

Correlações Entre Resistência à Compressão Uniaxial e Dureza de Schmidt Para Alguns Anfibolitos e Xistos do Estado de Minas Gerais, Brasil

Klinger Senra Rezende

Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Brasil, klingers15@hotmail.com

Eduardo Antônio Gomes Marques

Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Brasil, eagmarques1965@gmail.com

André Lenke Lorenzoni

Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Brasil, andrelorenzoni5@gmail.com

André Teles Xavier

Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Brasil, teles_40@hotmail.com

Luana Cláudia Pereira

Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Brasil, luanac_pereira@hotmail.com

RESUMO: Este trabalho apresenta os resultados de correlação de resistência geomecânica através de ensaios destrutivos e não destrutivos para rochas extraídas da Província Pegmatítica de São João Del Rei, em Nazareno, Minas Gerais. Estudou-se a resistência de dois litotipos principais desta região, sendo eles anfibolitos e xisto grafitoso, nos graus de alteração W1 e W1/2. O anfibolito estudado apresentou variações como presença ou não de foliação e veios de quartzo em diferentes proporções. Os ensaios destrutivos realizados foram ensaios de resistência à compressão uniaxial, enquanto os ensaios não destrutivos compreenderam ensaios de dureza de Schmidt ou esclerometria. Ao se correlacionar os resultados médios dos dois ensaios envolvendo todos os litotipos em estudo, obtiveram-se equações com coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,50. Ao se excluir o litotipo anfibolito foliado, obteve-se um R^2 igual a 0,94. Acredita-se que esta diferença seja explicada pela presença de foliação no litotipo excluído, que pode ter induzido a erros nos valores de resistência à compressão uniaxial, através de rompimento de amostras ao longo das foliações. Este rompimento não foi verificado no ensaio de esclerometria, uma vez que os ensaios atingem uma pequena área.

PALAVRAS-CHAVE: dureza de Schmidt, resistência à compressão uniaxial, ensaios laboratoriais, rochas metamórficas

1 INTRODUÇÃO

Para um maior detalhamento em seus projetos, empresas do ramo da mineração e obras civis buscam conhecer a fundo sua matéria-prima de trabalho, seja ela solo ou rocha, buscando sempre conciliar segurança e economia. Um dos aspectos que compõem esse conhecimento é a

realização de ensaios de laboratório, que buscam caracterizar e classificar estes materiais para suas diversas finalidades nos projetos de engenharia.

Neste contexto, este trabalho busca a determinação da resistência geomecânica para alguns litotipos presentes na Província Pegmatítica de São João Del Rei, na região

rural de Nazareno, em Minas Gerais, além da determinação de correlações entre resultados de um ensaio destrutivo, o ensaio de resistência à compressão uniaxial, e um ensaio não destrutivo, o ensaio de dureza de Schmidt. Esta correlação tem como principal objetivo a contribuição para uma base de dados existente na literatura técnica, que possa ser utilizada em estimativas de resistência de rochas, através de métodos mais simples, rápidos e menos onerosos, como o ensaio de esclerometria ou dureza de Schmidt, uma vez que este ensaio pode ser executado *in situ*, não necessitando de retirada e deslocamento de material para laboratórios que possam se encontrar distantes do local de extração. Os litotipos estudados são basicamente anfíbolitos e xisto grafitoso, sendo aqueles constituídos por um material maciço ou apresentando foliação, além de veios de quartzo em diferentes proporções nas amostras a serem ensaiadas.

Muitos pesquisadores, como Shalabi, Cording e Al-Hattamleh (2007), Martins e Miranda (2010), Brandi, Barbosa e Guimarães (2015), entre outros, têm dedicado suas pesquisas aos estudos de correlação entre estes dois ensaios nos últimos anos, tanto para fins de caracterização geotécnica quanto para classificações geomecânicas em trabalhos de mineração. Segundo Ávila e Lana (2013), os resultados destas classificações, além da determinação de propriedades mecânicas de maciços rochosos, podem ser utilizados para sugerir uma série de procedimentos de engenharia, como a melhor direção de escavação e o tipo de suporte mais adequado na abertura de um túnel.

2 ENSAIOS REALIZADOS PARA FINS DE CORRELAÇÃO

2.1 Ensaio de resistência à carga pontual

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 simples em rochas, e continua sendo o mais conveniente e usual método para determinar

suas propriedades mecânicas (JAEGER & COOK, 1979).

Segundo Azevedo & Marques (2006), a preparação da amostra, cilíndrica, pode ser difícil e cara. 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 ensaiar amostras de alguns tipos de granitos e xistos uniaxialmente, observaram discrepâncias pouco acentuadas entre relações H/D da ISRM (2007) e ASTM D 4543 (2008).

2.2 Ensaio de dureza de Schmidt

O ensaio é executado de forma simples e rápida, através de esclerometria. O esclerômetro de Schmidt, também chamado Martelo de Schmidt, é utilizado internacionalmente em Mecânica das Rochas, sendo normatizado, entre outras, pela International Society for Rock Mechanics – ISRM (2007).

Este método é frequentemente utilizado na estimativa da resistência das paredes de descontinuidades, assim como para avaliar a trabalhabilidade e facilidade de escavação e perfuração por meios mecânicos. Contudo, deve-se mencionar que este método foi desenvolvido em 1948 por Ernst Schmidt para testar a dureza do concreto de uma forma não destrutiva e, só mais tarde é que foi aplicado para estimar a dureza das rochas (RAMOS, 2012).

O ensaio não requer grande preparo da superfície, porém é importante verificar se há presença de materiais soltos na superfície a ser ensaiada, o que pode acarretar uma baixa ou até nula determinação da resistência. O esclerômetro de Schmidt é um instrumento portátil para ensaios não-destrutivos que tem como base a aplicação de um impacto através de uma massa de aço na superfície a ser ensaiada (no caso, em rocha), a qual reage, sendo essa reação proporcional à sua dureza (FLEURY, OLKOWSKI & KUOKAWA, 2012).

2.3 Correlações entre resistência à compressão uniaxial e dureza de Schmidt

Vários têm sido os trabalhos de correlação entre resistência à compressão uniaxial e dureza de Schmidt, uma vez que esta última permite uma obtenção rápida e simples daquela.

Aydin e Basu (2005) reuniram uma série de proposições destas correlações para vários litotipos, como mostrado na Tabela 1.

Tabela 1 - Equações para correlação de dureza de Schmidt e σ_c encontradas por Aydin e Basu (2005)

Referências	Correlações propostas	Tipo de rocha
Kahraman (1996; In: Yilmaz e Sendir, 2002)	$\sigma_c = 0.00045(R_{N,p})^{2.45}$	10 litotipos diferentes
Gokceoglu (1996; In: Yilmaz e Sendir, 2002)	$\sigma_c = 0.0001.R^{3.27}$	Marga
Dearman e Irfan (1978)	$\sigma_c = 0.00016.R_L^{3.47}$	Granito
	$E = 1.89.R_L - 60.55$	Grau I a IV
Xu et al. (1990)	$\sigma = 2.98.e^{(0.06.R_L)}$	Micaxisto
	$E = 1.77.e^{(0.07.R_L)}$	
	$\sigma = 2.99.e^{(0.06.R_L)}$	Prasinito
	$E = 2.71.e^{(0.04.R_L)}$	
	$\sigma = 2.98.e^{(0.063.R_L)}$	Serpentinito
	$E = 2.57.e^{(0.03.R_L)}$	
	$\sigma_c = 3.78.e^{(0.05.R_L)}$	Gabro
	$E = 1.75.e^{(0.05.R_L)}$	
Deere e Miller (1966)	$\sigma_c = 1.26.e^{(0.52.R_L.p)}$	Lamito ou argilito
	$E = 0.07.e^{(0.31.R_L.p)}$	
	$\sigma = 9.97.e^{(0.02.R_L.p)}$	28 litotipos diferentes
Beverly et al. (1979; in Xu et al., 1990)	$E = 0.19.R_L.p^2 - 7.87$	
	$\sigma_c = 12.74.e^{(0.02.R_L.p)}$	20 litotipos diferentes
	$E = 0.19.R_L.p^2 - 12.71$	
Kahraman (2001)	$\sigma_c = 6.97.e^{(0.01.RN.p)}$	Carbonatos
Aydin e Basu (2005)	$\sigma_c = 1.45.e^{(0.07.R_L)}$	Granito

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, sendo este último assim classificado como uma classe pouco mais alterada que a classe W1, porém, não tão alterada para ser classificada como W2. Foram utilizadas 50 amostras para a realização dos ensaios de compressão uniaxial e dureza de Schmidt.

Durante a análise de testemunhos de sondagem em campo, através de observação de faixas com considerável teor de quartzo em determinadas porções nos testemunhos de anfibolito, descreveram-se estas zonas como anfibolito quartzoso 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 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, como apresentado na Figura 1.



Figura 1 – Preparação de amostras para realização de ensaios de dureza de Schmidt e resistência à compressão uniaxial.

3.1 Ensaio de compressão uniaxial

Os ensaios de compressão uniaxial foram realizados em uma máquina universal de ensaios apresentada na Figura 2. 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 2 - Aparelhagem para realização de ensaio de compressão uniaxial.

3.2 Ensaio de dureza de Schmidt

Devido a políticas de segurança da mineradora fornecedora das amostras para ensaio, não se poderia realizar os ensaios de dureza de Schmidt *in situ*. Por isso, os ensaios foram realizados em laboratório nas mesmas amostras em que se realizariam os ensaios de compressão uniaxial. Seguindo metodologia da ISRM (2007), os corpos de provas tiveram 20 pontos equidistantes marcados, para se realizar os rebotes do esclerômetro de Schmidt. O esclerômetro utilizado foi do tipo L, da Proceq, conhecido como Silver Schmidt (Figura 3).

Os corpos de prova eram centralizados em uma superfície plana através de um aparato que abraçava a amostra e os rebotes eram realizados sempre perpendicularmente à superfície dos corpos de prova e na vertical para baixo. O aparato, tal como as marcações nos corpos de prova são apresentados na Figura 4.

Nesta, pode-se ver uma amostra de xisto grafitoso fissurada por um rebote em um dos pontos demarcados em uma das extremidades. Isto ocorreu devido ao rebote ter sido realizado

sobre uma descontinuidade no corpo de prova, produzindo uma fissuração e tornando-o inválido para determinação da dureza de Schmidt.

O cálculo da dureza de Schmidt foi realizado através da média dos 10 maiores valores de rebote (valor Q), excluindo-se os demais valores.



Figura 3 - Esclerômetro de Schmidt Tipo L da Proceq.

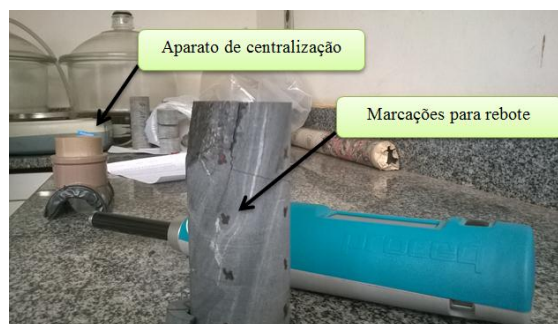


Figura 4 - Aparato para centralização e marcações no corpo de prova.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Propriedades-índice

Para melhor caracterizar os litotipos em estudo, determinaram-se, em laboratório, suas propriedades-índices, como apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 - Propriedades-índice dos litotipos em estudo

Litotipo	Grau de alteração	Massa específica aparente (kg/m³)		Porosidade aparente (%)
		Seca		Saturada
ANF	W1	3061	3067	0,56
QTZ	W1	2492	2498	0,65
Lote 1				
QTZ	W1	2446	2451	0,50
Lote 2				
ANF	W1/2	2722	2726	0,36
ANF Sn	W1	2860	2862	0,21
XG	W1	3058	3063	0,44

4.2 Resistência à compressão uniaxial

Os resultados de ensaio de compressão uniaxial são apresentados na Tabela 3. Com uma maior resistência à compressão uniaxial, encontra-se o anfibolito W1, seguido pelo anfibolito quartzoso W1, o xisto grafitoso W1, o anfibolito W1/2 e, finalmente, anfibolito foliado W1. A maior parte das rupturas ocorreu ao longo de 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). Observa-se

Tabela 3 - 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

σ_c^* - resistência à compressão uniaxial

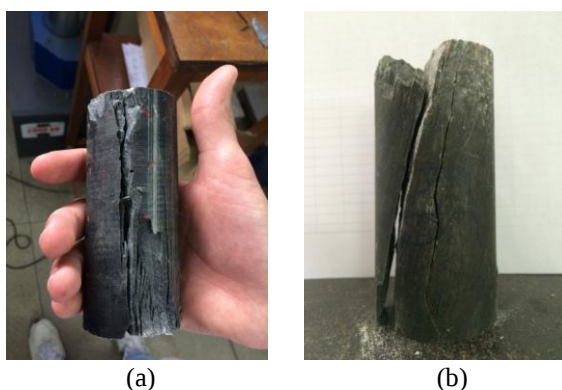


Figura 5 – (a) Ruptura por fendilhamento da amostra.
(b) Ruptura por cisalhamento.

4.3 Dureza de Schmidt

Os resultados dos ensaios de dureza de Schmidt são apresentados na Tabela 4. Como era esperado, observa-se uma queda da dureza de Schmidt em função do grau de alteração da rocha. O anfibolito W1 apresentou valor Q igual

a 61,87, enquanto seu litotipo mais alterado, anfibolito W1/2, apresentou valor Q igual a 52,19. Nota-se também uma diferença nos valores Q entre os dois lotes de anfibolito quartzoso. Acredita-se que seja ocasionada por presença de planos de fraqueza mais bem definidos nas amostras do Lote 2, uma vez que a resistência à compressão uniaxial também apresentou-se menor, enquanto a porosidade e absorção deste último eram inferiores aos das amostras do Lote 1. Contudo, o litotipo anfibolito quartzoso apresentou valor Q médio (entre os dois lotes) de 56,33, sendo o terceiro mais resistente, após o anfibolito W1 e o anfibolito foliado W1. Portanto, em termos de resistência média entre os litotipos e para a classe de alteração W1, o xisto grafitoso se apresentou com menor resistência que o anfibolito, de forma geral.

Tabela 4 - Resultados do ensaio de dureza de Schmidt

Litotipo	Grau de Alteração	Dureza de Schmidt (Q)	Desvio-padrão
ANF	W1	61,87	1,36
QTZ Lote 1	W1	61,15	1,39
QTZ Lote 2	W1	51,51	1,55
ANF	W1/2	52,19	3,88
ANF Sn	W1	57,92	5,30
XG	W1	54,88	1,86

4.4 Correlações entre resistência à compressão uniaxial e dureza de Schmidt

A partir dos resultados de σ_c e valor Q obtidos, buscou-se uma tentativa de obtenção de equações que correlacionassem estas duas propriedades. Inicialmente, plotaram-se os resultados individuais de todas as amostras em estudo, obtendo-se uma correlação pobre, na forma $\sigma_c = 5,208.Q - 154,2$, com R^2 igual a 0,20, como na Figura 6.

Ao analisarem-se as resistências médias para cada litotipo em estudo, uma melhor equação encontrada apresentou-se na forma exponencial $\sigma_c = 6,97.e^{0,053Q}$, com R^2 igual a 0,50, como na Figura 7. Uma equação apresentando um coeficiente de determinação mais expressivo foi encontrada excluindo-se o anfibolito foliado da análise de resistências médias: $\sigma_c = 4,98.e^{0,061Q}$,

com R^2 igual a 0,94, como na Figura 8. Uma possível explicação para esta mudança é a presença da foliação no anfibolito foliado, que não apresentou o mesmo comportamento em ambos os ensaios, uma vez que esta estrutura pode ter controlado rupturas paralela à mesma nos ensaios de compressão uniaxial, o que não ocorre nos ensaios com esclerômetro, em função da reduzida área de atuação do pistão em relação à área da foliação.

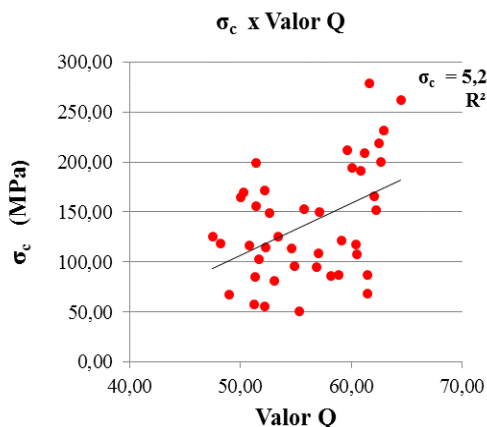


Figura 6 - Resultado de correlação de amostras individuais.

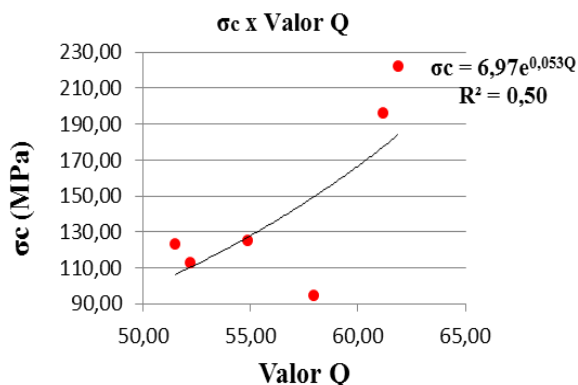


Figura 7 - Correlação σ_c x Q para todos os litotipos estudados.

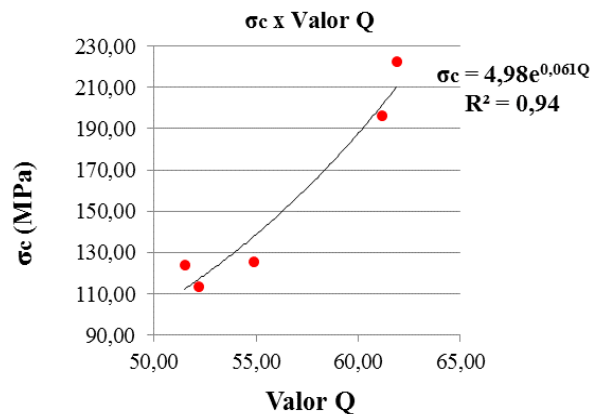


Figura 8 - Correlação σ_c x Q excluindo o anfibolito foliado.

5 CONCLUSÕES

Uma primeira correlação entre valores individuais de resistência à compressão uniaxial e de dureza de Schmidt apresentou-se pobre, pouco expressiva, mas a correlação obteve melhora significativa ao se tentar correlacionar valores médios de resistência à compressão uniaxial e de dureza de Schmidt.

Os resultados médios obtidos apresentaram boas correlações ao se comparar litotipos semelhantes em termos litológicos, excluindo-se o anfibolito foliado de uma das análises, uma vez que a foliação poderia mascarar a correlação. Ressalta-se a ausência de resultados de resistência à compressão uniaxial média na faixa de 130MPa a 190MPa, sendo as equações obtidas uma proposta inicial às respectivas correlações.

O trabalho também possibilitou uma colaboração no avanço das pesquisas de correlações entre ensaios destrutivos e não destrutivos, uma vez que os presentes litotipos, anfibolitos e xisto grafitoso ainda são pouco estudados.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES e à Universidade Federal de Viçosa (UFV) pelo apoio na realização do presente trabalho, agradecendo também ao COBRAMSEG pela possibilidade de apresentação e divulgação do mesmo.

REFERÊNCIAS

- 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.
- ÁVILA, C. R.; LANA, M. S., *Comportamento geotécnico e classificação geomecânica de maciços rochosos em taludes na região de Belo Horizonte*, Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental, Vol.3, p. 21 – 29, 2013.
- AYDIN, A.; BASU, A., *The Schmidt hammer in rock material characterization*, Department of Earth Sciences, The University of Hong Kong, China, 2005. 14p.
- AZEVEDO, I.C.D.; MARQUES, E.A.G. *Introdução à Mecânica das Rochas*. Caderno Didático. Ed. UFV, Viçosa, 2006. 361P.
- BRANDI, I.; BARBOSA, M.; GUIMARÃES, R. *Uso do esclerômetro de Schmidt na avaliação da resistência geomecânica de cavidades naturais subterrâneas em terrenos ferríferos, Carajás - PA.*, Congresso Brasileiro de Espeleologia, 33, 2015, Eldorado, 2015. p. 627-634.
- EUROCODE (2007), *Geotechnical Design – Part 2: Ground investigation and testing*. European Committee for Standardization, rue de Stassart, 36 B-1050 Brussels, Belgium. 198 p.
- FLEURY, S.V; OLKOWSKI, G.F.; KUROKAWA, E., *Proposta de Metodologia para Diferenciação de Rochas Duras e Brandas em Auditorias com o Uso do Esclerômetro Silver Schmidt*, in: ENAOP, Palmas, 2012. 12p.
- 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.
- JQUES, 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.
- MARTINS, F. F., MIRANDA, T. F. da S., *Correlações entre algumas propriedades mecânicas de rochas graníticas com vista à escavação de túneis*, C-TAC - Comunicações e Conferências Nacionais, Universidade do Minho, 2010, 9 p.
- RAMOS, B.M.C., *Construção de Bases de Dados para a Previsão das Propriedades Mecânicas dos Granitos*, Tese de Mestrado, Universidade do Minho – Escola de Engenharia, 2012.
- SHALABI, F. I., CORDING, E. J., AL-HATTAMLEH, O. H., *Estimation of rock engineering properties using hardness tests*, Engineering Geology, 90 ed., 2007, p. 138 -147.