

CORRELAÇÕES ENTRE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO UNIAXIAL E VELOCIDADE DE ONDAS PARA ALGUNS ANFIBOLITOS E XISTOS DO ESTADO DE MINAS GERAIS, BRASIL

Klinger Senra Rezende ¹; Eduardo Antonio Gomes Marques ²; Ana Carolina Dias Baêso ³

Resumo – O presente trabalho buscou realizar correlações de ensaios de laboratório em anfibolitos e um xisto encontrados na Província Pegmatítica de São João Del Rei, região Sul de Minas Gerais. Os litotipos foram classificados segundo presença ou não de foliações, veios de quartzo e grau de alteração. Desta forma, trabalhou-se com as seguintes classificações: Anfibolito W1, Anfibolito quartzoso W1, Anfibolito foliado W1, Anfibolito W1/2 e Xisto Grafitoso W1, em que W1 e W1/2 são as classes de alteração sã e sã/levemente alterada, respectivamente, segundo classificação da ISRM (2007), não chegando a ser classificada como W2. Os ensaios realizados para fins de correlação foram os ensaios de resistência à compressão uniaxial e velocidade de propagação de ondas ou velocidade sônica, sendo o primeiro, um ensaio destrutivo e o segundo, não destrutivo. 50 amostras foram ensaiadas, possibilitando alcançar bons resultados ao se correlacionar valores médios de resistência à compressão uniaxial (σ_c) e valores de velocidade de ondas (V_p) de todos os litotipos em estudo, na forma da equação linear $\sigma_c = 0,1843V_p - 896,3$ e um coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,78. Em busca de uma melhor correlação, excluiu-se da análise o litotipo mais alterado, Anfibolito W1/2, correlacionando-se, assim, apenas os litotipos de grau de alteração W1, obtendo-se a seguinte equação linear: $\sigma_c = 0,1875V_p - 907,2$, apresentando R^2 igual a 0,90.

Abstract – The present work aimed to obtain statistic correlations for some laboratory tests performed on amphibolites and schists from São João Del Rei Pegmatitic Province, located at Minas Gerais State, Southeast Brazil. Rocks under study were separated accordingly to the following aspects: presence of foliation and quartz veins and weathering grade. Based on this, the rocks were classified as: Amphibolite W1, Quartz-rich amphibolite W1, Foliated amphibolite W1, amphibolite W1/W2 and Graphite-rich schist W1. The laboratory tests performed for correlation were uniaxial compressive strength and wave velocity propagation. For this, fifty rock samples were tested. Good statistic correlations were obtained when comparing average results for each property for all rock types under study, in the form of a linear equation ($\sigma_c = 0.1843V_p - 896.3$) with a determination coefficient (R^2) equal to 0.78. In an attempt to obtain better correlations, the more weathered rock type (amphibolite W1/W2) was excluded, so resulting in a linear equation ($\sigma_c = 0.1875V_p - 907.2$) with a R^2 equal to 0.90.

Palavras-Chave – Correlações geomecânicas, velocidade de propagação de ondas, velocidade de ondas, velocidade sônica, resistência à compressão uniaxial.

¹ Eng., MSc, Universidade Federal de Viçosa, (31) 9 8628-2202, klinger15@hotmail.com

² Geól., D.Sc, Universidade Federal de Viçosa, (31) 9 98990-2812, emarques@ufv.br

³ Graduando em Engenharia Civil, Univiçosa, (32) 9 98406-6097, anacarolinabaesso@gmail.com

1. INTRODUÇÃO

Muitas empresas do ramo geotécnico têm buscado formas de obtenção de parâmetros de projeto que permitam uma redução de custos e uma maior facilidade de aquisição. Neste contexto, vários têm sido os estudos que buscam obter estes dados através de ensaios de laboratório mais simples de se executar ou até mesmo realizados *in situ*. Como exemplo, pode-se citar Chen et. al (2015), Altindag (2012), Singh e Dubey (2000), entre outros.

Neste trabalho, realizaram-se ensaios (destrutivos) de resistência à compressão uniaxial e ensaios (não destrutivos) de determinação da velocidade de propagação de ondas, em rochas de uma mina em São João Del Rei, no Sul de Minas Gerais, na região conhecida como Província Pegmatítica de São João Del Rei, apresentada no mapa geológico da Figura 1.

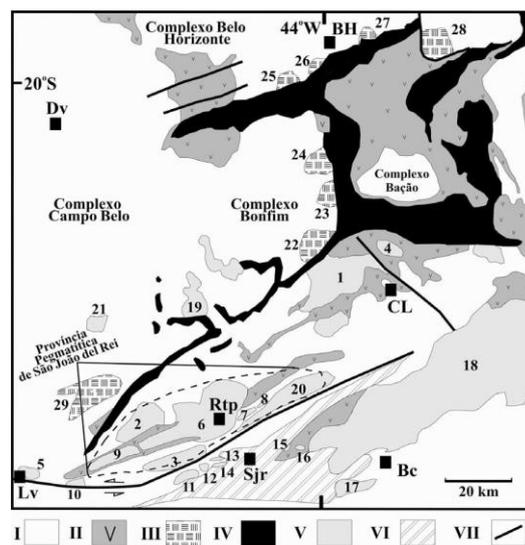


Figura 1. Mapa geológico esquemático da borda meridional do Cráton São Francisco com a localização aproximada da Província Pegmatítica de São João Del Rei. Algarismos romanos representando as rochas e algarismos arábicos representando os minerais presentes na região. Detalhes da legenda em JAQUES (2014).

Os litotipos estudados foram anfibolitos e um xisto grafitoso, sendo os anfibolitos classificados em função de presença ou não de foliação, veios de quartzo e grau de intemperismo classificados segundo a ISRM (2007), que os avalia como apresentado abaixo:

- W1 – Rocha sã: sem quaisquer sinais de alteração;
- W2 – Rocha pouco alterada: sinais de alteração apenas nas imediações das discontinuidades;
- W3 – Rocha medianamente alterada: alteração visível em todo o maciço rochoso mas a rocha não é friável;
- W4 – Rocha muito alterada: alteração visível em todo o maciço e a rocha é parcialmente friável;
- W5 – Decomposto (saibro): o maciço apresenta-se completamente friável com comportamento de solo.

Assim, os litotipos foram classificados quase que totalmente como classe de alteração W1, havendo apenas um litotipo de anfibolito classificado como W1/2, por não se encontrar são como os demais e não tão alterado a ponto de ser classificado como W2. Logo, dividiram-se os litotipos em: anfibolito W1, anfibolito quartzoso W1, anfibolito foliado W1, anfibolito W1/2 e xisto grafitoso W1.

2. ENSAIOS REALIZADOS PARA FINS DE CORRELAÇÃO

2.1. Ensaio de resistência à compressão uniaxial

O ensaio de compressão uniaxial, no qual corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de rochas são comprimidos paralelamente a seu eixo longitudinal, é o ensaio mais antigo e utilizado em rochas, e continua sendo o mais conveniente e usual método para determinar as propriedades de resistência da rocha (JAEGER & COOK, 1979).

Segundo Azevedo & Marques (2006), a preparação da amostra cilíndrica pode ser difícil e onerosa. A relação entre altura e diâmetro (H/D) deve variar, segundo determinação da ISRM (2007), entre 2,5 e 3,0. Já a ASTM D 4543 (2008) recomenda uma relação H/D entre 2,0 e 2,5, enquanto o Eurocode 7 (2007) permite o uso de H/D entre 2,0 e 3,0.

Marques e Paes (2013) e Marques et al. (2015), após ensaiarem amostras de alguns tipos de granitos e xistos uniaxialmente, observaram discrepâncias pouco acentuadas entre as relações H/D da ISRM (2007) e ASTM D 4543 (2008).

2.2. Ensaio de velocidade de ondas

Vibrações nas rochas se propagam, principalmente, por meio de ondas longitudinais e transversais. Teoricamente, a velocidade com que uma onda se propaga através da rocha depende exclusivamente de suas propriedades elásticas, módulo de elasticidade (E) e coeficiente de Poisson (ν), e de sua massa específica, γ . Na prática, o que se tem observado é que o grau de fissuração e de alteração da rocha interfere nessas medidas (a velocidade de propagação diminui com a presença de fissuras). Desse modo, a velocidade de propagação da onda pode ser usada como índice para avaliar o grau de fissuramento e de intemperismo da rocha (GOODMAN, 1989).

Segundo Azevedo & Marques (2006), este índice é muito usado para determinar zonas de fraturamento e, ou, alteração em escavações a céu aberto ou subterrâneas. Assim, a velocidade de propagação de onda em uma amostra de rocha pode ser obtida da seguinte maneira: um cristal piezoelétrico (quartzo ou turmalina), emissor de ondas longitudinais, é adaptado a uma extremidade do corpo de prova cilíndrico. Na face oposta, é adaptado o cristal piezoelétrico receptor de vibrações. O tempo gasto para o percurso é determinado pela diferença de fase em um osciloscópio. A velocidade de propagação longitudinal (V_l) é calculada por:

$$V_l = \frac{L}{t} \quad (1)$$

Em que:

L – comprimento do corpo-de-prova; t – tempo de percurso da onda (medido).

Na Tabela 1, são apresentados alguns valores típicos de velocidade de onda longitudinal de rochas.

Tabela 1: Velocidade de onda longitudinal de algumas rochas.

Rocha	v_l (m/s)
Arenito e quartzito	6000
Basalto	6500 – 7000
Calcário	6000 – 6500
Dolomito	6500 – 7000
Gabro	7000
Kinzigito	5300 - 5900
Rochas graníticas	5500 - 6000

Fonte: Azevedo e Marques (2006).

2.3. Correlações entre resistência à compressão uniaxial e velocidade de ondas

Datam da década de 1970 os primeiros trabalhos de correlação entre resistência à compressão uniaxial e velocidade de ondas. Ainda hoje, vem sendo realizados estudos em várias partes do mundo. A título de exemplo, Azimian, Ajalloeian e Fatehi (2014), ao ensaiar 40 amostras de rochas carbonatadas do sudeste de Shirz, no Irã, conseguiram boas correlações, na forma da equação linear $\sigma_c = 0,026 V_p - 20,207$, com R^2 igual a 0,909, na forma da equação exponencial $\sigma_c = 8,51e0,0006V_p$, com R^2 igual a 0,850, apresentando ainda uma série de correlações propostas por estudiosos destas correlações desde 1972, como apresentado na Tabela 2.

Tabela 2: Equações correlacionando σ_c e V_p .

Referências	Relação empírica
Freyburg (1972)	$\sigma_c = 35,00 V_p - 31,5$
Militzer e Stoll (1973)	$\sigma_c = 2,45 V_p^{1,92}$
Golubev e Rabinovich (1976)	$\log \sigma_c = 0,358 V_p - 0,283$
McNally (1987)	$\sigma_c = 1277e^{-117/V_p}$
Goktan (1988)	$\sigma_c = 36,00 V_p - 31,2$
Turgrul e Zarif (1999)	$\sigma_c = 35,54 V_p - 55$
Kahraman (2001)	$\sigma_c = 9,95 V_p^{1,21}$
Yasar e Erdogan (2004)	$\sigma_c = 31,5 V_p - 63,7$
Sousa et al (2005)	$\sigma_c = 22,032 V_p^{1,247}$
Kiliç e Teymen (2008)	$\sigma_c = 2,304 V_p^{2,4315}$
Sharma e Singh (2008)	$\sigma_c = 64,20 V_p - 117,99$
Cobanglu e Celik (2008)	$\sigma_c = 56,71 V_p - 192,93$
Diamantis et al (2011)	$\sigma_c = 0,14 V_p - 899,33$
Kurtulus et al (2011)	$\sigma_c = 0,0675 V_p - 245,13$
Yagiz (2011)	$\sigma_c = 49,40 V_p - 167$
Sarkar et al (2012)	$\sigma_c = 0,038 V_p - 50$
Altindag (2012)	$\sigma_c = 0,258 V_p^{1,194}$
Khandelwal (2013)	$\sigma_c = 0,033 V_p - 34,83$

Fonte: AZIMIAN, AJALLOEIAN E FATEHI (2014).

Chen et. al (2015), ao estudar 165 amostras de basalto nos Estados Unidos, obtiveram uma equação linear na forma $\sigma_c = 0,0338 V_p - 86,477$ e R^2 igual a 0,7937. Já Altindag (2012), ao ensaiar 97 amostras de rochas sedimentares na Turquia, alcançou uma equação polinomial $\sigma_c = 12,743 V_p^{1,94}$, com R^2 igual a 0,7600, apresentando também outra série de correlações datadas desde 1988 em diante, como na Tabela 3.

Tabela 3: Algumas correlações empíricas entre σ_c e V_p encontradas na literatura técnica.

Equação	Unidade	Litotipo	Referências
$\sigma_c = 0,0642 V_p - 117,99$	V_p : m/s	Arenitos, micaxistos, basalto	Cheng e Hu (2003)
$\sigma_c = 35,54 V_p - 55$	-	Rochas graníticas	Tugrul e Zarif (1999)
$\sigma_c = 56,71 V_p - 192,93$	-	Arenito, calcário	Çobanoğlu e Çelik (2008)
$\sigma_c = 9,95 V_p^{1,21}$	V_p : km/s	Marga, calcário, dolomita, arenito, hematita, diabásio, turfa	Christaras et al (1997)
$V_p = 0,00317 \sigma_c + 2,0195$	-	-	Yasar e Erdogan (2004)
$\sigma_c = 0,78 e^{0,88V_p}$	V_p : km/s	Grupo vulcânico	Entwisle et al (2005)
$\sigma_c = 0,0407 V_p - 36,31$	σ_c : N/mm ²	-	Vasconcelos et al (2008)
$\sigma_c = 0,004 V_p^{1,247}$	V_p : m/s	Granitos	Sousa et al (2005)
$\sigma_c = 0,036 V_p - 31,18$	V_p : m/s	-	Goktan (1988)

Fonte: Adaptado de ALTINDAG (2012).

3. METODOLOGIA

Todos os ensaios foram realizados utilizando-se das metodologias sugeridas pela International Society for Rock Mechanics (ISRM, 2007). Para a execução do estudo, dois litotipos foram selecionados: anfibolito e xisto grafitoso, nos diferentes graus de alteração W1 e W1/2, totalizando 50 amostras. Durante a coleta de testemunhos de sondagem em campo, através de observação de considerável teor de quartzo em determinadas porções nos testemunhos de anfibolito, descreveram-se estas como anfibolito quartzoso (QTZ) em grau de alteração W1 em dois lotes em que, a princípio, a única diferença entre os lotes era a cor. De forma análoga, observando a presença de porções de anfibolito com foliação bem desenvolvida, descreveram-se estas como anfibolito foliado (ANF Sn) em grau de alteração W1. Estas mesmas subdivisões em anfibolito foram realizadas por Jaques (2014), realizando trabalhos de caracterização e classificação geomecânica de maciços rochosos da mesma mina em estudo.

Após coleta de material em campo, os testemunhos foram levados ao Laboratório de Mecânica das Rochas da Universidade Federal de Viçosa, onde foram preparados para a realização dos ensaios citados.

3.1. Ensaio de compressão uniaxial

Os ensaios de compressão uniaxial foram realizados em uma máquina universal de ensaios. Centralizados nos pratos de carregamento da máquina, os 50 corpos de prova ensaiados eram cercados por uma grade de metal para se impedir que fragmentos de rocha pudessem ser projetados, podendo causar acidentes (Figura 3).

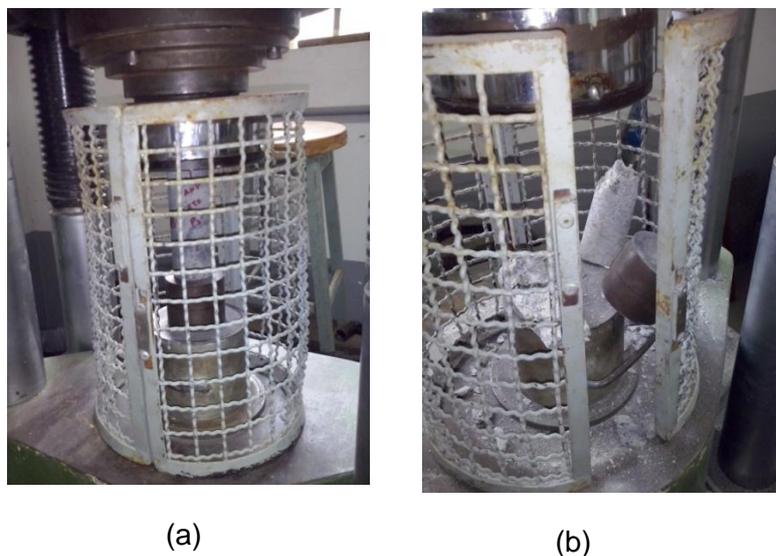


Figura 3. Condição de ensaio (a) Antes da ruptura. (b) Após a ruptura.

De acordo com a ISRM (2007), o carregamento da amostra deve ser realizado de forma contínua e a uma taxa constante até que a ruptura venha a ocorrer dentro de 5 a 10 minutos de carregamento. Alternativamente, a taxa de carregamento deve situar-se entre 0,5 a 1,0 MPa/s. O máximo carregamento em uma amostra deve ser gravado e anotado em Newtons (ou Kilonewtons e Meganewtons, quando necessário).

3.2. Ensaio de velocidade de propagação de ondas

Por serem não destrutivos, os ensaios de velocidade de propagação de ondas foram realizados sobre as mesmas amostras em que se realizaram, posteriormente, os ensaios de resistência à compressão uniaxial, utilizando o equipamento de teste ultrassônico Pundit Lab, da Proceq.

Através de dois transdutores (um transmissor e um receptor de ondas) de frequência 500 kHz, acoplava-se as amostras entre os mesmos, utilizando-se entre eles uma fina camada de vaselina, para que se garantisse um perfeito contato entre as superfícies (Figura 4). A velocidade de propagação de ondas (V_p) era calculada por meio de tempo necessário para que a onda sonora se propagasse de um transdutor a outro.



Figura 4. Esquema de ensaio de velocidade de propagação de ondas.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Propriedades-índice

Para melhor caracterizar os litotipos em estudo, determinaram-se, em laboratório, as propriedades-índices dos mesmos, como apresentado na Tabela 4.

Tabela 4: Propriedades-índice dos litotipos em estudo.

Litotipo	Grau de alteração	Massa específica aparente (kg/m^3)		Porosidade aparente (%)	Capacidade de Absorção Aparente (%)
		Seca	Saturada		
ANF	W1	3061	3067	0,56	0,18
QTZ Lote 1	W1	2492	2498	0,65	0,26
QTZ Lote 2	W1	2446	2451	0,50	0,20
ANF	W1/2	2722	2726	0,36	0,13
ANF Sn	W1	2860	2862	0,21	0,07
XG	W1	3058	3063	0,44	0,14

Nota: ANF – anfíbolito, QTZ - anfíbolito quartzoso, ANF Sn – anfíbolito foliado, XG – xisto grafitoso.

4.2. Ensaio de compressão uniaxial

Os resultados de ensaio de compressão uniaxial são apresentados na Tabela 5. Com uma maior resistência à compressão uniaxial, encontra-se o anfíbolito W1, seguido pelo anfíbolito

quartzoso W1, xisto grafitoso W1, anfibolito W1/2 e, finalmente, anfibolito foliado W1. A maior parte das rupturas ocorreu ao longo da foliação ou interfaces anfibólio/quartzo, apresentando rompimentos em forma de fendilhamento, como no anfibolito W1 e cisalhamento, como no anfibolito foliado, ocorrendo, neste último, ruptura paralela à foliação (Figura 5).

Tabela 5: Resultados dos ensaios de compressão uniaxial

Litotipo	Grau de alteração	σ_c (MPa)	Desvio padrão (MPa)
ANF	W1	222,53	44,91
QTZ Lote 1	W1	196,12	29,64
QTZ Lote 2	W1	123,68	37,42
ANF Sn	W1	94,50	17,22
XG	W1	115,47	38,44
ANF	W1/2	113,27	40,63

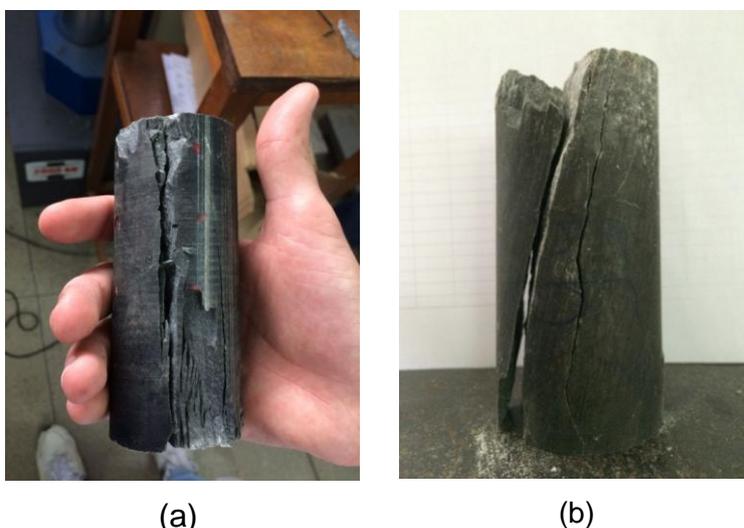


Figura 5. (a) Ruptura por fendilhamento da amostra. (b) Ruptura por cisalhamento.

4.3. Ensaio de velocidade de propagação de ondas

Os resultados dos ensaios de velocidade de propagação de ondas são apresentados na Tabela 6. Analisando-se os maiores e menores valores, o Anfibolito W1 apresentou o maior resultado de velocidade do som, enquanto o Anfibolito foliado W1 apresentou o menor. Nota-se que esta mesma relação foi obtida para o ensaio de resistência à compressão uniaxial.

Tabela 6: Resultados do ensaio de velocidade de propagação de ondas

Litotipo	Alteração	Vp (m/s)	Desvio - padrão (m/s)
ANF	W1	6.026,10	252,23
QTZ Lote 1	W1	5.781,36	261,18
QTZ Lote 2	W1	5.649,17	178,54
ANF Sn	W1	5.313,54	197,82
XG	W1	5.484,78	399,51
ANF	W1/2	5.677,32	234,58

4.4. Correlações entre resistência à compressão uniaxial e velocidade do som

Resultados pobres foram obtidos ao se correlacionar as duas propriedades individualmente, ou seja, por amostra, encontrando-se uma equação linear na forma $\sigma_c = 0,1181V_p - 538,4$ e R^2 igual a 0,20, como apresentado na Figura 7.

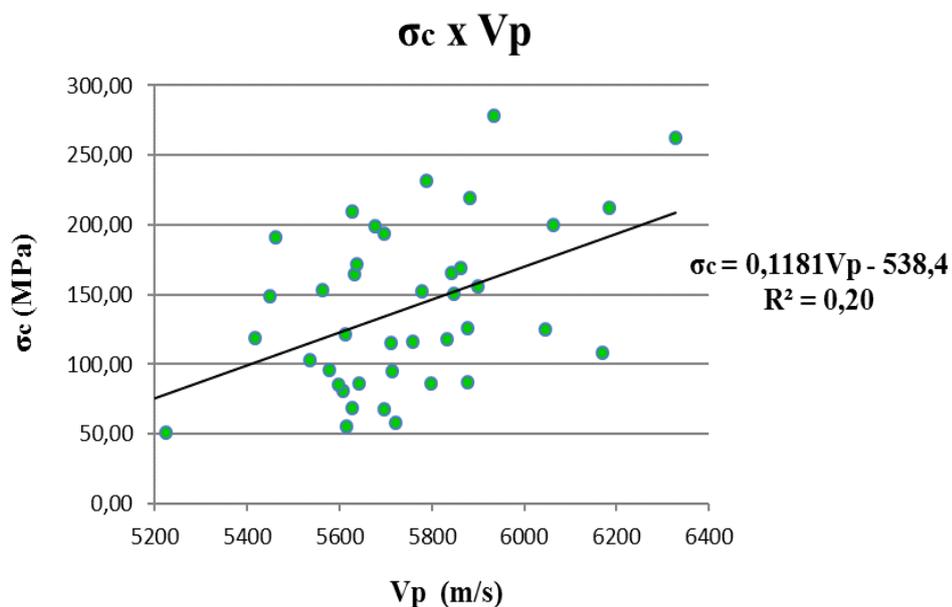


Figura 7. Plotagem de correlação de resultados individuais (por amostra).

Posteriormente, correlacionaram-se os valores médios de ambas as propriedades por litotipo, alcançando uma correlação com melhor coeficiente de determinação, na forma $\sigma_c = 0,1843V_p - 896,3$ e R^2 igual a 0,78, como pode se verificar na Figura 8.

Em seguida, uma melhor correlação foi alcançada, excluindo-se da análise o litotipo de diferente grau de alteração, Anfibolito W1/2, obtendo-se uma equação na forma $\sigma_c = 0,1875V_p - 907,2$ e R^2 igual a 0,90, como na Figura 9.

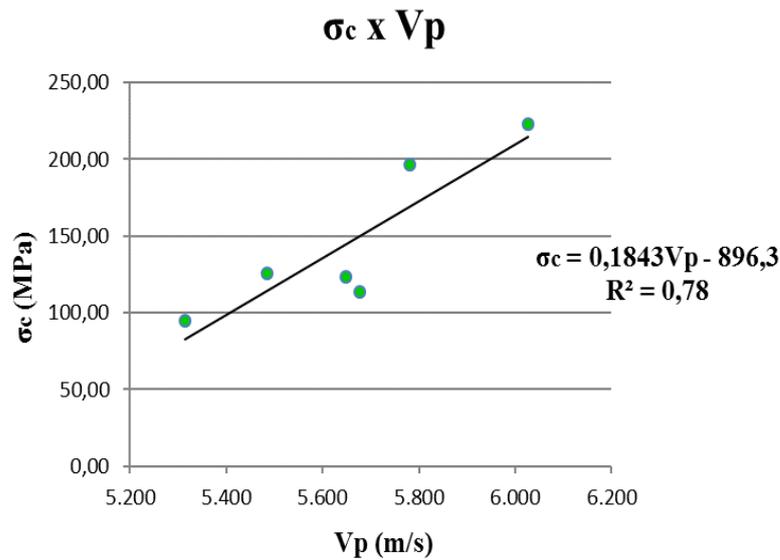


Figura 8. Resultado da correlação de valores médios para todos os litotipos estudados.

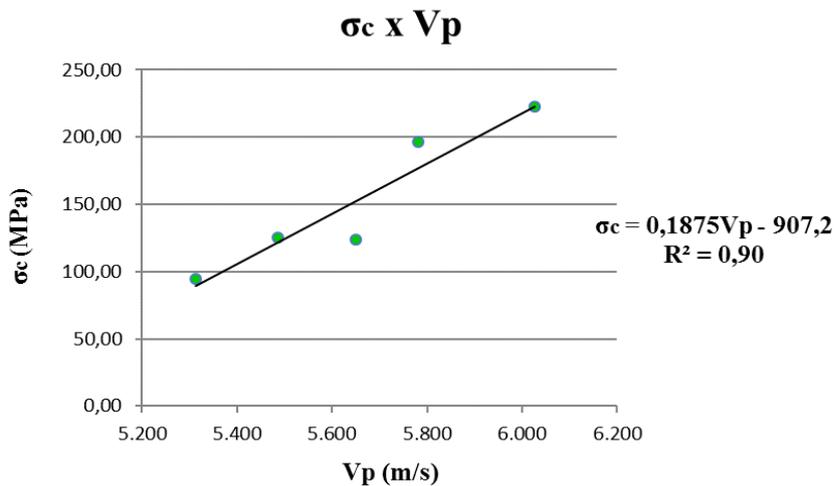


Figura 9. Correlação de valores médios, excluindo-se o Anfibolito W1/2.

As correlações de valores médios encontradas foram semelhantes à correlação encontrada por Diamantis et al. (2011) apresentada na Tabela 2, obtida ao estudar peridotitos da Grécia Central. Peridotitos são rochas ígneas plutônicas formadas essencialmente por olivinas, podendo conter outros minerais máficos, como o piroxênio, anfibólio, ou mica, e contendo pouco ou nenhum feldspato.

5. CONCLUSÕES

As principais conclusões do presente estudo foram:

- Os resultados dos ensaios de resistência à compressão uniaxial e velocidade de propagação de ondas proporcionaram a obtenção de boas correlações entre os valores médios destas propriedades por litotipo em estudo. Já para correlações entre valores individuais, ou seja, por amostra, obteve-se uma correlação baixa ou pobre, enfatizando-se aqui a necessidade de se

trabalhar com valores médios em Mecânica das Rochas, assim como as próprias normas de padronização de ensaio sugerem.

• As correlações de valores médios encontradas foram semelhantes às correlações encontradas na literatura, apresentada na Tabela 2, para rochas semelhantes. Este fato reforça e contribui para a necessidade de estudos específicos, por litotipo, para determinação de correlações entre valores ou intervalos de valores que possam ser utilizados para fins de correlação entre ensaios mais simples, como o de velocidade de propagação de ondas e ensaios mais complexos, como o de resistência à compressão uniaxial.

REFERÊNCIAS

ALTINDAG, R., Correlation between P-wave velocity and some mechanical properties for sedimentary rocks, *The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 2012, p. 229 - 237.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, Padronização das simbologias usadas em perfis de sondagens e seções geológicas – 1ª tentativa, boletim 03, São Paulo, ABGE/IPT, 1976, 11p.

ASTM - American Society for Testing and Materials, D 4543 - Standard Practices for Preparing Rock Core as Cylindrical Test Specimens and Verifying Conformance to Dimensional and Shape Tolerances, 2008.

AZEVEDO, I.C.D.; MARQUES, E.A.G. Introdução à Mecânica das Rochas. Caderno Didático. Ed. UFV, Viçosa, 2006. 361P.

AZIMIAN, A., AJALLOEIAN, R., FATEHI, L., An Empirical Correlation of Uniaxial Compressive Strength with P-wave Velocity and Point Load Strength Index on Marly Rocks Using Statistical Method, *Geotechnical Geological Engineering*, 2014, 32: 205-214p.

CHEN, X., SCHMITT, D. R., KESSLER, J. A., EVANS, J., KOFMAN, R., Empirical relations between ultrasonic P-wave velocity, porosity and uniaxial compressive strength, *Canadian Society of Exploration Geophysicists*, Vol. 40, nº 05, Maio de 2015, p. 24 – 29.

EUROCODE (2007), *Geotechnical Design – Part 2: Ground investigation and testing*. European Committee for Standardization, rue de Stassart, 36 B-1050 Brussels, Belgium. 198 p.

GOODMAN, R.E. *Introduction to rock mechanics*. 2ª Ed. New York: John Wiley & Sons, 1989. 562 p.

ISRM – International Society for Rock Mechanics. *The complete ISRM suggested methods for characterization, testing and monitoring: 1974-2006*. In: Ulusay, R. & Hudson, J.A. (eds.), *suggested methods prepared by the Commission on Testing Methods, ISRM*. Ankara, Turkey. 2007. 628 p.

JAEGER, J. C.; COOK, N. W. *Fundamentals of Rock Mechanics*. 3ª Ed. London, 1979. 593 p.

JAQUES, D. S., *Caracterização e classificação de maciços rochosos da mina de Volta Grande, Nazareno, Minas Gerais, Dissertação de Mestrado, UFV, 2014.*

MARQUES, A. A.; PAES, B. S. T.; MARQUES, E. A. G. PEREIRA, L. C. Correlations between uniaxial compressive strength and point load strength for some Brazilian high-grade metamorphic rocks. *Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental*. V. 4, No. 1, pg. 47-58, 2015.

MARQUES, A. A.; PAES, B. S. T. *Caracterização, Análise e Correlações entre Resistências de Rochas de Cavas a Céu Aberto. Trabalho Final de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2013.*

REZENDE, K.S., *Classificação Mecânica e Tentativas de Correlações de Propriedades Geotécnicas de Rochas da Mina de Volta Grande, Nazareno, MG. Trabalho Final de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2014.*

SINGH, T, N.; DUBEY, R. K., Study of Transmission Velocity of Primary Wave (P-wave) in Coal Measure Sandstone, Journal of Scientific & Industrial Research, Vol. 59, 2000, p. 482 – 486.