

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/765

Correlações entre Ensaios Triaxiais e Uniaxiais para Rochas Duras

Henrique Alcântara Nogueira
Engenheiro Civil, Faculdade Arnaldo, Belo Horizonte, Brasil, henriquealcnog@gmail.com

Marina Fernanda Rocha de Avelar
Engenheira Civil, Faculdade Arnaldo, Belo Horizonte, Brasil, avelarmarinafr@gmail.com

Marcio Fernandes Leão
Geólogo-geotécnico, Tractebel, Belo Horizonte, Brasil, marcio.leao@tractebel.engie.com

RESUMO: Apesar de frequentemente utilizados para a obtenção de parâmetros de rochas, os ensaios uniaxiais e triaxiais podem representar elevado custo, incremento na espera pelo resultado da informação esperada, além da complexa execução. Por esse motivo, correlações de resultados desses ensaios podem se mostrar úteis para balizar futuros estudos, principalmente para os casos em que os ensaios laboratoriais são de difícil exequibilidade. O presente artigo buscou trazer uma correlação factível para ensaios triaxiais e de compressão uniaxial para rochas duras e comumente presentes em projetos de Engenharia e Mineração em diferentes regiões do Brasil. A partir de resultados de ensaios triaxiais e uniaxiais de variadas rochas, ígneas e metamórficas, foi desenvolvida uma correlação por meio de ajuste linear, oferecendo uma previsão estimada dos resultados de resistência à compressão máxima por litotipo. A partir dos resultados obtidos foi possível estimar, além da própria equação, um parâmetro de taxa de incremento de resistência à compressão, que representa o ganho de resistência por aumento de confinamento lateral. Observou-se que todos os litotipos apresentam ganhos de resistência à compressão à medida que o confinamento lateral aumenta, à exceção de alguns *outliers*. Entretanto, acredita-se que esse incremento da resistência máxima é maior para alguns litotipos em função das características mineralógicas e geológicas das rochas e dos resultados de resistência à compressão uniaxial (UCS). Conclui-se que a equação apresentada se mostrou útil, porém devendo ser avaliada para outros litotipos não contemplados nesse artigo, bem como tensões de confinamento para atestar o parâmetro proposto.

PALAVRAS-CHAVE: Ensaio Uniaxial, UCS, Ensaio Triaxial.

ABSTRACT: Although often used to obtain rock parameters, uniaxial and triaxial tests can pose challenges, including high costs, extended waiting times for expected information, and complex execution. For this reason, correlations of results from these tests can prove useful to guide future studies, especially in cases where laboratory tests are difficult to carry out. This article aimed to provide a feasible correlation for triaxial and uniaxial compression tests for hard rocks commonly found in Engineering and Mining projects in different regions of Brazil. Based on results from various triaxial and uniaxial tests on igneous and metamorphic rocks, a correlation was developed through linear fitting, offering an estimated prediction of maximum compressive strength results by lithotype. From the obtained results, it was possible to estimate, in addition to the equation itself, a parameter for the increase rate in compressive strength, representing the gain in strength resulting from the increase in lateral confinement. It was observed that all lithotypes show increases in compressive strength as lateral confinement increases, except for some outliers. However, it is believed that this increase in maximum strength is higher for certain lithotypes due to the mineralogical and geological characteristics of the rocks and the results of uniaxial compressive strength (UCS) tests. In conclusion, the presented equation proved useful but should be evaluated for other lithotypes not covered in this article, as well as for confinement stresses to validate the proposed parameter.

KEYWORDS: Uniaxial Test, UCS, Triaxial Test.

1 INTRODUÇÃO

Ensaio uniaxiais e triaxiais são recorrentemente realizados em laboratório para obtenção de parâmetros de resistência e deformação de rochas. O preparo das amostras para tais ensaios é complexo e deve ser executado por laboratórios especializados em Mecânica das Rochas. Nem todo laboratório é capaz de atingir as especificações de geometria e de instrumentação necessárias para aquisição dos parâmetros relacionados a deformação, muitas das vezes por conta de características intrínsecas e extrínsecas dos materiais amostrados. Além disso, os ensaios costumam demandar tempo e recursos a depender do tipo de projeto e especificações técnicas.

Tradicionalmente, os ensaios em rocha são realizados em corpos de provas cilíndricos, submetidos a esforços axiais com o objetivo de determinar a resistência à compressão uniaxial da rocha (Silva, 2019).

Ainda segundo Silva (2019), essa é uma das principais propriedades mecânicas determinada em ensaios em rochas e relaciona as forças internas de atração existentes entre as partículas que compõem o material. Portanto, o ensaio de compressão uniaxial visa determinar qual a tensão máxima que uma rocha suporta sem romper, quando submetida a esforços compressivos e é aplicável a rochas sobre as quais atuarão esforços verticais (Vidal et al., 1999 apud Silva, 2019).

Atualmente, estão sendo elaborados estudos que desenvolvem equações empíricas para estimativa de UCS por meio de propriedades físicas e mecânicas dos materiais geológicos (Aladejare et al., 2021). Geralmente utilizam-se propriedades físicas como: dureza, densidade, umidade, porosidade, velocidade da onda P e S, peso unitário, índice de durabilidade, bem como propriedades mecânicas, como: o Módulo de Young, a resistência à tração indireta e a resistência a carga pontual). Segundo Aladejare et al. (2021), apesar de existirem inúmeras equações empíricas disponíveis na literatura, há uma necessidade de selecionar sistematicamente equações que se adequem a localidade de origem das rochas em estudo.

No presente estudo, objetivou-se relacionar os valores de resistência à compressão na ruptura de ensaios triaxiais e uniaxiais de rochas duras ($UCS > 25$ MPa), de distintas regiões do Brasil, para obtenção de uma correlação empírica que permitisse estimar os valores de resistência de pico para diferentes graus de confinamento e litotipos; não foram analisados os resultados de deformabilidade. Além dessas estimativas dos valores de compressão máxima na ruptura por meio de regressões lineares, foi proposta uma taxa de incremento na resistência máxima.

Destaca-se que uma correlação entre os resultados de ensaios, pode fornecer valores de referência para situações como: (i) na elaboração de estudos em fase preliminar sem a previsão de realização de ensaios de laboratório; (ii) no auxílio da adoção de faixas de resultados críveis e escolha de alternativas ou para direcionar estratégias; (iii) no dimensionamento de equipamentos de acordo com os valores prováveis de resistência à compressão pela equipe de laboratório; e (iv) a viabilidade das campanhas que não possuem um grande número de amostras ao preparo e ao ensaio propriamente dito, bem como a ausência de prensa triaxial.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Preparação dos Ensaios

Foram preparados corpos de prova de 11 litotipos coletados no Brasil por meio de sondagem rotativa para obtenção de testemunhos rochosos, totalizando 589 corpos de prova. O preparo das amostras foi seguido os padrões estabelecidos pelo *International Society for Rocks Mechanics* (ISRM), ou seja, corpos de prova cilíndricos com razão altura/diâmetro entre 2,0 e 2,5. O topo e a base foram usinados para garantir o paralelismo entre as faces. As laterais foram retificadas para garantir a uniformidade do diâmetro ao longo de todo o corpo de prova.

Os ensaios foram realizados conforme norma internacional D7012 da *American Society for Testing and Materials* (ASTM, 2010), em condição ambiente. A prensa utilizada para compressão tem capacidade máxima de aplicação de 2000 kN de força. Para os ensaios triaxiais, o corpo de prova foi inserido em uma câmara especial, composta por: uma célula metálica, uma membrana flexível, óleo e aparelho para aplicação

de pressão. Tal dispositivo é denominado Célula de Hoek, na qual a tensão confinante foi exercida na amostra por meio da aplicação de óleo sob pressão sobre a membrana flexível.

Para determinação da resistência à compressão uniaxial (σ_c) foi utilizada a relação entre a força aplicada pela prensa dividida pela área do topo/base do corpo de prova, medida em MPa. Durante a fase de carregamento dos ensaios, a aplicação de força foi constante até o momento da ruptura, quando ocorre uma significativa queda na tensão.

A partir dos resultados de ensaios em laboratório, foi obtida uma tabela geral com uma série de dados de entrada e saída e o gráfico de compressão x tempo. Para o estudo em questão, apenas os seguintes dados foram considerados: identificação do corpo de prova ensaiado, litotipo, confinamento lateral aplicado e compressão máxima na ruptura.

Cada amostra recebeu uma numeração única para identificação. Os valores de compressão máxima na ruptura foram obtidos de maneira automática pelo equipamento servo-controlado. De qualquer maneira, foi possível verificar o resultado a partir dos gráficos de compressão *versus* tempo. As litologias ensaiadas foram elencadas na Tabela 1, com referência do local de coleta, quantidade de ensaios e confinamentos.

Tabela 1: Resumo dos litotipos ensaiados

Litotipo	Local de Coleta	UCS (unid.)	TX (unid.)	Confinamentos TX (MPa)
Carbonatito Calcítico	São Paulo	17	17	5, 10, 15, 20, 25
Dunito	Bahia	38	43	5, 10, 15, 20, 30
Filito	Minas Gerais	14	7	5, 6, 10, 12, 15, 25, 35
Gabronorito	Bahia	35	52	5, 10, 15, 20, 30
Gnaisse	Minas Gerais	85	21	3, 5, 6, 10, 12, 15, 24, 25, 35
Harzburgito	Bahia	19	22	5, 10, 15, 20, 30
Jacupiranguito	São Paulo	10	9	5, 10, 15, 20, 25
Ortopiroxênio	Bahia	37	49	5, 10, 15, 20, 30
Quartzito	Minas Gerais	13	13	3, 5, 6, 10, 12, 15, 20, 24
Websterito	Bahia	17	28	5, 10, 15, 20, 30
Xisto	Minas Gerais	20	23	3, 6, 12, 20, 24

Os dados de resistência à compressão máxima *versus* tensões de confinamento foram plotados em um gráfico de dispersão compilando os resultados de todos os litotipos. Em seguida, foi aplicada uma regressão linear que melhor se ajustou aos pontos distribuídos.

Destaca-se que não foi objeto de estudo avaliar a composição mineralógica das rochas ensaiadas. Partindo do pressuposto que cada litotipo carrega suas propriedades geológicas intrínsecas e que essas que influenciam os parâmetros de resistência, para avaliação dos resultados de compressão uniaxial e triaxial, as amostras foram divididas em agrupamentos por litotipo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análise Estatística - Estimativa pela Regressão Linear

A partir da regressão linear desenvolvida para cada litotipo ensaiado (Tabela 2) é possível perceber um aumento no valor da resistência à compressão máxima com o aumento do confinamento lateral aplicado, conforme esperado. Entretanto, é possível verificar que o aumento não é perfeitamente linear e por esse motivo foram sinalizados adicionalmente os valores médios por grau de confinamento e seu respectivo ajuste linear. Para a análise compilada de todos os litotipos foi encontrado um baixo valor no parâmetro R^2 , indicando um ajuste linear ruim. Uma possível justificativa para o ocorrido é o comportamento distinto entre os diferentes tipos rochosos ensaiados, somado ao fato de que apenas alguns litotipos foram ensaiados a certos valores de confinamento. Por esse motivo, o mesmo procedimento de análise foi repetido de maneira

individualizada para cada litotipo.

Comportamento similar foi observado nos gráficos individuais (Figura 1) dos litotipos ensaiados. A dispersão é grande entre os resultados de resistência à compressão máxima, levando a regressões lineares mal ajustadas. Entretanto, quando são adotados valores médios por tensão de confinamento, a regressão se ajusta bem, com valores de R^2 acima de 0,92. Para alguns litotipos, a adoção das médias apresentou melhora significativa no parâmetro em questão.

Tabela 2: Equações encontradas para estimativas de resultados de resistência à compressão máxima *versus* confinamento

Litotipo	Confinamento <i>versus</i> Compressão Máxima		Confinamento <i>versus</i> Compressão Máxima Média por Confinamento	
	Equação da Regressão	R^2	Equação da Regressão	R^2
Geral	$y = 9,1343x + 84,994$	0,47	$y = 5,6465x + 92,989$	0,39
Carbonatito Calcítico	$y = 5,4735x + 68,279$	0,85	$y = 5,4417x + 69,699$	0,99
Dunito	$y = 8,2726x + 72,95$	0,59	$y = 7,758x + 82,941$	0,98
Filito	$y = 2,7289x + 41,759$	0,69	$y = 2,9001x + 37,988$	0,96
Gabronorito	$y = 10,792x + 89,8$	0,76	$y = 10,289x + 101,03$	0,96
Gnaisse	$y = 4,0792x + 66,245$	0,45	$y = 3,902x + 71,035$	0,92
Harzburgito	$y = 12,03x + 61,016$	0,79	$y = 12,078x + 60,62$	0,97
Jacupiranguito	$y = 8,5292x + 104,19$	0,80	$y = 7,6782x + 117,76$	0,96
Ortopiroxênio	$y = 11,976x + 122,9$	0,60	$y = 11,213x + 136,35$	0,92
Quartzito	$y = 7,6963x + 30,846$	0,88	$y = 6,8785x + 42,656$	0,92
Websterito	$y = 10,495x + 223,92$	0,51	$y = 10,081x + 230,39$	0,96
Xisto	$y = 3,641x + 30,592$	0,76	$y = 3,4702x + 34,993$	0,98

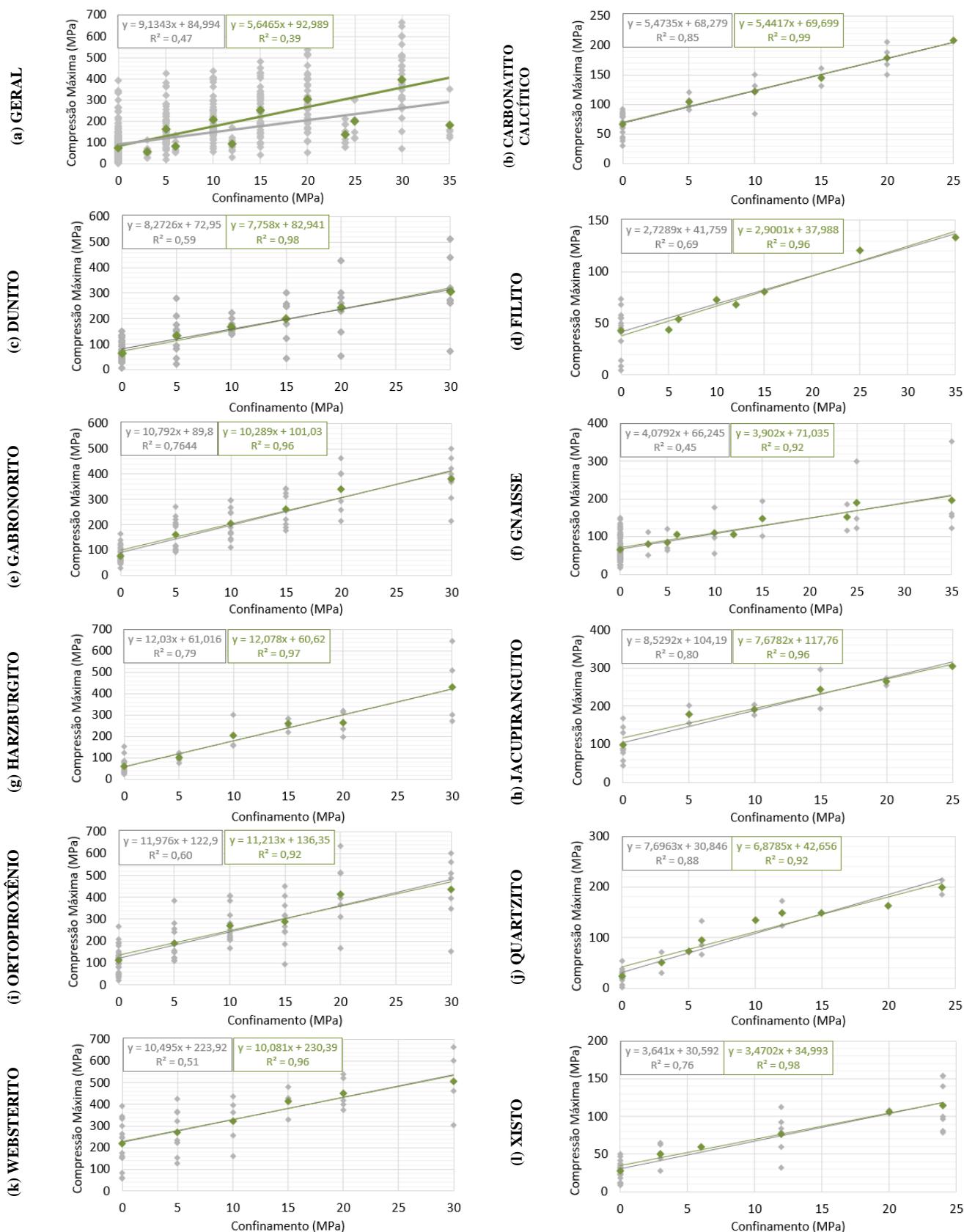
A resistência à compressão máxima obtida em um ensaio de compressão é influenciada pelas características da rocha, sendo uma delas a composição mineralógica, diretamente relacionada à sua geologia ou litologia.

Estudos comprovam que a resistência mecânica das rochas é diretamente afetada por características como: tamanho dos grãos, composição mineralógica, contato entre grãos e tipo de cimento. De maneira geral, quanto maior o tamanho dos grãos, menor a resistência à compressão uniaxial (Chen et al., 2023).

Ainda segundo Chen et al. (2023) a resistência das rochas é tradicionalmente correlacionada à composição mineralógica de quartzo, feldspato, mica e argilas, que podem conferir maior ou menor resistência a depender da quantidade presente na matriz.

Segundo Yusof e Zabidi (2016) apud Esmailzadeh (2017), os processos de desenvolvimento de rochas ígneas e metamórficas incluem uma combinação de crescimento cristalino, dissolução, movimento e deformação, que resulta em mudanças na textura (microestrutura). Características petrográficas, como tamanho dos grãos, forma dos grãos, grau de intertravamento, tipo de contatos e composição mineralógica podem afetar as propriedades mecânicas da rocha.

A resistência à compressão uniaxial (UCS) é um dos índices mais importantes em estudos do comportamento mecânico de rochas e é comumente usada para uma variedade de aplicações de engenharia, como classificação de maciços rochosos e critérios de ruptura de rochas. No entanto, tais testes requerem amostras de alta qualidade que nem sempre podem ser obtidas, principalmente no caso de rochas fracas, estratificadas, altamente fraturadas ou alteradas (Esamaldeen et al., 2015 apud Esmailzadeh, 2017).



Legenda: Valores de Compressão Máxima Valores Médios de Compressão Máxima

Figura 1: Gráficos de confinamento *versus* a resistência à compressão máxima para os diferentes litotipos: (a) Geral, (b) Carbonatito Calcítico, (c) Dunito, (d) Filito, (e) Gabronorito, (f) Gnaisse, (g) Harzburgito, (h) Jacupiranguito, (i) Ortopiroxênio, (j) Quartzito, (k) Websterito e (l) Xisto.

4.2 Análise do Incremento de Resistência Máxima

As regressões lineares buscaram nortear os valores de referência de compressão máxima para os litotipos mencionados. Ademais, foi percebido que o aumento no valor da resistência à compressão máxima com o aumento do confinamento lateral aplicado se dá de maneira distinta entre os diferentes litotipos. Em algumas rochas o ganho de resistência é maior que em outras. Para verificar esse cenário, foram plotados gráficos que correlacionam o confinamento lateral *versus* o incremento no resultado da compressão máxima. Os incrementos foram calculados por meio da Equação 1 e apresentados na Figura 2 e Tabela 2.

$$I_n = \frac{\sigma_n - \sigma_0}{\sigma_0} \quad (1)$$

Onde: I_n = Incremento da compressão máxima, em %, para a tensão de confinamento n

σ_n = Resistência à compressão encontrada para o confinamento n

σ_0 = Resistência à compressão encontrada sem confinamento (UCS)

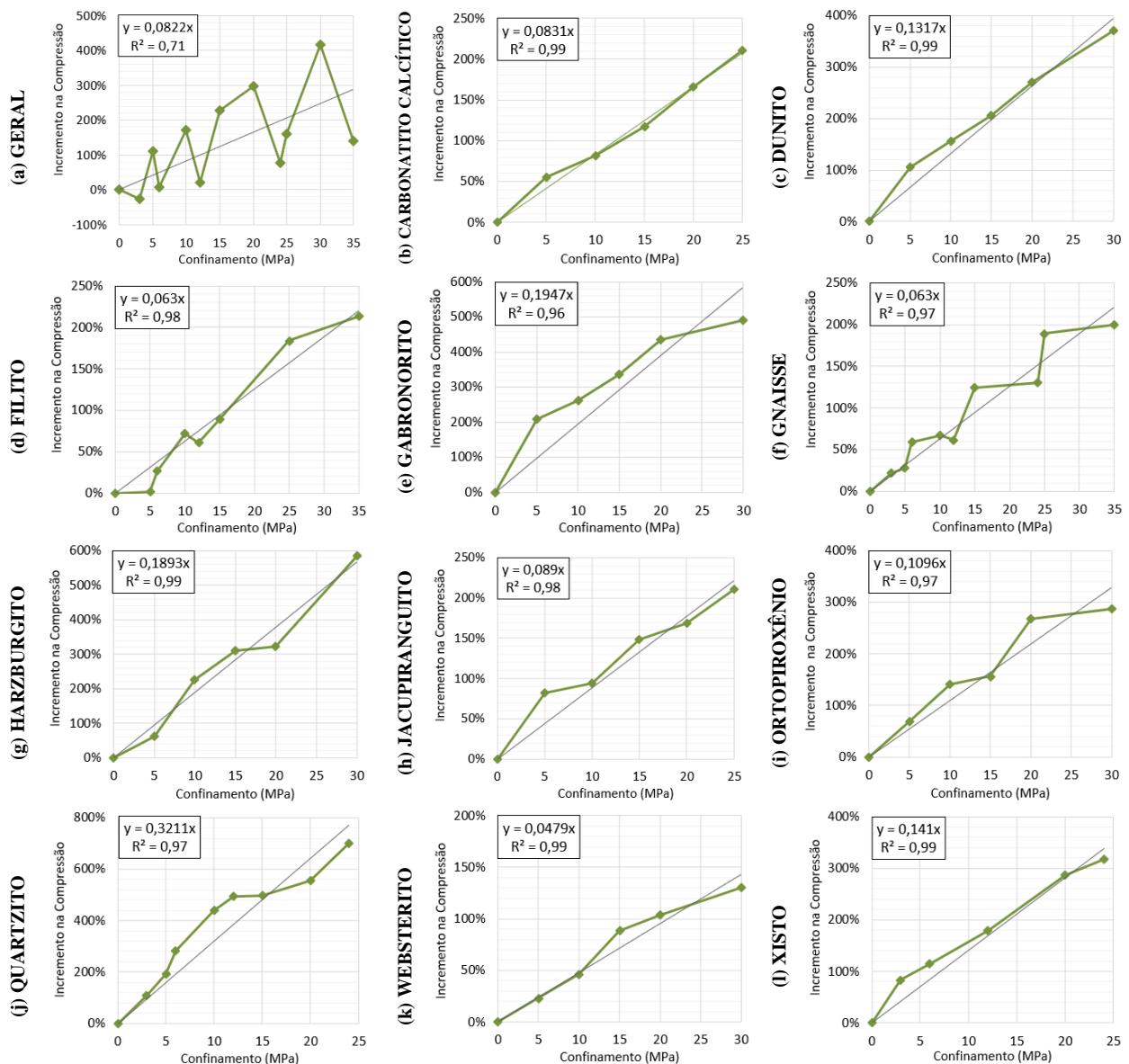


Figura 1: Gráficos de confinamento lateral *versus* incremento no resultado da compressão máxima para os diferentes litotipos: (a) Geral, (b) Carbonatito Calcítico, (c) Dunito, (d) Filito, (e) Gabronorito, (f) Gnaisse, (g) Harzburgito, (h) Jacupiranguito, (i) Ortopiroxênio, (j) Quartzito, (k) Websterito e (l) Xisto.

Tabela 2: Equações encontradas e taxa de incremento para os diferentes litotipos estudados

Litotipo	Confinamento <i>versus</i> incremento de tensão		Taxa de incremento
	Equação da Regressão	R ²	
Geral	y = 0,0822x	0,71	8,2%
Carbonatito Calcítico	y = 0,0831x	0,99	8,3%
Dunito	y = 0,1317x	0,99	13,2%
Filito	y = 0,063x	0,98	6,3%
Gabronorito	y = 0,1947x	0,96	19,5%
Gnaisse	y = 0,063x	0,97	6,3%
Harzburgito	y = 0,1893x	0,99	18,9%
Jacupiranguito	y = 0,089x	0,98	8,9%
Ortopiroxênio	y = 0,1096x	0,97	11,0%
Quartzito	y = 0,3211x	0,97	32,1%
Websterito	y = 0,0479x	0,99	4,8%
Xisto	y = 0,141x	0,99	14,1%

As regressões lineares foram prefixadas com início no encontro dos eixos, em que tanto o confinamento quanto o incremento no valor de compressão são zero. As taxas de incremento encontradas variaram entre 6,3% e 32,1%, o que significa na prática que uma rocha com valor de UCS conhecido terá um incremento estimado de 6,3% a 32,1% vezes cada MPa de confinamento lateral no resultado de compressão máxima para essa dada tensão de confinamento.

Para quase todos os litotipos, o incremento não cresceu de maneira completamente linear em relação ao confinamento. Entretanto, foi possível obter regressões com valor de R² acima de 0,96. As regressões se mostraram melhor ajustadas quando relacionadas diretamente ao litotipo, se comparadas ao grupo geral estudado, que se ajustou mal ao modelo, com R² de 0,71.

Avaliando-se os resultados individuais encontrados, o quartzito apresentou uma taxa de incremento muito mais elevada que os demais litotipos. Apesar da resistência à compressão uniaxial do quartzito, filito e xisto ficarem próximas, entre 20 e 50 MPa, apenas o quartzito apresentou resistência à compressão acima de 200 MPa quando confinado a 25 MPa. Por outro lado, o gnaisse já apresentou resistência mais alta mesmo não confinado, na faixa dos 75 MPa. Então mesmo ultrapassando os 200 MPa de resistência à compressão ao ser confinado a 35 MPa, o incremento no valor da resistência foi menor, explicando o baixo índice comparativamente a rochas mais brandas aqui estudadas.

Avaliando-se os resultados encontrados, nota-se que as rochas com maior taxa de incremento foram as que apresentaram valores mais baixos para resistência à compressão uniaxial (sem confinamento), com resultados abaixo dos 100 MPa. Além disso, para o harzburgito, gabronorito, dunito, o ganho de resistência foi alto, atingindo resultados acima dos 300 MPa para 30 MPa de confinamento lateral. De maneira contrária, o carbonatito calcítico mostrou resultado de resistência à compressão uniaxial inferior a 75 MPa e ganhos mais moderados de resistência ao ser confinado lateralmente, atingindo valores abaixo dos 225 MPa para confinamentos de 25 MPa. Por esse motivo, a taxa de incremento para esse litotipo foi menor, mesmo com um resultado UCS abaixo de 100 MPa.

Para o websterito ocorre o oposto. Com resultados muito altos de resistência à compressão uniaxial (acima dos 200 MPa) e resultados igualmente altos para a resistência confinada (acima dos 500 MPa para 30 MPa de confinamento lateral), a taxa de incremento encontrada é a mais baixa dentre os litotipos ensaiados.

Acredita-se que tal estimativa do incremento na resistência à compressão máxima é aplicável em níveis de tensão comumente utilizados em ensaios de laboratório, ou seja, até cerca de 35 MPa. Para valores de tensão confinante maiores, as estimativas devem ser refeitas para avaliar a aplicabilidade do método.

5 CONCLUSÃO

O estudo de correlações para estimativa de resultados de compressão máxima para rochas é um tema recorrente e amplamente aplicável. Devido às dificuldades para obtenção de resultados de ensaio satisfatórios por uma série de motivos, principalmente quando há tensão de confinamento aplicada ao corpo de prova, lançar mão de equações de regressão linear que estimam os parâmetros de resistência pode ser uma boa alternativa.

Para o presente estudo, além das equações de caráter preditivo, foi apresentado também um parâmetro nomeado taxa de incremento, relacionado ao ganho de resistência à compressão com o aumento da tensão confinante lateral. Percebeu-se que independentemente do litotipo, as amostras ensaiadas ganharam resistência com o aumento do confinamento, como já era esperado. O incremento no valor da compressão máxima variou de 6,3% a 32,1% para os litotipos ensaiados. Além disso, notou-se que a depender do litotipo, ou seja, a depender das propriedades e características mineralógicas e geológicas das rochas, e dos resultados de resistência à compressão uniaxial (UCS), alguns litotipos tendem a ganhar mais resistência com o confinamento lateral.

O parâmetro de taxa de incremento proposto pode ajudar profissionais que atuam no campo da Mecânica das Rochas no intuito de ganhar previsibilidade nos resultados de resistência à compressão triaxial. Para continuidade da validação da proposta aqui apresentada, podem ser inclusos outros litotipos para rochas duras, bem como para rochas brandas. Acredita-se que tal estimativa do incremento na resistência à compressão máxima é aplicável a níveis de tensão comumente utilizados em ensaios de laboratório, ou seja, até cerca de 35 MPa. Para valores de tensão confinante maiores, as estimativas devem ser refeitas para avaliar a aplicabilidade do método.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aladejare, A. E., Alofe, E. D., Onifade, M. et al (2021). Empirical Estimation of Uniaxial Compressive Strength of Rock: Database of Simple, Multiple, and Artificial Intelligence-Based Regressions. *Geotech Geol Eng*, 2021. v. 39, p 4427–4455.
- ASTM International (2010). ASTM D7012: *Standard Test Method for Compressive Strength and Elastic Moduli of Intact Rock Core Specimens under Varying States of Stress and Temperatures*.
- Chen, Z. L. et al. (2023) Effects of mineralogical composition on uniaxial compressive strengths of sedimentary rocks. *Petroleum Science*. v. 20, p. 3062-3073.
- Esamaldeen, A., Guang, W., Ibrahim, A. (2015). Microfabrics-based approach to predict uniaxial compressive strength of selected amphibolites schists using fuzzy inference and linear multiple regression techniques. *Environmental & Engineering Geoscience*, 2015. v 21, p. 235-245.
- Esmailzadeh, A., Behnam S., Mikaeil R., Naghadehi M. Z., Saei S. (2017). Relationship between Texture and Uniaxial Compressive Strength of Rocks. *Civil Engineering Journal*, v. 3, p. 480-486.
- Silva, A. (2019) *Correlação de imagens digitais em ensaios de compressão diametral em rochas*. Tese de doutorado. Belo Horizonte, Escola de Engenharia da UFMG, 111p.
- Yusof, M., Zabidi. H. (2016). Correlation of mineralogical and textural characteristics with engineering properties of granitic rock from Hulu Langat, Selangor. *Procedia Chemistry*, 2016. v. 19, p. 975-980.