

Avaliação das Propriedades Físicas e Mecânicas de Rochas Ígneas por meio de Ensaios Estáticos e Dinâmicos com tentativa de Correlações Empíricas de Constantes Elásticas

Ricardo Moreira Vilhena
Furnas Centrais Elétricas S.A., Goiânia, Brasil, rvilhena@furnas.com.br

Carlos Lauro Vargas
Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Brasil, cvargas@eec.ufg.br

João Luiz Armelin
Furnas Centrais Elétricas S.A., Goiânia, Brasil, armelin@furnas.com.br

RESUMO: A obtenção de parâmetros mecânicos de rochas obtidos em laboratório é usualmente cara e destrói os corpos de provas, por exemplo: ensaios de compressão uniaxial em amostras de rochas. A resistência à compressão e a deformabilidade são parâmetros importantes que orientam o projeto geotécnico de fundações em relação ao comportamento do maciço rochoso frente às cargas impostas pelas estruturas. Os parâmetros físicos e mecânicos como módulos de elasticidade, razão de Poisson, módulo de cisalhamento e densidade também são importantes para aplicações em projetos de infraestrutura (usinas hidrelétricas e nucleares, obras rodoviárias e ferroviárias) e estudos da indústria do petróleo. Métodos de ensaios que utilizam a velocidade de propagação de ondas ultrassônicas para avaliar a qualidade geomecânica e “defeitos” (microfissuras, fraturas e descontinuidades) na matriz rochosa são alternativas não destrutivas e baratas. Por isso, este trabalho pretende avaliar dois diferentes métodos de obtenção de parâmetros físicos e mecânicos com a tentativa de correlacionar os módulos estáticos, obtidos em ensaios mecânicos em prensa servo-controlada, e dinâmicos, pela propagação de ondas ultrassônicas, em amostras de rochas ígneas. Além disso tentou-se estimar a resistência da rocha a partir de parâmetros obtidos de forma dinâmica. Foram avaliadas 44 amostras de rochas ígneas, sendo realizados 43 ensaios mecânicos (estáticos) de resistência à compressão, com a obtenção do módulo de deformabilidade e coeficiente de Poisson; e 420 leituras ultrassônicas para obtenção dos parâmetros dinâmicos. Todos os ensaios foram realizados de acordo com as sugestões de métodos da ISRM e normas da ASTM. As análises estatísticas dos dados ensaiados, para obtenção de correlações entre velocidades de ondas elásticas e propriedades físicas e mecânicas de rochas ígneas, não apresentaram os resultados esperados. No entanto, serão necessários mais ensaios e análises com intuito de propor metodologia de aquisição de parâmetros físico-mecânicos de baixo grau de investimento e maior representatividade de maciços rochosos.

PALAVRAS-CHAVE: Resistência à Compressão Uniaxial (RCU), Módulo de Deformação Estático (Es), Módulo de Deformação Dinâmico (Ed), Ensaio de Ultrassom.

1 INTRODUÇÃO

As propriedades elásticas das rochas dependem da sua composição mineralógica, estrutura e

feições geológicas, como poros e descontinuidades. Além disso, determinam os módulos elásticos que descrevem a relação entre tensão e deformação.

Em projetos de obras civis, que envolvem escavações e fundações em rocha, o estudo do comportamento das propriedades geomecânicas das rochas frente às mudanças no estado de tensões e carregamentos induzidos é de extrema importância para minimizar os riscos geológicos e tratamentos desnecessários.

A obtenção de parâmetros mecânicos de rochas obtidos em laboratório é usualmente cara e destrói os corpos de provas e ensaios que utilizam a velocidade de propagação de ondas ultrassônicas, por exemplo, podem ser aplicados em conjunto e em quantidades maiores, sendo métodos alternativos não destrutivos e baratos.

O módulo de elasticidade pode ser investigado com ensaios mecânicos de rocha estática e medições ultrassônicas, resultando em módulos estáticos e dinâmicos (Schön, 2015).

No método estático, a resistência a compressão uniaxial (RCU) e as constantes elásticas (módulo de deformabilidade e coeficiente de Poisson) são obtidos com aplicação de carga de compressão controlada. Existem outros testes estáticos de compressão e tração, porém não são objeto desse estudo.

As velocidades compressionais (V_p) e cisalhantes (V_s) são obtidas em ensaios de propagação de ondas ultrassônicas para determinação das propriedades dinâmicas.

As correlações entre os módulos elásticos estáticos e dinâmicos são estudadas no Brasil e no exterior principalmente em rochas sedimentares para prospecção e exploração de petróleo, pois são parâmetros fundamentais nos estudos de estabilidade mecânica de poços e comportamento geomecânico de reservatórios.

A correlação entre a razão dos módulos estáticos e dinâmicos para vários tipos de rochas foi estudada por Cheng e Johnston (1981).

A determinação da correlação empírica entre parâmetros estáticos e dinâmicos podem trazer uma boa aproximação da menor resistência de referência quando não há outra informação de parâmetros da rocha disponível (Chang *et al.*, 2006). Porém, o estabelecimento de uma relação única entre eles é muito difícil (Mavko *et al.*, 2009) em função da complexidade geológica das rochas.

Existem dois métodos para obtenção do

RCU de rochas: o primeiro pelo método direto e o segundo pela estimativa com equações empíricas (Baykasoglu *et al.*, 2008).

Segundo Kurtulus *et al.* (2015), vários autores estudaram a relação entre propriedades físico-mecânicas e velocidades de ondas compressionais (V_p) de rochas, incluindo correlações empíricas com RCU.

Neste contexto, ensaios em rochas intactas e correlações empíricas entre parâmetros estáticos e dinâmicos podem ser úteis para obtenção de propriedades mecânicas com baixo custo e maior representatividade para análises de maciços rochosos.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

As amostras de rochas ensaiadas são ígneas compostas por riolitos, microgranitos e rochas vulcânicas ácidas piroclásticas (ignimbritos, tufos e brechas), associadas a um evento vulcânico de magma riolítico paleoproterozóico de zona de subducção.

As amostras foram coletadas a partir de sondagens rotativas com diâmetro NW na região norte do país.

Foram ensaiadas 44 amostras de rochas, sendo 43 testadas pelo método estático e 420 medições pelo método dinâmico por ultrassom (compressional e cisalhante). Uma das 44 amostras foi danificada na preparação, portanto não foi ensaiada pelo método estático, mas foi utilizada para os testes dinâmicos.

Na Tabela 1 é apresentado o resumo dos ensaios realizados por litologia

As amostras intactas estudadas eram sãs, com ou sem descontinuidades, litologias distintas e em diferentes profundidades.

Tabela 1. Resumo da quantidade de ensaios por litologia.

Litologia	Estático	Dinâmico Ultrassom
Riolito	19	190
Vulcânicas	13	140
Piroclásticas		
Microgranito	11	90

Os ensaios de mecânica das rochas estão padronizados de acordo com normas e sugestões de métodos de entidades

internacionais: ASTM (2008 e 2002) e ISRM (1979).

Os ensaios foram conduzidos em corpos de prova (CPs) com diâmetros de 54 mm (NW) e alturas entre 2,5 e 3,0 mm. Os ensaios dinâmicos precederam os estáticos.

As densidades foram obtidas pelas medições de peso e dimensões efetuadas nos CPs.

2.1 Ensaios estáticos

O método estático é caracterizado por ensaios mecânicos usualmente destrutivos, nos quais o corpo de prova fica inutilizável após a realização do mesmo.

Os ensaios de compressão uniaxial ou simples foram realizados utilizando-se máquina rígida, servo-controlada, com capacidade de aplicação de 5,0 MN de carga axial, 140 MPa de tensão confinante e rigidez de 5,02 MN/mm.

Os procedimentos de medição, cálculos e análises seguiram a norma D2938 e D3148 (ASTM, 2002 e 2002a) e sugestões de métodos de ensaios da ISRM (1979).

Como resultados dos ensaios de compressão uniaxial (σ_c), além da resistência à compressão, foram obtidos valores para o módulo de deformabilidade (E_s) e para o coeficiente de Poisson (ν_e).

O módulo de deformabilidade (E_s) apresentado é a inclinação da reta dos trechos da curva *tensão versus deformação axial*. O coeficiente de Poisson foi obtido nos trechos correspondentes aos limites observados para a obtenção do módulo de deformabilidade.

2.2 Ensaios dinâmicos

Os métodos dinâmicos permitem a obtenção de informações tanto quantitativas (módulos elásticos), quanto qualitativas sobre a integridade de um componente mecânico, além do controle de suas propriedades, como mudanças de fase, por exemplo. Além disso, o corpo de prova pode ser utilizado novamente após o ensaio.

2.2.1 Propagação ultrassônica

A técnica de velocidade sônica baseia-se no

tempo de propagação (*flight time*) de um pulso sônico ou ultrassônico de curta duração ao longo do corpo de prova (frequência acima de 20 KHz).

Os procedimentos de medição ultrassônica das ondas V_P e V_S foram baseadas nas normas D2845 (ASTM, 2008), ISRM (2014) e no manual de instruções do equipamento.

Foram utilizados pares de transdutores de 54 kHz e 250 kHz para ondas compressoriais e cisalhantes, respectivamente.

Os testes foram iniciados com a obtenção das ondas V_P em seguida as ondas V_S . Em cada registro de leitura acoplava-se e ajustava os transdutores nas amostras, com intuito de verificar diferenças de leituras, porém não foram observadas diferenças significativas.

As leituras das ondas compressional e cisalhantes totalizaram 440 medições, que correspondem ao tempo de propagação da onda pelo corpo de prova, dado em μs .

3 ANÁLISE DOS RESULTADOS

O riolito é a principal rocha encontrada na região investigada e possui estrutura heterogênea, rico em SiO_2 , Na_2O e K_2O . Segundo Gill (2014), ele é caracterizado principalmente por quartzo e feldspato alcalino, com textura porfirítica representada por fenocristais desses minerais em uma matriz vítrea (esferulítica) ou microcristalina (Figura 1).

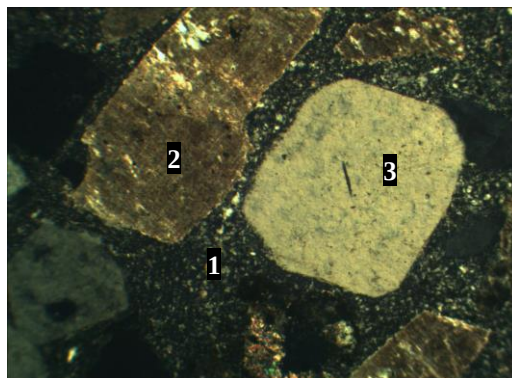


Figura 1. Textura porfirítica de riolito, caracterizada por uma matriz felsítica de granulação muito fina (1), englobando fenocristais idiomórficos de quartzo (2) e de feldspato (3).

Os microgranitos se assemelham com os riolitos pela coloração rosada e composição mineralógica. No entanto, a partir de uma boa observação macroscópica e pela análise microscópica observa-se a distinção das duas rochas pela textura e granulação.

As rochas piroclásticas, causada pela presença de teores elevados de voláteis no magma, estão associadas ao vulcanismo riolítico e apresentam textura afanítica, cristais quartzo e feldspatos, fragmentos de riolitos envoltos em matriz fina, no caso de tufos, ignimbritos e brechas, respectivamente.

A Tabela 2 apresenta os resultados dos parâmetros físico-mecânicos obtidos para os diferentes tipos litológicos investigados, a partir de diferentes testemunhos de sondagens em diferentes profundidades. A classificação litológica foi baseada em análises petrográficas.

Najibi *et al.* (2015) apresentam relações empíricas para estimar a RCU e E_s , a partir de ensaios dinâmicos. Algumas destas relações estão na Tabela 3.

As rochas que foram ensaiadas apresentaram valores acima de 100 MPa, uma delas por exemplo, um riolito da casa de força principal, atingiu 351,30 MPa de resistência à compressão. Já as amostras com fraturas existentes, em alguns casos, chegaram a valores de 28,44 MPa.

A litologia é fator importante para análise da resistência à compressão uniaxial, como foi observado nas amostras de rochas vulcânicas ácida piroclásticas, composta por ignimbritos, tufos e brechas vulcânica, que apresentaram valores abaixo de 100 MPa independente de fraturas existentes ou sua localização em profundidade.

Em geral, os valores abaixo de 100 MPa foram influenciados por famílias de descontinuidades preexistentes nas amostras para os diferentes tipos de rochas.

Contudo, observou-se que as resistências das rochas são variáveis e influenciadas principalmente pelo fraturamento dessas rochas. A Figura 2a apresenta o gráfico com os dados E_s x E_d de todas as amostras ensaiadas e as relações empíricas de Van Heerden (1978) e Savich (1984). Pode se observar os dados bastante dispersos. Separando as amostras de

Microgranito e Riolito das amostras Vulcânicas ácidas piroclásticas podemos observar uma menor dispersão dos dados (Figura 2b e c).

Entretanto, ainda é prematura uma correlação aceitável para as amostras estudadas, sendo necessário maior número de ensaios em diferentes tipos litológicos.

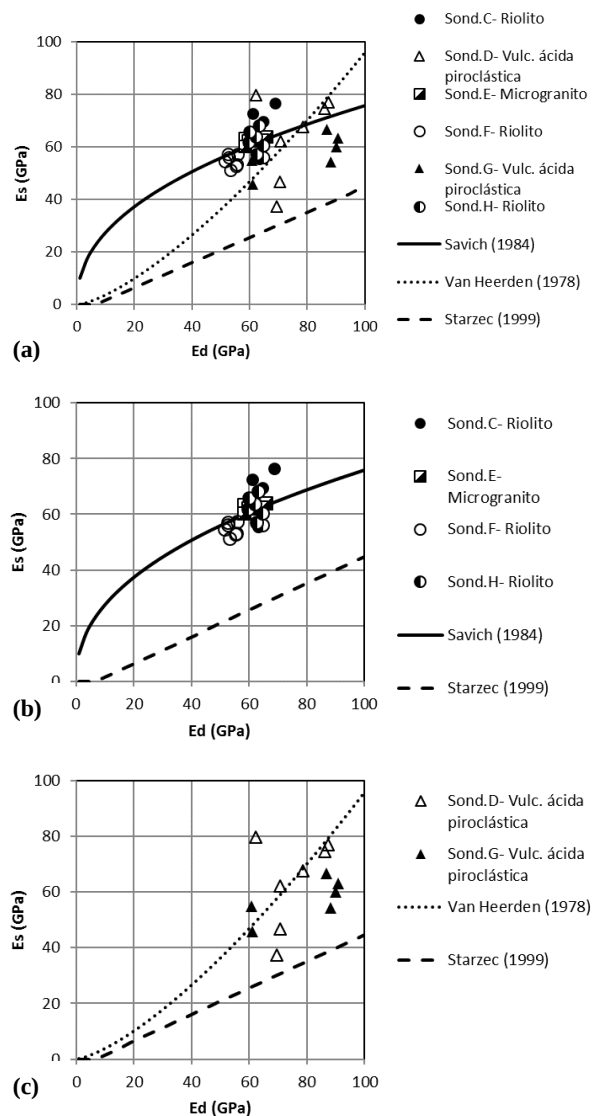


Figura 2. Dados de E_s x E_d e relações empíricas (a) todas as amostras; (b) amostra de microgranito e riolito (c) amostras vulcânicas ácidas piroclásticas.

Analisando a relação de E_s x V_p na Figura 3a para todas as amostras é possível encontrar uma aproximação maior com a relação de Najibi (2015) para algumas litologias. Separando alguns dados observa-se melhor aproximação desses com a relação de Najibi, como apresentado na Figura 3b.

A relação de E_d x RCU não apresenta uma tendência quando se compara todos os dados

com a relação de King (1983) como apresenta a Figura 4.

Tabela 2. Resultados de resistência à compressão, módulos de deformação estático e dinâmico, velocidades de propagação de ondas compressão e cisalhantes.

Nº Sond.	Trecho (m) de a		L	ρ g/cm ³	RCU MPa	Es GPa	Ed GPa	Vp km/s	Vs km/s
Sond.A	11,29	11,43	M	2,62	230,60	67,60	-	6,14	-
	11,43	11,57	M	2,63	252,50	66,20	-	6,03	-
Sond.B	38,60	38,74	M	2,65	243,40	70,90	-	6,20	-
	38,74	38,88	M	2,64	251,40	75,80	-	6,21	-
Sond.C	11,72	11,86	R	2,61	66,03	62,43	61,01	5,46	3,02
	12,70	12,84	R	2,61	32,20	55,51	63,30	5,70	3,06
	13,42	13,56	R	2,61	234,29	69,55	64,71	6,13	3,04
	13,68	13,82	R	2,62	344,51	72,65	61,06	5,69	2,98
	13,82	13,96	R	2,62	282,53	76,57	68,82	6,11	3,16
Sond.D	16,16	16,30	V	2,91	239,80	79,66	62,22	6,53	2,77
	16,33	16,47	V	2,90	64,51	77,00	87,38	6,59	3,38
	17,00	17,14	V	2,87	204,49	74,44	86,12	6,54	3,37
	17,14	17,28	V	2,89	114,81	67,70	78,45	6,51	3,18
	17,79	17,93	V	2,64	36,34	46,63	70,61	5,91	3,22
	18,51	18,65	V	2,64	30,81	37,31	69,51	6,48	3,12
	18,84	18,98	V	2,64	91,91	62,21	70,79	6,11	3,19
Sond.E	35,54	35,68	M	2,64	172,80	64,00	65,89	6,92	3,00
	35,68	35,82	M	2,63	221,30	62,60	64,36	6,86	2,97
	35,82	35,96	M	2,63	203,30	62,82	61,72	6,77	2,91
	35,96	36,10	M	2,63	205,40	62,38	59,98	6,47	2,88
	36,10	36,24	M	2,63	189,80	63,46	58,25	6,72	2,82
	37,89	38,03	M	2,63	196,40	62,39	59,61	6,62	2,86
	38,12	38,26	M	2,62	109,98	60,45	58,34	6,54	2,84
Sond.F	28,17	28,31	R	2,55	262,90	53,24	55,53	5,74	2,85
	28,31	28,45	R	2,55	296,70	54,66	51,55	5,83	2,72
	28,45	28,59	R	2,56	283,60	57,26	52,59	5,96	2,74
	28,59	28,73	R	2,56	351,30	56,21	52,80	5,92	2,75
	28,73	28,87	R	2,55	325,20	52,87	55,39	5,80	2,85
	29,04	29,18	R	2,54	325,50	51,23	53,34	5,75	2,79
	29,86	30,00	R	2,57	284,10	57,27	56,00	6,23	2,82
	12,00	12,14	V	2,68	28,44	45,76	61,07	6,49	2,88
Sond.G	12,20	12,34	V	2,68	61,70	54,86	60,79	6,30	2,88
	12,46	12,60	V	2,61	0,00	0,00	71,42	6,22	3,23
	12,60	12,74	V	2,67	103,66	63,19	90,77	7,85	3,52
	13,90	14,04	V	2,67	84,74	54,24	88,35	6,58	3,58
	14,04	14,18	V	2,67	77,57	66,59	86,83	6,58	3,54
	14,18	14,32	V	2,66	66,17	59,93	90,04	6,73	3,61
	31,03	31,17	R	2,60	85,06	61,82	59,80	6,51	2,89
Sond.H	31,90	32,04	R	2,59	75,36	56,10	64,61	6,87	3,00
	32,09	32,23	R	2,59	111,70	57,14	62,55	6,79	2,95
	33,02	33,16	R	2,62	54,14	60,57	64,61	6,64	3,00
	33,18	33,32	R	2,61	99,26	63,90	62,12	6,51	2,94
	33,41	33,55	R	2,61	287,90	65,83	60,02	6,64	2,88
	33,61	33,75	R	2,62	251,60	68,17	63,22	6,86	2,95

L.: Litologia; M: Microgranito; R: Riólito; V: Vulcânicas ácidas piroclásticas (ignimbritos, tufos e brechas); RCU: Resistência a Compressão Uniaxial e ρ : densidade.

Tabela 3 Equações de relações empíricas entre RCU e E_s , com dados dinâmicos (V_p e E_d).

Litologia	Equação	Referência
Calcário	$RCU = 2,45V_p^{1,82}$	Militzer e Stoll (1973)
Calcário	$\log RCU = 0,358V_p + 0,283$	Golubev e Robinovich (1976)
Ígneas, Metamórficas e Sedimentares	$E_s = aE_d^b$	Van Heerden (1978)
Ígneas e Metamórficas	$E_s = 1,263E_d - 29,5$	King (1983)
Ígneas, Metamórficas e Sedimentares	$\log E_s = A_0 + A_1 \log E_d$	Savich (1984)
Rochas brandas	$RCU = 2,28 + 4,0189E_s$	Bradford <i>et al.</i> (1988)
Ígneas e Metamórficas	$E_s = 0,48E_d - 3,26$	Starzec (1999)
Xisto	$E_s = 0,076V_p^{3,23}$	Horsrud (2001)
Calcário	$E_s = 0,169V_p^{3,324}$, $R^2=0,90$	Najib <i>et al.</i> (2005)
Calcário	$RCU = 11,05E_s^{0,66}$, $R^2=0,79$	Najib <i>et al.</i> (2005)
Ígneas, Metamórficas e Sedimentares	$RCU = 2,304V_p^{2,4315}$	Kiliç e Teymen (2008)

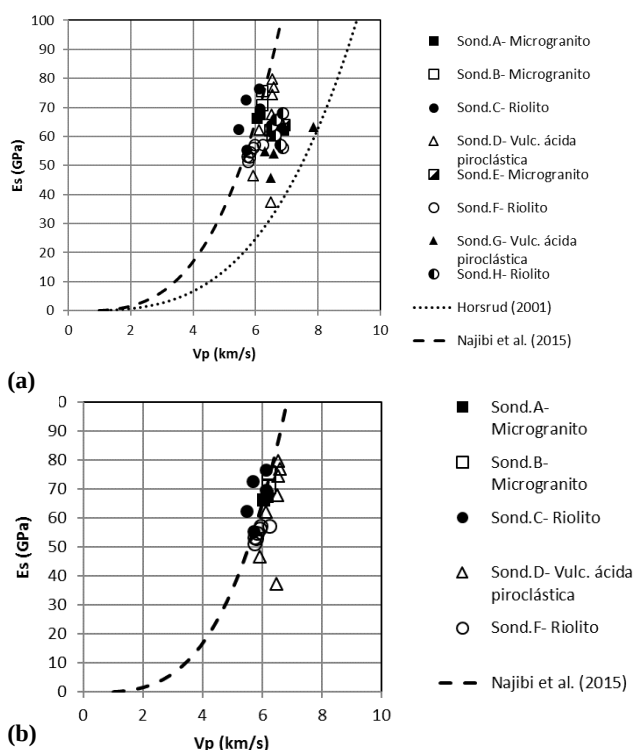


Figura 3. Dados de V_p x E_s e relações empíricas (a) todas as amostras; (b) alguns dados e o ajuste de Najibi (2015).

Um comportamento similar é encontrado quando comparados os dados de RCU x E_s com os ajustes de Najibi *et al.* (2015) e Bradford *et al.* (1988), conforme apresentados na Figura 5. Nela observa-se dispersão muito alta e sem correlação entre eles.

Os dados de RCU x V_p se dividem quando analisados em conjunto com as relações de Golubev e Robinovich (1976) e Militzer e Stoll (1973) (Figura 6a).

Novamente, separando-os por litologias, observa-se que existe relação entre as rochas riolíticas e micrograníticas com a equação de Golubev e Robinovich, enquanto as piroclásticas

estão mais próximas da proposta de Militzer e Stoll separadamente como mostra a Figura 6b e 6c.

Ao mesmo tempo alguns dados de Riolito e Microgranito não se aproximam de nenhuma relação.

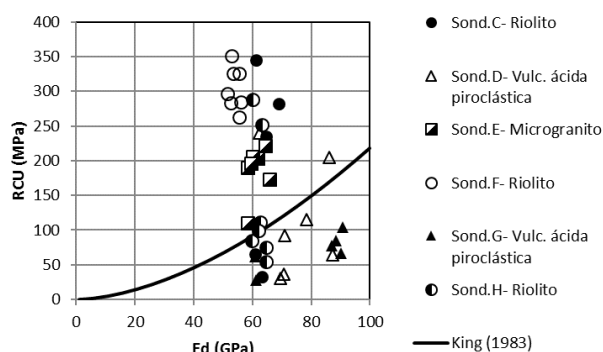


Figura 4. Dados de RCU x E_d relação empírica King (1983).

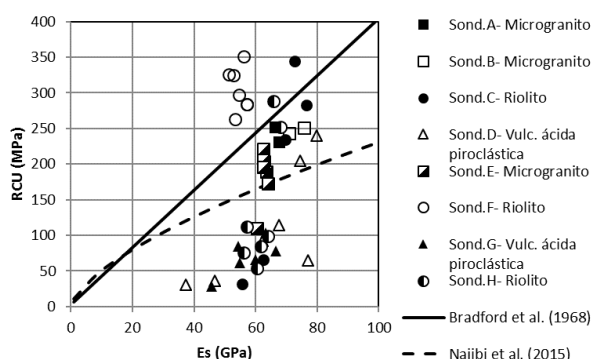


Figura 5. Dados de RCU x E_s e relações empíricas de Najibi (2015) e Bradford *et al.* (1968).

Como discussão final para as amostras ensaiadas com diferentes litologias, não foi possível encontrar uma relação direta entre os parâmetros de deformação estático e dinâmico (E_s x E_d), quando comparados os parâmetros

dinâmicos (V_p) com o parâmetro de deformação estático (E_s), mas foi possível encontrar uma relação maior com Najibi *et al.* (2015), aplicada à rochas calcárias.

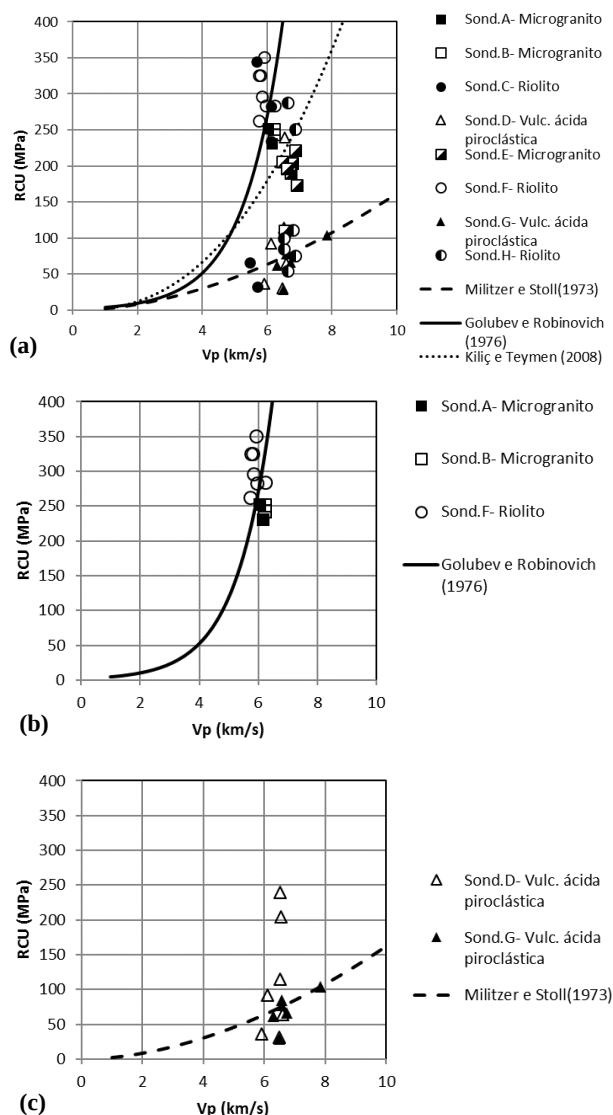


Figura 6. Dados de RCU x V_p e relações empíricas (a) todas os dados; (b) alguns dados com Golubev e Robinovich (1976); (c) alguns dados com Militzer and Stoll (1973)

Todas as outras relações que comparam um parâmetro de resistência (RCU) com outro de deformabilidade dinâmica ou estática (V_p , E_s , ou E_p) não encontrou-se uma correlação única entre eles e em alguns casos os valores ficaram muito dispersos.

Após estes resultados outros parâmetros tem que ser levados em conta para encontrar relações mais adequadas para cada material, estes parâmetros podem ser a porosidade, grau

de cimentação dos minerais, tamanho e forma dos minerais, RQD e entre outros.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Estudos das propriedades mecânicas das rochas podem ser considerados como componente técnico de grande relevância para projetos de engenharia que envolvem escavações e fundações em rocha.

A realização de ensaios mecânicos (estáticos) em conjunto com ensaios dinâmicos (não destrutivos) e sua correlação com equações empíricas podem fornecer um panorama das propriedades físico-mecânicas ao longo de um maciço rochoso, caso a amostragem seja representativa.

Para as amostras ensaiadas com litologias variadas não foi possível encontrar relações adequadas entre os parâmetros estáticos e dinâmicos, principalmente quando são comparados parâmetros de resistência com parâmetros de deformabilidade, mesmo assim, algumas relações mostraram ser adequadas quando os dados foram separados por litologias diferentes.

Outra questão relevante foi o uso de equações empíricas obtidas por meio de rochas que não são semelhantes às rochas ensaiadas, bem como o número limitado de correlações somente para rochas ígneas. Pois, a grande maioria dessas relações de propriedades mecânicas, encontradas na bibliografia, foram determinadas a partir de rochas sedimentares de regiões associadas à estudos de estabilidade de poços de petróleo.

Por isso, ainda não foi possível desenvolver uma metodologia de ensaios (estático e dinâmico) para subsidiar formulações empíricas relevantes que pudessem servir como proposta de baixo custo e maior representatividade dos parâmetros físico-mecânicos ao longo de um maciço rochoso para obras civis.

Contudo, outros parâmetros precisam ser estudados para melhorar estas relações como a porosidade, grau de cimentação dos minerais, tamanho e forma dos minerais, RQD e entre outros.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos o apoio do laboratório de Mecânica das Rochas da Gerência de Pesquisa, Serviços e Inovação Tecnológica/GST.E de FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S.A., a Universidade Federal de Goiás –UFG e os profissionais que participaram da preparação e ensaios das amostras.

REFERÊNCIAS

- American Society of Testing and Materials (ASTM) (2002). Standard Test Method of Unconfined Compressive Strength of Intact Rock Core Specimens. ASTM International, West Conshohocken, PA, D2938.
- ASTM (2002a) Standard Test Method for Elastic Moduli of Intact Rock Core Specimens in Uniaxial Compression, D3148.
- ASTM (2008) Standard Test Method for Laboratory Determination of Pulse Velocities and Ultrasonic Elastic Constants of Rock, D2845.
- Baykasoğlu A., Güllü H., Çanakçı, H., Özbakır, L. (2008) Predicting of compressive and tensile strength of limestone via genetic programming. *Expert Syst Appl* 35, p. 111–112.
- Bradford, I. D. R., Fuller, J., Thompson, P. J., Walsgrove, T. R. (1988) Benefits of Assessing the Solids Production Risk in a North Sea Reservoir Using Elastoplastic Modeling. *SPE Paper* 47360.
- Chang, C., Zoback, M.D., Khaksar, A. (2006) Empirical Relations Between Rock Strength and Physical Properties in Sedimentary Rocks. *Journal of Petroleum Science and Engineering* Vol. 51 (3), p. 223–237.
- Cheng, C.H., Johnston, D. H., (1981) Dynamic and static moduli. *Geophys. Res. Lett.* 8 (1), p. 39–42.
- Cossolino, L.C., Pereira, A.H.A. (2010) Módulos Elásticos: Visão Geral e Métodos de Caracterização, Informativo Técnico-Científico nº. RT03-ATCP, ITC-ME/ATCP.
- Gill, R. (2014) Rochas e Processos Ígneos: um Guia Prático, Porto Alegre, Bookman, p. 161–207.
- Golubev, A.A., Robinovich, G.Y. (1976) Resultaty primeneniya apparatury akusticheskogo karotaza dlja predeleina prochnostykh svoystv gornykh porod na mestorozhdeniakh tverdykh islopaemykh. *Prikl Geofiz Moskva* Vol. 73, p.109–116.
- Horsrud, P. (2001) Estimating mechanical properties of shale from empirical correlations. *SPE Drill.Comple.* Vol.16(02), p. 68–73.
- International Society for Rock Mechanics (ISRM) (1979) Suggested Methods for Determining the Uniaxial Compressive Strength and Deformability of Rock Materials, *International Journal of Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, Vol. 16, p.135–140.
- ISRM (2014) Upgraded ISRM Suggested Method for Determining Sound Velocity by Ultrasonic Pulse Transmission Technique, *The ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 2007–2014*, p. 95–99.
- Kiliç, A., Teymen, A. (2008) Determination of mechanical properties of rocks using simple methods. *Bulletin of Engineering Geology and Environment* Vol. 67(2): p. 237–244.
- King, M.S. (1983) Static and dynamic elastic properties of rock from the Canadian Shield. *Int.J.RockMech.Min.Sci.Geomech. Abstr.* Vol. 20(5), p. 237–241.
- Kurtulus, C. Sertçelik, F., Sertçelik, I. (2015) Correlation physico-mechanical properties of intact rocks with P-wave velocity, *Acta Geo Geophys.*
- Mavko, G., Mukerji, T., Dvorkin, J. (2009) The Rock Physics Handbook: Tools for Seismic Analysis in Porous Media, 2nd ed.. Cambridge University Press.
- Militzer, H., Stoll, R. (1973) Einige Beiträge der Geophysik zur primätdatenerfassung im Bergbau: Neue Bergbautechnik, Leipzig 3, p. 21–25.
- Najibi A.R., Ghafoori M., Lashkaripour G.R., Asef M.R. (2015) Empirical relations between strength and static and dynamic elastic properties of Asmari and Sarvak limestones, two main oil reservoirs in Iran, *Journal of Petroleum Science and Engineering* nº. 126, p. 78–82.
- Savich, A.I. (1984) Generalized relations between static and dynamic in dices of rock deformability, *Power Technol.Eng* 18 (8), p. 394–400.
- Schön, J. H. (2015) Propriedades Físicas das Rochas aplicadas à Engenharia de Petróleo: Fundamentos Teóricos e Práticos, 1ª ed., Rio de Janeiro: Elsevier, p. 243–269.
- Starzec, P. (1999) Dynamic Elastic Properties of Crystalline Rocks From South-West Sweden, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol 36(2): p. 265–272.
- Van Heerden, W.L. (1978) General relations between static and dynamic moduli of rocks, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.* Vol. 24(6), p. 381–385.