 0,83
Sen <i>et al.</i> (2010)	Granito	Índia	0,41 - 0,58

Nesse sentido, a razão média de V_s/V_p determinada neste estudo pode ser utilizada para estimar as propriedades elásticas dinâmicas de rochas graníticas, como o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson, especialmente diante da impossibilidade de se realizar ensaios que as determinem diretamente, uma vez que são extremamente úteis em projetos geotécnicos.

4 CONCLUSÕES

Diante dos resultados apresentados, constatou-se que as propriedades-índice de massa específica aparente natural, massa específica aparente seca e porosidade aparente do sienogranito em estudo possibilitaram a quantificação do efeito do intemperismo sobre a rocha, observando-se uma modificação sutil entre as classes W1 e W2, que se tornou mais acentuada de W2 para W3. Além disso, os resultados do ensaio de velocidade de propagação de ondas demonstraram que nos estágios iniciais de intemperização da rocha, entre as classes W1 e W2, fatores microestruturais como diferenças mineralógicas, texturais ou microfissuras podem ter exercido uma influência mais notória nos valores de V_p e V_s do que o intemperismo. Contudo, a partir da classe W3 a modificação dessas propriedades devido à alteração intempélica tornou-se mais expressiva.

Adicionalmente, verificou-se que a razão V_s/V_p apresentou uma pequena variação entre as amostras de sienogranito entre as classes W1, W2 e W3, mostrando-se semelhante aos valores obtidos em estudos anteriores disponíveis na literatura. Desta forma, conclui-se que os resultados deste estudo possuem implicações práticas relevantes na engenharia geotécnica, uma vez que permitem estimar propriedades importantes, como o módulo de elasticidade dinâmico e o coeficiente de Poisson, com base na relação entre V_p e V_s . Ademais, sugere-se que essa relação continue sendo investigada em futuras pesquisas, abrangendo diferentes litologias, e contribuindo para o aprimoramento das avaliações geotécnicas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudos que viabilizou o desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ajalloeian, R., Jamshidi, A., Khorasani, R. (2020) Assessments of ultrasonic pulse velocity and dynamic elastic constants of granitic rocks using petrographic characteristics. *Geotechnical and Geological Engineering*, 38, p. 2835-2844.

- Antão, A., Quinta-Ferreira, M. (2015) Weathering influence on physical properties of the Guarda granite, Portugal. *15th International SGEM GeoConference on Science and Technologies in Geology, Exploration and Mining*.
- ASTM International (2000). ASTM D2845–00: *Standard Test Method for Laboratory Determination of Pulse Velocities and Ultrasonic Elastic Constants of Rock*.
- Candelaria, M.D.E., Kee, S-H., Yee, J-J., Lee, J-W. (2020) Effects of Saturation Levels on the Ultrasonic Pulse Velocities and Mechanical Properties of Concrete. *Materials*, 14(1), p. 152.
- CENTROROCHAS - Centro Brasileiro dos Exportadores de Rochas Ornamentais (2023). Informativo mensal de exportações de rochas: dezembro de 2023. Disponível em: <<https://www.sindirochas.com/downloads/relatorios/relatorio-de-exportacoes-dezembro-2023-sindirochas.pdf>>. Acesso em: 02 jan. 2024.
- Ferreira, C., Rios, S., Cristelo, N., Fonseca, A. V. (2021) Evolution of the optimum ultrasonic testing frequency of alkali-activated soil–ash. *Geotechnique Letters*, 11(3), p. 158-163.
- ISRM - International Society for Rock Mechanics (1981). Commission on Classification of Rocks and Rock Masses. *Basic geotechnical description of rock masses*.
- ISRM - International Society for Rock Mechanics (2007). *The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 1974-2006*.
- Lamas, L., Lemos, J.V. (2021) O desenvolvimento da mecânica das rochas e perspectivas de evolução da investigação e dos domínios de aplicação. *Geotecnia*, 152, p. 481-508.
- Lamas, R.I.R. (2023) *Estudo da variabilidade geológico-geotécnica dos perfis de alteração do granito do Porto*. Tese de doutorado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 397 p.
- Marques, E.A.G., Vargas Jr., E.A. (2022). *Introdução à Mecânica das Rochas*. 1 ed. Oficina de Textos, São Paulo, 184 p.
- PROCEQ (2023). *DPC Shear Wave Transducers Quick Reference*. Disponível em: <<https://www.screeningeagle.com/pt/products/pundit-200>>. Acesso em 03 abr. 2023.
- Rios, S., Cristelo, N., Fonseca, A.V., Ferreira, C. (2017) Stiffness Behavior of Soil Stabilized with Alkali-Activated Fly Ash from Small to Large Strains. *International Journal of Geomechanics*, 17(3).
- Sarkar, K., Vishal, V., Singh, T. N. (2012) An empirical correlation of index geomechanical parameters with the compressional wave velocity. *Geotechnical and Geological Engineering*, 30, p. 469-479.
- Sen, K., Sharma, R., Arora, B. R., Gupta, V. (2010) Influence of magnetic fabric anisotropy on seismic wave velocity in paramagnetic granites from NW Himalaya: Results from preliminary investigations. *Journal of the Geological Society of India*, 76, p. 322-330.