

O uso do recuo do martelo de Schmidt na caracterização das propriedades mecânicas das rochas

Michelle Vilela Pádua¹, Hiálen Mariane Netto Rodrigues², Wellington Andrade da Silva³, Wanderlei Malaquias Pereira Junior⁴ e Sérgio Luís de Oliveira⁵



10.56238/rcsv14n4-004

RESUMO

Na geotecnica, o conhecimento das características das rochas, como as resistências à compressão e à tração e as propriedades elásticas, é de extrema importância para determinar se um tipo de rocha é adequada ou não para um projeto. Buscando facilitar a determinação desses parâmetros, diversos pesquisadores dedicam seus estudos na busca de métodos mais simples, rápidos e baratos. Essas propriedades são correlacionadas com outras de mais fácil análise, como a dureza. Um equipamento muito utilizado para isso é o martelo de Schmidt, um tipo de esclerômetro que mede a dureza superficial dos materiais. Esse instrumento correlaciona o seu recuo com as propriedades das rochas, através de equações simples e diretas. Sendo assim, o presente trabalho objetivou realizar um mapeamento das literaturas nas quais o martelo de Schmidt foi correlacionado com a resistência à compressão uniaxial, a resistência a tração diametral, o módulo de elasticidade ou o coeficiente de Poisson de rochas. Verificou-se, como estão sendo realizados os testes e o quão seguro são os seus resultados.

Palavras-chave: Rochas, Martelo de Schmitd, Resistência Mecânica.

1 INTRODUÇÃO

Os materiais empregados na Engenharia são inúmeros e cada um possui suas aplicações, versatilidades e peculiaridades. Desde materiais vindos direto da natureza e aplicados rusticamente, a materiais fabricados com alto grau de sofisticação e rigor. As rochas são materiais muito importantes nesse ramo, sendo utilizadas de diversas formas, e que necessitam ser devidamente analisadas para que sejam empregadas da forma correta. Devido a isso, muitas vezes, um papel primordial do engenheiro é conhecer as características das rochas.

As rochas possuem diversas propriedades, dentre elas as químicas, físicas, mecânicas, geológicas e geotécnicas. Porém, muitas dessas propriedades exigem certos métodos de análise que são complexos e conseqüentemente onerosos. Um exemplo dessas são as resistências mecânicas a compressão e tração, o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson, que são obtidos por meio de testes laboratoriais destrutivos. Esses testes, além de necessitar de equipamentos precisos e caros, são

¹ E-mail: michelle.padua@hotmail.com

² E-mail: hiálenmariane@gmail.com

³ E-mail: wellington_andrade@ufcat.edu.br

⁴ E-mail: wanderlei_junior@ufcat.edu.br

⁵ E-mail: sergio.luis@univasf.edu.br

complicados, demorados, requerem profissionais habilitados para execução dos mesmos e a extração de corpos de provas de formas exatas.

Frente a isso, vários profissionais da área vêm estudando e desenvolvendo técnicas que facilitem essas investigações. Algumas delas consistem em correlacionar propriedades que são de mais fácil análise com aquelas mais difíceis de serem obtidas. Nesse sentido, já foram realizadas algumas análises que relacionam as propriedades de dureza da rocha com suas características mecânicas e elásticas, se destacando o uso do martelo de Schmidt para tal fim.

A crescente popularidade do martelo de Schmidt (SH) se deve ao fato de ser um instrumento portátil, simples e acessível e que possui uma ampla aplicabilidade. Dessa forma, o recuo do martelo de Schmidt (N) é considerado o parâmetro mais utilizado na prática de mecânica das rochas, para predizer as resistências de compressão (UCS) e o módulo de elasticidade (E) de rochas intactas em campo ou no laboratório, conforme é apresentado pela *International Society For Rock Mechanics – ISRM* (Aydin, 2009).

A correlação entre o Martelo de Schmidt, que mede a dureza superficial, com as propriedades das rochas já vem sendo investigada desde a década de 1960, pelos pioneiros Deere e Miller (1966). Yilmaz e Sendir (2002) estudaram a correlação de N com os valores de UCS e E para o gesso. Encontraram bons resultados por meio de equações empíricas exponenciais, mas ressaltaram que apesar desse tipo de correlação ser aceitável, devem ser usadas equações específicas para cada tipo de rocha. Posteriormente, Aydin e Basu (2005) caracterizaram rochas graníticas com diferentes graus de intemperismo, utilizando dois tipos diferentes de martelos de Schmidt. Os autores concluíram que ambos os modelos se correlacionaram fortemente com os valores de resistência a compressão uniaxial e de módulo de elasticidade.

Contudo, apesar das suas incontáveis vantagens, o N é uma resposta indireta, e por esse motivo, precisa de gráficos de correlação para se estimar os parâmetros desejados. Ou seja, deve-se analisar os dados encontrados em campo e em laboratório para se obter uma resposta segura. Além disso, diversas questões devem ser analisadas antes da realização dos estudos, como o tipo de martelo, a normalização dos valores de recuo, os procedimentos de teste, e redução e análise de dados. Parâmetros estes, que influenciam diretamente na confiabilidade dos resultados do teste do martelo de Schmidt (AYDIN e BASU, 2005).

Portando, o presente trabalho tem como objetivo fazer um levantamento das pesquisas já realizadas sobre o assunto até o momento. Sendo assim, visa apresentar os estudos acerca da correlação entre o martelo de Schmidt e as propriedades mecânicas das rochas, mais especificamente as resistências a compressão e tração, o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson. Objetiva-se

verificar o tipo do SH e método de teste mais adequado, o modelo de análise de dados que resulte em correlações mais confiáveis, além de analisar a abrangência do tema e a importância de novos estudos.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização dessa pesquisa, foi escolhida a metodologia do tipo Mapping Study, na qual foram utilizados como bancos de dados o portal de periódicos da Capes, o Science Direct e o Scopus. Ao todo, foram utilizadas dez combinações de palavras em cada uma dessas bases. As expressões “Rock Schmidt” e “Schmidt Hammer” foram combinadas com “UCS”, “Elasticity Modulus”, “Young Modulus”, “Brazilian Tensile Strength”, “Indirect Tensile Strength” e “Poisson”, conforme apresentadas na Quadro 1 de resultados. Vale ressaltar que as pesquisas foram realizadas no mês de agosto de 2017, uma vez que os bancos de dados estão sempre se atualizando e apresentando novos resultados.

Quadro 1 – Resultados do mapeamento.

Base de dados	Combinação	Resultado	Aderentes	Total	Sem repetição	
CAPES	Rock Schmidt	UCS	14	9	40	30
		Elasticity Modulus	2	1		
		Young Modulus	10	5		
		Poisson	0	0		
	Schmidt Hammer	UCS	17	11		
		Elasticity Modulus	5	2		
		Young Modulus	12	6		
		Brazilian Tensile Strength	14	2		
		Indirect Tensile Strength	8	3		
		Poisson	2	1		
SCIENCEDIRECT	Rock Schmidt	UCS	18	13	41	24
		Elasticity Modulus	10	5		
		Young Modulus	11	5		
		Poisson	3	3		
	Schmidt Hammer	UCS	23	5		
		Brazilian Tensile Strength	6	0		
		Indirect Tensile Strength	2	1		
		Elasticity Modulus	7	3		
		Young Modulus	8	4		
		Poisson	2	2		
SCOPUS	Rock Schmidt	UCS	49	22	90	64
		Elasticity Modulus	27	10		
		Young Modulus	23	8		
		Poisson	7	3		
	Schmidt Hammer	UCS	43	22		
		Brazilian Tensile Strength	12	2		
		Indirect Tensile Strength	7	4		
		Elasticity Modulus	22	8		
		Young Modulus	23	9		
		Poisson	5	2		

Fonte – Autores.

Com o decorrer dos anos aumentou-se a quantidade de artigos publicados, como pode ser visto no gráfico 1. Percebe-se que essa quantia atingiu seu máximo em 2014 e 2016 com seis publicações, e até mesmo no ano de 2017 foram publicados três artigos relacionados ao assunto desse trabalho. Portanto, com essa avaliação é possível determinar que o tema em estudo é considerado atual e ainda apresenta muita relevância em pesquisas nessa área.

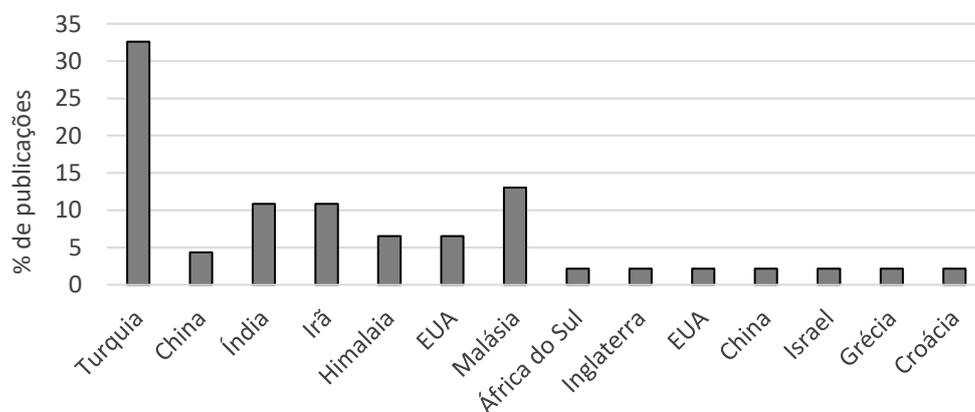
Gráfico 1 – Frequência de publicações.



Fonte – Autores.

De acordo com o gráfico 2, existem diferentes países que produzem textos relacionados com o assunto em questão, sendo que em muitos deles existem grandes cadeias montanhosas, como é o caso do Himalaia. Contudo, é possível perceber que a maioria dos estudos é oriundo da Turquia, com 32,6 %.

Gráfico 2 – Porcentagem dos locais de publicação.



Fonte – Autores.

3 REVISÃO

Com a leitura dos diversos materiais obtidos por meio do mapeamento sistêmico, é possível observar que os estudos a respeito da correlação entre o martelo de Schmidt e as propriedades das rochas começaram na década de 60. Deere e Miller (1966) realizaram um amplo estudo em diferentes tipos de rochas de diversas localidades dos Estados Unidos, a fim de desenvolverem um sistema de classificação na engenharia. Nesse estudo, foi realizada a medição da dureza superficial por meio do martelo de Schmidt e também por outro equipamento, conhecido como esclerômetro de dureza Shore. Os autores concluíram que a resistência das rochas e o módulo de elasticidade são melhor correlacionados com a dureza de Schmidt do que com a dureza de Shore, que é outro tipo de esclerômetro além do martelo de Schmidt. Descobriram ainda que o uso de outras propriedades, como a velocidade sônica, não é tão bom quanto o uso do índice de dureza de Schmidt ou Shore na correlação com o módulo.

Algumas vantagens do uso do martelo de Schmidt na caracterização de rochas são apresentadas por Goudie (2006) como portabilidade, baixo custo, capacidade para várias leituras no campo, simplicidade e fácil calibragem. O autor destaca ainda algumas limitações, dentre as quais se destacam as sensibilidades à descontinuidade, à umidade, à textura e à massa das rochas. É enfatizada a necessidade de se usar o equipamento com cuidado e devidamente calibrado, e de preparar a superfície da rocha com o material fornecido com o instrumento, removendo qualquer resíduo.

Métodos mais simples para estimar o valor de UCS através de N foram estudados por Karaman e Kesimal (2015b), para isso reduziram o número de leituras. Foram criados três novos testes e nomeados de T1, T2 e T3. O resultado do primeiro teste é obtido fazendo seis impactos únicos e a média de todos os valores. Para o segundo teste registra-se oito impactos e se desconsidera o maior e o menor valor para obter a média. E por fim, o último constitui de dez impactos únicos nas amostras, permitindo descartar os valores mais baixos e mais altos para fazer a média.

Com o intuito de comparar esses novos métodos, Karaman e Kesimal (2015b), também realizaram outros quatro testes que já constam na literatura, entre eles estão os testes da ISRM (Aydin, 2009) e da ASTM (2001). Concluiu-se que todos os testes obtiveram elevados coeficientes de correlação, contudo o T1 apresentou o melhor resultado em relação ao erro percentual, portanto apresenta a melhor previsão do UCS. Porém, o mesmo artigo alerta que todos os procedimentos de preparação das amostras estava de acordo com as normas da ISRM e da ASTM.

Já Tandon e Vikram (2015) correlacionaram o N com o UCS para litologias de quartzos, granitos, gnaisses, dolomita e metabásicas, no Himalaia. E perceberam que existe uma dispersão significativa dos dados quando todas as litologias foram consideradas em conjunto, porém quando foram consideradas separadamente as dispersões foram reduzidas consideravelmente. Concluiu-se que

essa diferença pode ter sido ocasionada pela grande variação nas características mineralógicas e as diferentes texturas dessas litologias.

Apesar da maioria dos estudos realizados nessa área correlacionar o recuo do martelo de Schmidt com o UCS, existem alguns autores que publicaram artigos correlacionando este instrumento com a BTS. Esses estudos também obtiveram grande sucesso nessa correlação (KARAMAN et al. 2015; RAJ e PEDRAM, 2015).

A variação da confiabilidade das equações, em altas e baixas, pode ser vistas no decorrer da leitura dos artigos. Isso é previsível pois os parâmetros de UCS não estão ligados apenas pelas relações com o martelo de Schmidt, mas sim por uma imensidão de propriedades mais complexas de serem medidas como: porosidade, teor de água e existência de rachaduras devido a intempéries (MOMENI et al., 2015). Apesar desse artigo ter sido realizado apenas para UCS, pode-se considerar a mesma interpretação para as variações de confiabilidade das equações que correlacionam o N com os resultados de BTS de rochas de mesma litologia, pois as mesmas propriedades podem interferir também nesse estudo.

Como existem variações de equações entre um estudo e outro e sabendo que é impossível realizar apenas uma equação para todos os tipos de rochas, então as equações sugeridas devem ser utilizadas somente quando as rochas em estudo possuírem propriedades semelhantes. (KARAMAN et al. 2015).

Equações empíricas entre a dureza de Schmidt e o módulo de Young (E) e a resistência à compressão uniaxial (UCS), foram encontradas por Sachpazis (1990). O autor aplicou a correlação para rochas carbonáticas oriundas da Grécia e a da Inglaterra e concluiu que as equações são práticas, simples e precisas o suficiente para serem aplicadas e são altamente recomendáveis para serem usadas na prática. Nesse trabalho é enfatizada a aplicabilidade dessas equações apenas para rochas carbonáticas, e a necessidade de se realizar novos trabalhos na área a fim de encontrar equações semelhantes para os outros tipos de rochas.

Um trabalho de referência foi o de Yilmaz e Sendir (2002), que estudaram amostras de gesso coletadas da Bacia de Sivas, na Turquia. Equações exponenciais relacionando o número de Schmidt e o UCS e o módulo tangencial de Young (E_t) obtiveram coeficientes de correlação (R) de 0,98 e 0,95 respectivamente, e segurança de 95%. Os autores constataram que as equações encontradas podem ser usadas com precisão aceitável em etapas preliminares de projetos de estruturas ou análises de resistências de pedras de construção.

Ainda na Turquia, foram estudadas algumas rochas vulcânicas da península de Bodrum. Dinçer et al. (2004) também correlacionaram a dureza de Schmidt com a resistência e o módulo de elasticidade, comparando regressões simples lineares, exponenciais e logarítmicas. Para todas as

correlações, UCS-N, E-N e E-UCS, a melhor relação encontrada foi a linear, como coeficientes de correlação (R) de 0,97, 0,92 e 0,92, respectivamente.

Essa correlação também foi analisada por outros autores com a intenção de estudar a interferência das condições da rocha na predição de propriedades por meio do martelo de Schmidt. Aydin e Basu (2005) utilizaram rochas graníticas com diferentes graus de intemperismo provenientes de Hong Kong e dois tipos martelo de Schmidt (RL e RN), sendo constatado que os dois oferecem bons resultados para UCS e Et, mas RN se relaciona melhor. Dentre as diversas conclusões dos autores pode-se destacar que: as maiores amostras são preferidas por dissiparem menos energia; não se deve descartar nenhuma leitura, ao menos que haja rachaduras visíveis ao redor do ponto de impacto; o impacto repetido no mesmo ponto leva a predição errada de UCS e Et; e o uso de variáveis adicionais deve ser evitado em equações empíricas para uso prático, exceto quando forem extremamente importantes.

Yagiz (2010) realizou um estudo de nove tipos de rochas da Turquia, para estimar o módulo, a resistência e propriedades índices. Foram realizadas regressões lineares e não lineares, e obtidas equações exponenciais e logarítmicas entre as variáveis. Os resultados foram comparados com os de outros autores e concluiu-se que mesmo em condições experimentais iguais, é impossível de se obter uma única correlação para todos os tipos de rocha.

Uma pesquisa diferente foi realizada por Dobrilovic et al. (2010), no sentido de comparar algumas condições de teste. Nesse sentido, foram utilizados dois tipos de martelo de Schmidt, um digital e um analógico, e as amostras foram submetidas ao teste de dureza nos sentidos paralelo e perpendicular aos planos de estratificação da rocha. Estimaram-se propriedades mecânicas de três amostras diferentes de calcário da Ístria, incluindo o módulo de elasticidade. Os autores concluíram que as melhores correlações levando em consideração à dispersão de dados devido ao tamanho das amostras, foram entre o martelo de Schmidt e o módulo. Verificaram ainda que os testes de dureza na direção perpendicular aos planos de estratificação dão correlações significativamente melhores para o módulo de elasticidade.

Nesse mesmo trabalho, foi feita ainda uma análise a respeito da introdução de outras variáveis na correlação entre as propriedades. Para tal, a densidade do material foi introduzida na aplicação dos valores de dureza, e observou-se que essa incorporação foi benéfica, visto que foram obtidas melhores correlações. De forma geral, os autores constataram que as propriedades mecânicas, tais como resistências à compressão uniaxial, módulo de elasticidade e resistência à tração, se correlacionam bem com o martelo de Schmidt.

Raj e Pedram (2015) realizaram testes para obtenção da dureza de Schmidt, módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson e outras propriedades. Dentre as diversas análises, os autores

concluíram que o coeficiente de Poisson não possui correlação com nenhum dos resultados obtidos nos testes, sendo que não conseguiram nem prever equações de correlação para esse índice. Foi percebido também que o efeito do comprimento da amostra nos valores da dureza de Schmidt é insignificante para amostras com mais de 12 cm de comprimento e que o desempenho das equações empíricas pode ser melhorado se houver mais dados experimentais disponíveis.

Para Dinçer et al. (2004) os resultados obtidos utilizando apenas o teste de Schmidt na determinação de propriedades das rochas são menos precisos do que aqueles com um conjunto completo de dados, mas as equações empíricas obtidas pelas regressões simples podem ajudar os profissionais a tomar decisões práticas.

A Quadro 2 expõe certas equações encontradas por alguns dos autores aqui apresentados, visto que alguns não apresentaram correlações, apenas estudo teórico, e outros desenvolveram equações por regressões múltiplas, que não é o foco deste trabalho. Vale ressaltar que alguns desses estudos realizaram mais de um método para se chegar a uma equação, contudo na Quadro só será representada a equação de cada artigo que obteve maior correlação.

Para cada autor está apresentado o índice de correlação encontrado, sendo que alguns utilizaram o coeficiente de correlação R e outros utilizaram ao coeficiente de determinação R². Para entender a diferença entre esses dois índices, podemos empregar a explicação de Triola (1999). Segundo esse autor, o coeficiente de correlação R mede o grau de relacionamento linear entre os valores x e y em uma amostra, e deve estar sempre entre -1 e +1, sendo que para valores próximos de 0 não há correlações lineares significativas entre os dados. Já o coeficiente de determinação R² é valor da variação de y que é explicado pela linha de regressão, podendo ser calculado elevando o R ao quadrado e, portanto, variando de 0 a 1. Ou seja, se R = 0,8, então R² = 0,64 o que significa que 64% da variação de y pode ser explicado pela linha de regressão, e os outros 36% permanecem não-explicados.

Quadro 2 – Equações e índices de correlação de N com UCS, E e BTS.

Referências	Tipos de rochas	Equações	R ²
Akram et al. (2017)	Calcário	$UCS = 1,1741N + 11,94$	0,68
Azimian (2017)	Calcário	$UCS = 2,664N - 35,22$	0,92
Armaghani et al. (2016a)	Graníticas	$E = 5,6441 e^{0,053 N}$ $UCS = 4,9279N - 128,45$	0,485 0,491
Armaghani et al. (2016b)	Graníticas	$UCS = 25,952e^{(0,030N)}$	0,59
Armaghani et al. (2016c)	Arenito	$UCS = 3,002N^{(0,801)}$	0,45
Ataei et al. (2015)	Mina de ferro	$UCS = 14,428e^{(0,0446N)}$	0,95
Aydin e Basu (2005)	Graníticas	$Et = 1,0405 e^{0,0706 RL}$ $Et = 0,7225 e^{0,0548 RN}$ $UCS = 1,4459 e^{0,0706RL}$ $UCS = 0,9165 e^{0,0669RN}$	0,91* 0,92* 0,92* 0,94*
Bejarbaneh et al. (2016)	Arenito	$E = 0,632 N^{1,005}$	0,503
Buyuksagis e Goktan (2007)	Granitos, calcários e travertinos	$UCS = 2,101e^{(0,0613N)}$	0,95
Chand e Subbarao (2007)	Cinzas de lagoas	$UCS = 0,4992e^{(0,0625N)}$	0,98

Deere e Miller (1966)	Diversas	$Et = 0,259N - 4,29)10^6$ $UCS = 1,246N - 34,890$	0,731* 0,880*
Dinçer et al. (2004)	Vulcânicas	$E = 0,47N - 6,25$ $UCS = 2,75N - 36,83$	0,85 0,95
Fakir et al. (2017)	Granitoides	$UCS = 0,0142N^{(2,3559)}$	0,86
Continua ...			
Referências	Tipos de rochas	Equações	R ²
Karaman e Kesimal (2015a)	Ígneas, metamórficas e sedimentares	$UCS = 0,1383N^{1,743}$	0,91
Karaman e Kesimal (2015b)	Vulcânicas, metamórficas e sedimentares	$UCS = 0,0176N^{2,243}$	0,95
Karaman et al. (2015)	Vulcânicas, metamórficas e sedimentares	$UCS = 3,66N - 63$ $BTS = 0,72N - 16,6$	0,84 0,85
Katz et al. (2000)	Diversas	$E = 0,00013 N^{3,09074}$ $UCS = 2,208 e^{0,067N}$	0,9936 0,9637
Liang et al. (2016)	Arenito	$UCS = 10,526e^{(0,0593N)}$	0,58
Minaeian e Ahangari (2013)	Rochas conglomeráticas	$UCS = 0,678N$	0,94
Mishra e Basu (2013)	Granito	$UCS = 5,19N - 168,1$	0,75
	Xisto	$UCS = 2,46e^{(0,60N)}$	0,78
	Arenito	$UCS = 3,79e^{(0,0558N)}$	0,85
	Todas as rochas	$UCS = 2,38e^{(0,65N)}$	0,87
Raj e Pedram (2015)	Basalto e Riolito	$E = 32,90 \ln(N) - 77,53$ $UCS = 0,25 N^{1,77}$ $BTS = 0,15N^{1,33}$	0,82 0,88 0,83
Sachpazis (1990)	Carbonáticas	$N = 0,5155Et + 17,488$ $N = 0,2329UCS + 15,7244$	0,7764 0,9178
Selçuk e Yabalak (2015)	Diversas	$UCS = 0,007N^{2,443}$	0,92
Tandon e Gupta (2013)	Diversas	$UCS = 12,398e^{(0,0365N)}$	0,82
Tandon e Vikram (2015)	Quartzos	$UCS = 2,72251N - 30,19$	0,91
	Granitos	$UCS = 2,2625N - 29,38$	0,96
	Gnaiss	$UCS = 2,7295N - 41,78$	0,71
	Metabásicas	$UCS = 2,5475N - 33,08$	0,93
	Dolomita	$UCS = 1,2335N - 2,846$	0,89
	Outras litologias	$UCS = 1,91051N - 10,30$	0,75
Tong et al. (2015)	Granito de degradação grau III	$UCS = 8,79e^{(0,0386N)}$	-
Tumac (2015)	Mármore, calcário preto e pedra calcária	$UCS = 11,65N^{(0,4951)}$	0,75
Yagiz (2011)	Travertino, calcário dolomito e xisto.	$E = 1,233 N - 17,8$ $UCS = 0,0028N^{(2,584)}$	0,85* 0,92*
Yilmaz e Yuksek (2008)	Gesso	$E = 1,2902 N - 19,952$ $UCS = 1,2483 N - 24,723$	0,9071 0,9555
Yilmaz e Sendir (2002)	Gesso	$Et = e^{1,146+0,054 N}$ $UCS = e^{(0,818+0,059N)}$	0,95* 0,98*

Onde: BTS – Resistência a Tração Diametral; E – Módulo de elasticidade; Et – Módulo de elasticidade tangente; N – Recuo do martelo de Schmidt; R_L – Martelo de Schmidt tipo L; R_N – Martelo de Schmidt tipo N; UCS – Resistência a Compressão Uniaxial; *= coeficiente de correlação R

Fonte – Autores.

O Quadro 2 representa um resumo das equações realizadas em cada artigo, através dela é possível perceber a variedade de rochas testadas, e a grande quantidade de equações de correlação do Martelo de Schmidt e as propriedades mecânicas, exceto o coeficiente de Poisson. Essa diferença de

equações e índices de correlação se deve ao tipo e localização da rocha investigada, metodologia de teste e análise dos resultados.

Como é o caso do calcário estudado por Akram et al. (2017) e Alzimian (2016) que determinaram equações e correlações diferentes, podendo ser explicado pelo fato de o primeiro estudo ter sido realizado no Himalaia e o segundo no Irã. As rochas graníticas analisadas por Armaghani et al. (2016a), Armaghani et al. (2016b) e Aydin e Basu (2005) localizadas na Malásia nos dois primeiros artigos e em Hong Kong no último, não devem ter seus índices de correlação comparados diretamente, pois são diferentes. Percebe-se também que mesmo que os dois primeiros estudos foram realizados no mesmo país, os índices e equações variaram de um artigo para outro na correlação com UCS.

Ainda na mesma linha de raciocínio as rochas ígneas/vulcânicas, metamórficas e sedimentares foram investigadas por quatro autores, entre eles: Fener et al. (2005), Karaman e Kesimal (2015a), Karaman e Kesimal (2015b) e Karaman et al. (2015). Atenta-se que todos os artigos analisaram amostras da Turquia e mesmo assim determinaram equações diferentes, em que os índices de correlação são considerados altos. Vale ressaltar que os dois artigos do Karaman e Kesimal de 2015 foram realizados para análise de amostras do mesmo Túnel de Cambasi.

Armaghani et al. (2016c) e Liang et al. (2016), definiram equações diferentes para o arenito com índices de correlação razoável. Ambos os estudos foram feitos na Malásia, porém em locais diferentes do país. E por fim amostras de gesso foram analisadas por Yilmaz e Yuksek (2008) e Yilmaz e Sendir (2002), ambos em Sivas na Turquia, porém cada artigo determinou equações e índices de correlação diferentes, dessa forma não podem ser comparados diretamente.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Por meio da revisão bibliográfica realizada, é possível perceber que o martelo de Schmidt já vem sendo amplamente utilizado na determinação de propriedades mecânicas das rochas. Nota-se que a grande maioria dos trabalhos realizados até o momento se desenvolveram na Ásia, com destaque para a Turquia, e que diversos tipos de rochas já foram estudados. Além disso, esse tipo de pesquisa tem sido constante ao longo do tempo e continua sendo realizada.

É possível constatar que na maioria das pesquisas o martelo de Schmidt é correlacionado tanto com o módulo de elasticidade quanto com a resistência à compressão uniaxial. Porém, a determinação do coeficiente de Poisson não é uma prioridade das correlações. Dos poucos autores que estudaram essa propriedade, um concluiu que o coeficiente não tem correlação com outras propriedades, outro realizou comparação apenas com a dureza Shore, e o outro realizou regressão múltipla com a associação de vários dados e obteve boas correlações.

Através da análise do quadro 2 é possível verificar que mesmo que alguns autores façam estudos com o mesmo tipo de rochas e em locais semelhantes, as equações e os índices de determinação são diferentes entre si. Isso explica a grande quantidade de estudos gerados para a correlação do martelo de Schmidt e as propriedades mecânicas.

O principal ponto apresentado e que é muito enfatizado pela maioria dos autores, é que as correlações encontradas entre o martelo de Schmidt e as propriedades são significantes e podem ser utilizadas na prática. Porém, é impossível determinar apenas uma correlação para todos os tipos de rocha, de forma que as correlações já encontradas só podem ser aplicadas ao tipo específico de rocha estudado.

REFERÊNCIAS

- AKRAM, M.S; FAROOQ, S.; NAEEM, M.; GHAZI, S. *Prediction of mechanical behavior from mineralogical composition of Sakesar limestone, Central Salt Range, Pakistan*. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, ed.76, p. 601-615, 2017.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). D 3967-95a: *Standard test method for Splitting Tensile Strength of Intact Rock Core Specimens*, 2001.
- ARMAGHANI, D. J.; MOHAMAD, E. T.; MOMENI, E.; MONJEZI, M.; NARAYANASAMY, M. S. *Prediction of the strength and elasticity modulus of granite through an expert artificial neural network*. Arabian Journal of Geosciences, v. 9, n. 48, 2016a.
- ARMAGHANI, D.J.; MOHAMAD, E.T.; HAJIHASSANI, M.; YAGIZ, S.; MOTAGHEDI, H. *Application of several non-linear prediction tools for estimating uniaxial compressive strength of granitic rocks and comparison of their performances*. Engineering with Computers, London, ed.32, p. 189-206, 2016b.
- ARMAGHANI, D.J; AMIN, M.F.M; YAGIZ, S.; FARADONBEH, R.S.; ABDULLAH, R.A. *Prediction of the uniaxial compressive strength of sandstone using various modeling techniques*. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, ed.85, p. 174-186, 2016c.
- ATAEI, M.; KAKAIE, R.; GHAVIDEL, M.; SAEIDI, O. *Drilling rate prediction of an open pit mine using the rock mass drillability index*. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, ed.73, p. 130-138, 2015.
- AYDIN, A. *ISRM Suggested method for determination of the Schmidt hammer rebound hardness: Revised version*. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, ed.46, p. 627-634, 2009.
- AYDIN, A.; BASU, A. *The Schmidt hammer in rock material characterization*. Engineering Geology, n. 81, p. 1-14, 2005.
- AZIMIAN, A. *Application of statistical methods for predicting uniaxial compressive strength of limestone rocks using nondestructive tests*. Acta Geotechnica, ed.12, p.321-333, 2017.
- BEJARBANEH, B. Y.; BEJARBANEH, E. Y.; AMIN, M. F. M.; FAHIMIFAR, A.; ARMAGHANI, D. J.; MAJID, M. Z. *Intelligent modelling of sandstone deformation behavior using fuzzy logic and neural network systems*. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, p. 1-17. 2016.
- BUYUKSAGIS, I.S.; GOKTAN, R.M. *The effect of Schmidt hammer type on uniaxial compressive strength prediction of rock*. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, ed 44, p.299-307, 2007.
- CHAND, S.K.; SUBBARAO, C. *Strength and Slake Durability of Lime Stabilized Pond Ash*. Journal of Materials in Civil Engineering, ed.19, n. 7, p. 601-608, 2007.
- DEERE, D.U.; MILLER, R.P. *Engineering classification and index properties for intact rocks*. New Mexico: Air Force Weapons Laboratory. Tech. Report No. AFNL-TR, pp. 65-116, 1966.

- DINÇER, I.; ACAR, A.; ÇOBANOĞLU, I.; URAS, Y. *Correlation between Schmidt hardness, uniaxial compressive strength and Young's modulus for andesites, basalts and tuffs*. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, n. 63, p. 141-148, 2004.
- DOBRILOVIC, I.; GULAM, V.; HRZENJAK, P. *Application of index testing methods in determining mechanical properties of intact rock material*. Zagreb: Rudarsko Geolosko Naftni Sbornik, v. 22, p. 63-71, 2010.
- FAKIR, M.; FERENTINOU, M.; MISRA, S. *An Investigation into the Rock Properties Influencing the Strength in Some Granitoid Rocks of KwaZulu-Natal, South Africa*. Geotechnical and Geological Engineering, ed.35, p.1119-1140, 2017.
- FENER, M.; KAHRAMAN, S.; BILGIL, A.; GUNAYDIN, O. *A Comparative Evaluation of Indirect Methods to Estimate the Compressive Strength of Rocks*. Rock Mechanics and Rock Engineering, Austria, ed.38, v.4 p.329-343, jun. 2005.
- GOUDIE, A. S. *The Schmidt Hammer in geomorphological research*. Progress in Physical Geography, v. 30, n. 6, p. 703-718. 2006.
- KARAMAN, K.; KESIMAL, A. *A Comparative study of Schmidt hammer teste methods for estimating the uniaxial compressive strength of rocks*. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, Berlin, ed.74, p.507-520, 2015a.
- KARAMAN, K.; KESIMAL, A. *Correlation of Schmidt Rebound Hardness with Uniaxial Compressive Strength and P-wave Velocity of Rock Materials*. Arabian Journal for Science and Engineering, ed.40, p. 1897-1906, 2015b.
- KARAMAN, K.; KESIMAL, A; ERSOY, H. *A comparative assessment of indirect methods for estimating the uniaxial compressive and tensile strength of rocks*. Arabian Journal for Science and Engineering, ed. 2015, ed. 8, p. 2393-2403, 2015.
- KATZ, O.; RECHES, Z.; ROEGIERS, J. C. *Evaluation of mechanical rock properties using a Schmidt Hammer*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, n. 37, p. 723-728. 2000.
- LIANG, M; MOHAMAD, E.T; FARADONBEH, R.S.; ARMAGHANI, D.J.; GHORABA, S. *Rock strength assessment based on regression tree technique*. Engineering with computers, London, ed. 32, p. 343-354, 2016.
- MINAEIAN, B.; AHANGARI, K. *Estimation of uniaxial compressive strength based on P-wave and Schmidt hammer rebound using statistical method*. Arabian Journal for Science and Engineering, ed. 6, p. 1925-1931, 2013.
- MISHRA, D.A.; BASU, A. *Estimation of uniaxial compressive strength of rock materials by index tests using regression analysis and fuzzy inference system*. Engineering Geology, ed.160, p. 50-68, 2013.
- MOMENI, E; NAZIR, R.; ARMAGHANI, D.J; AMIN, M.F.M; MOHAMAD, T. *Prediction of Unconfined Compressive Strength of Rocks: A Review Paper*. Journal Teknologi (Sciences & Engineering), ed.77, v. 11, p. 43-50, 2015.

- RAJ, K.; PEDRAM, R. *Correlations between direct and indirect strength test methods*. International Journal of Mining Science and Technology, n. 25, p. 355-360, 2015.
- SACHPAZIS, C. I. *Correlating Schmidt hardness with compressive strength and Young's modulus of carbonate rocks*. Paris: Bulletin of International Association of Engineering Geology, n. 42, 1990.
- SELÇUK, L.; YABALAK, E. *Evaluation of the ratio between uniaxial compressive strength and Schmidt hammer rebound number and its effectiveness in predicting rock strength*. Nondestructive Testing and Evaluation, v.30, n1, p.1-12, 2015.
- TANDON, R.S.; GUPTA, V. *The control of mineral constituents and textural characteristics on the petrophysical & mechanical (PM) properties of different rocks of the Himalaya*. Engineering Geology, ed.153, p. 125-143, 2013.
- TANDON, R.S; VIKRAM, G. *Estimation of strength characteristics of different Himalayan rocks from Schmidt hammer rebound, point load index, and compressional wave velocity*. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, Berlin, ed.74, p. 521-533, 2015.
- TONG NG, I.; VENG YUEN, K.; HOU LAU, C. *Predictive model for uniaxial compressive strength for Grade III granitic rocks from Macao*. Engineering Geology, ed.199, p. 28-37, 2015.
- TUMAC, D. *Predicting the performance of large diameter circular saws based on Schmidt hammer and other properties for some Turkish carbonate rocks*. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, ed.75, p. 159-168, 2015.
- TRIOLA, M. F. *Introdução à estatística*. Rio de Janeiro: Livros Técnicos Científicos. 1999.
- YAGIZ, S. *Predicting uniaxial compressive strength, modulus of elasticity and index properties of rocks using the Schmidt hammer*. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, n. 68, p. 55-63, 2010.
- Yilmaz, I.; Sendir, H. *Correlation of Schmidt hardness with unconfined compressive strength and Young's modulus in gypsum from Sivas (Turkey)*, Engineering Geology, n. 66, p. 211-219, 2002.
- YILMAZ, I.; YUKSEK, G. *An example of Artificial Neural Network (ANN) Application for Indirect Estimation of Rocks Parameters*. Rock Mechanics and Rock Engineering, v. 41, n. 5, p. 781-795, 2008.