XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/7

Correlações Entre as Constantes Elásticas Estáticas e Dinâmicas de um Sienogranito Intemperizado

Carolina Crissafe dos Santos Lemos
Estudante de doutorado, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Brasil, carolina.crissafe@ufv.br

Cibele Cláuver
Professora adjunta, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Brasil, cibele.clauver@ufv.br

Eduardo Antonio Gomes Marques
Professor titular, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Brasil, emarques@ufv.br

Matheus Sant'anna Andrade
Estudante de doutorado, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Brasil, matheus.andrade@ufv.br

Diogo Silva de Oliveira
Professor adjunto, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Brasil, diogooliveira@ufv.br

RESUMO: O presente estudo teve como objetivo estabelecer correlações entre as constantes elásticas estáticas e dinâmicas de um sienogranito classificado entre os graus de alteração W1 (rocha sã), W2 (rocha levemente alterada) e W3 (rocha moderadamente alterada), de acordo com a classificação proposta pela Sociedade Internacional de Mecânica das Rochas (ISRM). As constantes dinâmicas - módulo de elasticidade (E_d) e coeficiente de Poisson (υ_d) - foram obtidas por ensaios não destrutivos de velocidade de propagação de ondas compressivas e cisalhantes, realizados segundo recomendações da ISRM, enquanto os valores de módulo de elasticidade (E) e coeficiente de Poisson estáticos (υ) foram determinados por ensaios de compressão uniaxial. Os resultados indicaram que as razões E/E_d e υ/υ_d são diretamente proporcionais à massa específica aparente natural (ρ). Para W1 e W2, as constantes estáticas superaram as dinâmicas, enquanto em W3 observou-se comportamento inverso, evidenciando a influência do intemperismo na resposta elástica do material. As correlações apresentaram comportamento linear com coeficientes de determinação (R^2) superiores a 0,94, demonstrando que as constantes estáticas podem ser estimadas a partir de parâmetros dinâmicos, especialmente na ausência de ensaios laboratoriais de compressão uniaxial.

PALAVRAS-CHAVE: Rocha Ígnea, Módulo de Elasticidade, Coeficiente de Poisson, Velocidade de Propagação de Ondas, Intemperismo.

ABSTRACT: This study aimed to establish correlations between the static and dynamic elastic constants of a syenogranite classified according to the International Society for Rock Mechanics (ISRM) weathering classification system into weathering degrees W1 (sound rock), W2 (slightly altered), and W3 (moderately altered). Dynamic elastic modulus (E_d) and dynamic Poisson's ratio (υ_d) were obtained via non-destructive testing of compressional and shear wave propagation velocities, conducted in accordance with ISRM recommendations. Static elastic modulus (E) and static Poisson's ratio (υ) were determined through uniaxial compression tests. The results showed that the E/E_d and υ/υ_d ratios are directly proportional to the apparent natural density (ρ). For W1 and W2, the static constants were greater than the dynamic constants; however for W3, the opposite behavior was observed, highlighting the influence of weathering on the elastic response of the material. The correlations exhibited linear behavior with coefficients of determination (R^2) greater than 0.94, demonstrating that static constants can be estimated from dynamic parameters, particularly when uniaxial compression laboratory tests are unavailable.

KEYWORDS: Igneous Rock; Elastic Modulus; Poisson's Ratio; Wave Propagation Velocity; Weathering.

1 INTRODUÇÃO

O módulo de elasticidade (E) e o coeficiente de Poisson (υ) são propriedades elásticas diretamente associadas ao comportamento de deformabilidade das rochas. De acordo com Goodman (1989), a deformabilidade refere-se à capacidade de uma rocha se deformar sob condições de carregamento ou descarregamento. Essa propriedade assume grande relevância em projetos geotécnicos, uma vez que, em determinadas situações, os maciços rochosos podem apresentar elevada resistência mecânica e, ainda assim, ter sua estabilidade comprometida em função de altos níveis de deformabilidade.

O comportamento de deformabilidade das rochas pode ser influenciado por fatores internos e externos. Segundo Bell (2005), os fatores externos englobam o estado de tensões atuante, as condições de temperatura e pressão, a presença de água, dentre outros fatores. Por sua vez, os fatores internos estão associados às características intrínsecas da rocha, tais como a composição mineralógica, a textura dos grãos minerais, a presença de fissuras e o grau de alteração intempérica.

Nesse contexto, a determinação das propriedades elásticas das rochas é fundamental para a compreensão adequada de seu comportamento mecânico, especialmente em estudos geotécnicos que envolvem a avaliação de maciços rochosos constituídos por diferentes graus de alteração intempérica.

As propriedades elásticas das rochas podem ser determinadas por métodos estáticos e dinâmicos. A Sociedade Internacional de Mecânica das Rochas (ISRM, 2007) e a ASTM International (ASTM, 2014) recomendam a determinação das constantes elásticas estáticas (E e υ) a partir da realização do ensaio de compressão uniaxial. Por sua vez, as constantes elásticas dinâmicas de módulo de elasticidade (E_d) e o coeficiente de Poisson (υ_d) podem ser determinadas por meio do ensaio de determinação das velocidades de propagação de ondas compressivas (V_p) e cisalhantes (V_s).

Shen, Gao e Gia (2024) destacam que, de modo geral, os parâmetros estáticos refletem, com maior precisão, as propriedades mecânicas da rocha sob o estado de tensões atuante em campo. Entretanto, sua determinação envolve procedimentos mais complexos, onerosos e demorados quando comparados aos métodos dinâmicos. Desta forma, a utilização de correlações entre parâmetros dinâmicos e estáticos mostra-se muito útil, sobretudo em situações nas quais a realização de ensaios laboratoriais destrutivos é limitada por restrições de tempo, custo ou disponibilidade de amostras.

Nesse contexto, o presente estudo teve como objetivo propor correlações entre as constantes elásticas estáticas e dinâmicas de um sienogranito em diferentes graus de intemperização, a fim de viabilizar a estimativa das propriedades elásticas estáticas a partir de parâmetros dinâmicos obtidos por ensaios não destrutivos, considerando a influência da alteração intempérica, representada pela variação da massa específica aparente natural.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

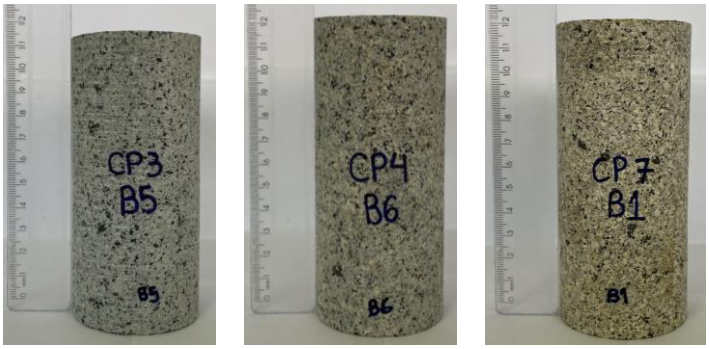
2.1 Amostras de Sienogranito

Para a realização do programa experimental deste estudo, foram utilizadas 51 amostras de um sienogranito, provenientes de uma pedreira de extração de rochas ornamentais, localizada no município de Cachoeiro de Itapemirim, no sul do estado do Espírito Santo. As amostras foram classificadas quanto ao grau de alteração intempérica nas classes W1 (rocha sã), W2 (levemente alterada) e W3 (moderadamente alterada), de acordo com a classificação proposta pela ISRM (1981), as quais estão ilustradas na Figura 1.

Do total de amostras, 37 corpos de prova cilíndricos foram preparados com diâmetro de 54 mm e razão altura/diâmetro (h/d) variando entre 2,0 e 2,5, sendo 16 classificados como W1, 8 como W2 e 13 como W3. Adicionalmente, foram preparados 14 corpos de prova cilíndricos longos, com diâmetro de 67,5 mm e altura aproximada de 160 mm, sendo 3 amostras classificadas como W1, 7 como W2 e 4 como W3, totalizando 51 amostras utilizadas no programa experimental.

Todas as amostras preparadas foram submetidas aos ensaios não destrutivos de velocidade de propagação de ondas e de determinação da massa específica. Entretanto, apenas parte dos corpos de prova foi destinada aos ensaios de compressão uniaxial, em razão da disponibilidade limitada de amostras que

atendessem aos requisitos geométricos e às condições de integridade exigidas pela ASTM, bem como da destinação de parte dos corpos de prova a outros ensaios destrutivos que não integram o escopo deste artigo.



(a) (b) (c)

Figura 1. Amostras cilíndricas: (a) W1, (b) W2 e (c) W3.

2.2 Determinação das Constantes Elásticas Estáticas

As constantes elásticas estáticas de módulo de elasticidade (E) e coeficiente de Poisson (υ) foram determinadas a partir da realização do ensaio de compressão uniaxial, de acordo com o procedimento sugerido pela ASTM (2014). Para a execução desse ensaio, foi utilizada uma prensa servocontrolada MTS, modelo 815, com capacidade de carga compressional de até 4600 kN, além de três extensômetros acoplados aos corpos de prova, referentes aos modelos MTS 632.90F-12 e MTS 632.92H-03, para medir a deformação na direção axial e diametral, respectivamente. O procedimento consistiu em um carregamento inicial até atingir 60% da carga máxima previamente estimada, seguido de descarregamento até 10% da carga máxima e posterior recarregamento contínuo até a ruptura.

Desta forma, o módulo de elasticidade (E) do sienogranito foi obtido pela inclinação do trecho de recarregamento no ensaio de compressão uniaxial, determinado pela Equação 1, em que "Δσ" representa a variação da tensão aplicada e "$\Delta\varepsilon_a$" corresponde à variação da deformação axial no trecho em análise. Por sua vez, o coeficiente de Poisson (υ) foi determinado por meio da Equação 2, a partir da medição das deformações na direção axial (ε_a) e diametral (ε_d) durante a execução do ensaio.

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon_a} \tag{1}$$

$$\upsilon = -\frac{\text{inclinação da curva } (\sigma \text{ x } \varepsilon_a)}{\text{inclinação da curva } (\sigma \text{ x } \varepsilon_d)} \tag{2}$$

Os ensaios de compressão uniaxial foram realizados em 5 corpos de prova cilíndricos, sendo 2 amostras classificadas como W1, 2 como W2 e 1 como W3. O número reduzido de amostras para esse ensaio decorreu da disponibilidade limitada de corpos de prova que atendessem simultaneamente aos requisitos geométricos e às condições de integridade mecânica estabelecidas pela ASTM, uma vez que parte das amostras disponíveis foi destinada à realização de outros ensaios destrutivos que não integram o escopo do presente artigo. Ainda assim, os resultados obtidos mostraram-se suficientes para a identificação de tendências consistentes e para o estabelecimento das correlações propostas entre os parâmetros elásticos.

2.3 Determinação das Constantes Elásticas Dinâmicas

As constantes elásticas dinâmicas de módulo de elasticidade (E_d) e coeficiente de Poisson (υ_d) foram determinadas a partir da realização do ensaio de determinação da velocidade de propagação do pulso ultrassônico, seguindo as recomendações da ASTM (2000).

Para a realização desse ensaio, utilizou-se o equipamento *Pundit PL-200*, da fabricante Proceq, ilustrado na Figura 2 (a). A velocidade de propagação de ondas compressivas (V_p) foi determinada por meio de um par

de transdutores de 250 kHz, apresentado na Figura 2 (b). Com o intuito de garantir uma boa aderência entre as amostras e esses transdutores, além de otimizar a qualidade do sinal registrado, utilizou-se um gel à base de água para a leitura dessas ondas, indicado na Figura 2 (c). Para a determinação da velocidade de propagação das ondas cisalhantes (V_s) foi utilizado um par de transdutores DPC (*Dry Point Shear Wave Transducers*) de 40 kHz, demonstrado na Figura 2 (d), que dispensa a necessidade de gel de acoplamento, uma vez que a transmissão e recepção do sinal são realizadas diretamente pelas ponteiras desse transdutor.



(a) (b) (c) (d)

Figura 2. Equipamentos utilizados no ensaio de velocidade do pulso ultrassônico: (a) Pundit PL-200, (b) transdutores de 250 kHz, (c) gel de acoplamento e (d) transdutores DPC de 40 kHz.

O instante de chegada da onda compressiva foi definido como o último ponto de amplitude 0,0% anterior ao início do primeiro sinal registrado. Em relação à onda cisalhante, 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). Ressalta-se que essa metodologia também 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 e da velocidade de propagação das ondas compressivas e cisalhantes foi realizada com o auxílio do software *PL-Link* da Proceq. A partir dos valores de V_p e V_s, as constantes elásticas dinâmicas de coeficiente de Poisson (υ_d) e módulo de elasticidade (E_d) foram determinadas por meio das Equações 3 e 4, respectivamente, em que a variável "ρ" corresponde à massa específica aparente natural das amostras, obtida conforme a Equação 5, referente à razão entre a massa (m) e o volume (V) dos corpos de prova. Ressalta-se que os ensaios não destrutivos para a determinação de V_p, V_s e ρ foram realizados em todos os 51 corpos de prova preparados e listados no item 2.1.

$$\upsilon_d = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)} \quad (3)$$

$$E_d = 2\rho V_s^2(1 + \upsilon_d) \quad (4)$$

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (5)$$

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Constantes Elásticas Estáticas e Dinâmicas

Os resultados obtidos para as constantes elásticas estáticas e dinâmicas de módulo de elasticidade (E e E_d) e coeficiente de Poisson (υ e υ_d), as respectivas razões entre esses parâmetros e os valores de massa específica aparente natural de cada classe de amostras, estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Valores das constantes elásticas estáticas e dinâmicas do sienogranito.

Grau de alteração intempérica	ρ (g/cm³)	E (GPa)	E_d (GPa)	E/E_d	υ	υ_d	υ/υ_d
W1	2,64	49,29	36,77	1,34	0,47	0,36	1,31
W2	2,63	49,03	41,57	1,18	0,46	0,38	1,21
W3	2,46	15,43	18,27	0,84	0,24	0,32	0,75

A partir dos resultados apresentados na Tabela 1, observou-se uma redução sutil no valor da massa específica aparente natural (ρ) das amostras do sienogranito entre as classes de W1 e W2, enquanto uma diminuição mais acentuada foi registrada entre as classes W2 e W3, indicando que os efeitos do intemperismo sobre as propriedades físicas da rocha se intensificam a partir da condição moderadamente alterada.

No que diz respeito às constantes elásticas estáticas, os resultados indicaram um comportamento semelhante para o módulo de elasticidade (E) e o coeficiente de Poisson (υ), observando-se uma redução desses parâmetros com o aumento do grau de alteração intempérica. Em relação à condição de rocha sã (W1), o módulo de elasticidade estático apresentou reduções de aproximadamente 1% para a classe W2 e de 70% para a classe W3, enquanto o coeficiente de Poisson estático diminuiu cerca de 2% e 49% para essas mesmas classes, respectivamente. Esses resultados evidenciaram que os estágios iniciais da alteração intempérica não promoveram mudanças expressivas na rigidez e no comportamento deformacional do sienogranito, enquanto o avanço da alteração para a condição moderadamente intemperizada resultou em redução expressiva dessas propriedades elásticas. Esse comportamento é semelhante ao observado por Jaques *et al.* (2020) para o mesmo material, e aos estudos realizados com rochas graníticas em diferentes países, tais como os desenvolvidos por Basu, Celestino e Bortolucci (2008), Gupta e Rao (2000), Heidari, Momeni e Naseri (2013) e Lamas (2023).

Por sua vez, os parâmetros elásticos dinâmicos apresentaram um comportamento distinto. Em relação à condição de rocha sã (W1), o módulo de elasticidade dinâmico (E_d) apresentou aumento de aproximadamente 13% para a classe W2 e redução de cerca de 50% para a classe W3, enquanto o coeficiente de Poisson dinâmico (υ_d) apresentou aumento de cerca de 6% em W2 e redução de aproximadamente 11% em W3. Esses resultados podem ser atribuídos a possíveis diferenças mineralógicas, texturais, microfissuras, ou demais 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 pelo valor de ρ.

Adicionalmente, para as amostras de rocha sã (W1) e levemente intemperizadas (W2), as razões E/E_d e υ/υ_d apresentaram valores superiores a 1,0, indicando que as constantes elásticas estáticas foram maiores que as dinâmicas nessas condições. Em contrapartida, para as amostras moderadamente intemperizadas (W3), ambas as razões apresentaram valores inferiores a 1,0, demonstrando a inversão da relação entre as constantes elásticas estáticas e dinâmicas com o aumento do grau de alteração intempérica, evidenciando a influência do intemperismo na resposta elástica do material.

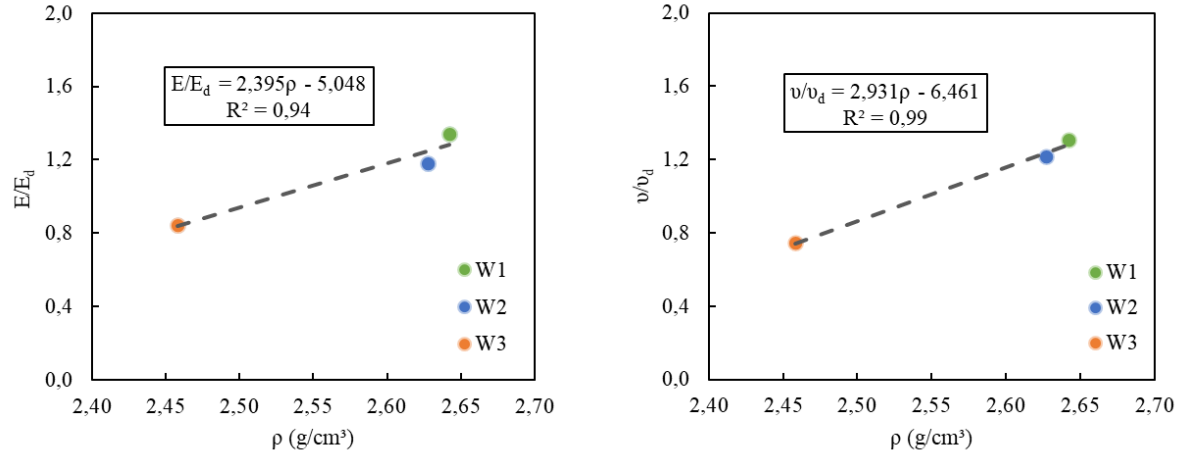
Conforme enfatizado por Martínez-Martínez, Benavente e García-del-Cura (2012), a presença de fraturas, vazios e os processos de intemperismo nas rochas causam uma discrepância entre os valores registrados para os parâmetros elásticos dinâmicos e estáticos. Essa divergência decorre do fato de que as descontinuidades provocam efeitos distintos na propagação de ondas ultrassônicas e nos ensaios de compressão uniaxial. Consequentemente, as constantes elásticas dinâmicas podem assumir valores superiores ou inferiores às correspondentes constantes estáticas, em função do grau de alteração intempérica e do estado estrutural da rocha, conforme evidenciado pela redução das razões E/E_d e υ/υ_d da classe W1 para W2 e pela inversão dessas razões na condição mais intemperizada (W3).

3.2 Correlações Empíricas entre as Constantes Elásticas Estáticas e Dinâmicas

A Figura 3 apresenta as linhas de tendência que representam a variação das razões E/E_d e υ/υ_d para as classes W1, W2 e W3 em função da massa específica aparente natural (ρ), com base nos valores médios das propriedades de cada grupo de amostras. Esses resultados evidenciam uma tendência linear entre as variáveis, indicando que as razões E/E_d e υ/υ_d são diretamente proporcionais à massa específica aparente natural do sienogranito e, consequentemente, são inversamente proporcionais ao grau de alteração intempérica.

Ressalta-se que, sempre que possível, as constantes elásticas estáticas (E e υ) devem ser determinadas por meio do ensaio de compressão uniaxial. Entretanto, na impossibilidade de sua execução, os parâmetros

dinâmicos (E_d e υ_d) podem ser obtidos por meio de ensaios não destrutivos de velocidade de propagação de ondas, permitindo a estimativa das constantes estáticas do sienogranito por meio das correlações propostas neste estudo, em conjunto com a massa específica aparente natural. Destaca-se, ainda, que o ensaio de velocidade de propagação do pulso ultrassônico apresenta elevada aplicabilidade em campo, dispensando a extração de amostras e simplificando o processo de caracterização das propriedades elásticas das rochas.



(a) (b)

Figura 3. Correlações empíricas entre as razões: (a) E/E_d e (b) υ/υ_d em função da massa específica aparente natural do sienogranito.

A Tabela 2 apresenta algumas correlações propostas na literatura entre os módulos de elasticidade estático (E) e dinâmico (E_d), bem como uma correlação entre os coeficientes de Poisson estático (υ) e dinâmico (υ_d). Observa-se que as equações propostas por diferentes autores apresentam comportamento predominantemente linear e têm sido aplicadas a diversos tipos de rochas, incluindo litotipos graníticos. Esses resultados corroboram o comportamento linear obtido no presente estudo, representado pelas equações indicadas na Figura 3.

Além disso, destaca-se que as correlações propostas neste estudo apresentaram elevados valores de R^2, demonstrando bom ajuste aos dados experimentais e comportamento compatível com o reportado na literatura, evidenciando sua aplicabilidade para a estimativa das propriedades elásticas do sienogranito.

Tabela 2. Comparação de correlações entre constantes elásticas estáticas e dinâmicas.

Autores	**Equação**	**R^2**	**Tipos de rocha**
Presente estudo (2026)	$E = E_d(2{,}395\rho - 5{,}048)$	0,94	Sienogranito
King (1983)	$E = 1{,}263E_d - 29{,}5$	0,82	Ígneas e metamórficas
Eissa e Kazi (1988)	$E = 0{,}74E_d - 0{,}82$	0,70	Vários tipos
Nur e Wang (1989)	$E = 1{,}153E_d - 15{,}2$	-	E > 15 GPa
Christaras, Auger e Mosse (1994)	$E = 1{,}05E_d - 3{,}16$	0,99	Vários tipos
Brotons *et al.* (2016)	$E = 0{,}932E_d - 3{,}421$	0,97	Vários tipos
Asef e Farrokhrouz (2017)	$E = 0{,}88E_d(1 - \eta) - 3{,}7$	0,92	Vários tipos
Presente estudo (2026)	$\upsilon = \upsilon_d(2{,}931\rho - 6{,}461)$	0,99	Sienogranito
Christaras, Auger e Mosse (1994)	$\upsilon = 0{,}71\upsilon_d + 0{,}063$	0,74	Vários tipos

Nota: E = módulo de elasticidade estático; E_d = módulo de elasticidade dinâmico; υ = coeficiente de Poisson estático; υ_d = coeficiente de Poisson dinâmico; η = porosidade; ρ = massa específica aparente natural.

5 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos, constatou-se que a massa específica aparente natural (ρ), o módulo de elasticidade estático (E) e o coeficiente de Poisson estático (υ) apresentaram variações pouco expressivas entre as classes de W1 e W2, enquanto uma redução mais acentuada foi registrada entre as classes W2 e W3, indicando que os efeitos do intemperismo sobre as propriedades físicas e mecânicas do sienogranito se intensificam a partir da condição moderadamente alterada. Em relação aos parâmetros elásticos dinâmicos, observou-se um pequeno aumento dos valores da classe W2 em relação à condição W1 e uma redução na classe W3, sugerindo que nos estágios iniciais de alteração, a influência do intemperismo sobre as propriedades dinâmicas é limitada, pelo que outros fatores, como características mineralógicas, texturais e a presença de microfissuras, podem exercer maior influência sobre o comportamento elástico do material.

Além disso, evidenciou-se uma relação linear entre as razões E/E_d e υ/υ_d e a massa específica aparente natural do sienogranito, apresentando valores superiores a 1,0 para as amostras de W1 e W2, enquanto para as amostras de W3 ambas as razões foram inferiores a 1,0, caracterizando a inversão da relação entre as constantes elásticas estáticas e dinâmicas com o aumento do grau de alteração intempérica.

Adicionalmente, as correlações propostas entre as constantes elásticas estáticas e dinâmicas, em função do grau de alteração intempérica, representado pela massa específica aparente natural, apresentaram elevados coeficientes de determinação (R^2), demonstrando bom ajuste aos dados experimentais, bem como um comportamento consistente com o reportado na literatura. Desta forma, as equações empíricas mostram-se aplicáveis para a estimativa indireta das propriedades elásticas do sienogranito, a partir de parâmetros dinâmicos determinados por ensaios não destrutivos de simples execução, particularmente quando a realização de ensaios de compressão uniaxial é limitada ou inviável. Entretanto, o baixo número de amostras ensaiadas à compressão, é um fator que sugere cautela na consideração dos resultados obtidos para esses ensaios no presente estudo.

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

Asef, M. R., Farrokhrouz, M. (2017) A semi-empirical relation between static and dynamic elastic modulus. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 157, p. 359-363.

ASTM International (2000). D2845–00: *Standard Test Method for Laboratory Determination of Pulse Velocities and Ultrasonic Elastic Constants of Rock*. 7 p.

ASTM International (2014). D7012-14: *Standard Test Methods for Compressive Strength and Elastic Moduli of Intact Rock Core Specimens under Varying States of Stress and Temperatures*. 9 p.

Basu, A., Celestino, T. B., Bortolucci, A. A. (2009) Evaluation of rock mechanical behaviors under uniaxial compression with reference to assessed weathering grades. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 42, p. 73-93.

Bell, F.G. (2005) Engineering Geology: Rock Properties and Their Assessment. *Encyclopedia of Geology*, p. 566-580.

Brotons, V., Tomás, R., Ivorra, S., Grediaga, A., Martínez-Martínez, J., Benavente, D., Gómez-Heras, M. (2016) Improved correlation between the static and dynamic elastic modulus of different types of rocks. *Materials and Structures*, 49 (8), p. 3021-3037.

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.

Christaras, B., Auger, F., Mosse, E. (1994) Determination of the moduli of elasticity of rocks. Comparison of the ultrasonic velocity and mechanical resonance frequency methods with direct static methods. *Materials and Structures*, 27 (4), p. 222-228.

Eissa, E. A., Kazi, A. (1988) Relation between static and dynamic Young's moduli of rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 25 (6), p. 479-482.

Ferreira, C., Rios, S., Cristelo, N., Fonseca, A. V. da. (2021) Evolution of the optimum ultrasonic testing frequency of alkali-activated soil–ash. *Géotechnique Letters*, 11 (3), p. 158-163.

Goodman, R. E. (1989) *Introduction to Rock Mechanics*. 2nd ed., New York. 562 p.

Gupta, A. S., Rao, K. S. (2000) Weathering effects on the strength and deformational behaviour of crystalline rocks under uniaxial compression state. *Engineering geology*, 56 (3-4), p. 257-274.

Heidari, M., Momeni, A. A., Naseri, F. (2013) New weathering classifications for granitic rocks based on geomechanical parameters. *Engineering Geology*, 166, p. 65-73.

International Society for Rock Mechanics (1981). Commission on Classification of Rocks and Rock Masses. Basic geotechnical description of rock masses. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 18 (1), p. 85-110.

International Society for Rock Mechanics (2007). *The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 1974-2006*. 644 p.

Jaques, D. S., Marques, E. A. G., Marcelino, L. C., Leão, M. F., Ferreira, E. P. S., Lemos, C. C. S. (2020) Changes in the Physical, Mineralogical and Geomechanical Properties of a Granitic Rock from Weathering Zones in a Tropical Climate. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 53 (12), p. 5345-5370.

King, M. S. (1983) Static and dynamic elastic properties of rocks from the Canadian shield. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 20 (5), p. 237-241.

Lamas, R. I. da 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. Portugal, 397 p.

Martínez-Martínez, J., Benavente, D., García-Del-Cura, M. A. (2012) Comparison of the static and dynamic elastic modulus in carbonate rocks. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 71, p. 263-268.

Nur, A.; Wang, Z. (1989) Seismic and acoustic velocities in reservoir rocks. *Society of Exploration Geophysicists*.

Proceq (2023). *DPC Shear Wave Transducers Quick Reference*. Disponível em: <https://www.screeningeagle.com/pt/products/pundit-200>. Acesso em 09 fev. 2026.

Rios, S., Cristelo, N., Fonseca, A. V. da, Ferreira, C. (2017) Stiffness Behavior of Soil Stabilized with Alkali-Activated Fly Ash from Small to Large Strains. *International Journal of Geomechanics*, 17 (3).

Shen, S., Gao, Y., Jia, L. (2024) A Comparison of the relationship between dynamic and static rock mechanical parameters. *Applied Sciences*, 14(11), p. 4487.