



Correlação Entre a Resistência à Compressão Uniaxial e Propriedades Elastodinâmicas de Rochas Sedimentares de Diferentes Formações Estadunidenses

Pedro Henrique Alves de Lima, José Agnelo Soares, Leyllanne Renalle Batista de Almeida

Copyright 2016, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

Este texto foi preparado para a apresentação no VII Simpósio Brasileiro de Geofísica, Ouro Preto, 25 a 27 de outubro de 2016. Seu conteúdo foi revisado pelo Comitê Técnico do VII SimBGf, mas não necessariamente representa a opinião da SBGf ou de seus associados. É proibida a reprodução total ou parcial deste material para propósitos comerciais sem prévia autorização da SBGf.

Resumo

Este trabalho apresenta o estudo da comparação entre propriedades elásticas estáticas e dinâmicas de arenitos, calcários e dolomitos oriundos de diferentes formações estadunidenses. Foram analisadas as velocidades de propagação de ondas elásticas compressoriais (V_p) e cisalhantes (V_{S1}) e (V_{S2}), módulos elásticos dinâmicos e a resistência à compressão uniaxial. Os resultados mostram que a correlação entre a resistência à compressão uniaxial e as demais propriedades analisadas sofrem influência de fatores como o ambiente de formação, podendo apresentar variabilidade para amostras do mesmo litotipo oriundas de diferentes formações.

Introdução

O estudo das propriedades elásticas de rochas é conhecido pela sua importância na execução de projetos de engenharia, prospecção mineral e de petróleo bem como na avaliação de desastres ambientais. A aplicação destas propriedades varia desde a caracterização e modelamento geomecânico de reservatórios até a análise de estabilidade de escavações em minas subterrâneas (Hoek & Brown, 1980a), avaliação de potenciais zonas de instabilidade em poços de produção, potencial de produção de areia (Santarelli et al., 1989), dentre outros problemas associados à exploração e produção de petróleo e mineração.

Tais propriedades podem ser classificadas em estáticas ou dinâmicas, sendo as propriedades estáticas consideradas de maior relevância na descrição da resistência das rochas e aplicações na engenharia.

De acordo com Ali et al (2015), o módulo de elasticidade estático (E_s) é geralmente 3 vezes menor do que o módulo de elasticidade dinâmico (E_d). Tal diferença ocorre devido ao fato dos resultados serem altamente dependentes pela presença de poros, estruturas rúpteis, tipo de cimentação e demais características inerentes à litologia, tornando as relações entre parâmetros estáticos e dinâmicos dependentes diretas do tipo geológico (Jaeger et al., 2008).

Propriedades elásticas de rochas podem ser obtidas segundo métodos diretos e indiretos, com os métodos diretos responsáveis pela obtenção dos parâmetros estáticos e os indiretos aqueles utilizados na descrição do comportamento dinâmico, sendo a resistência à

compressão uniaxial apenas obtida através de métodos diretos.

De acordo com Hoek (1977), dentre as propriedades elásticas estáticas a UCS (resistência à compressão uniaxial) é sem dúvida a propriedade geotécnica mais comumente citada no meio industrial e acadêmico, devido à sua vasta aplicação como um índice de resistência, proporcionando uma primeira estimativa dos potenciais problemas a serem encontrados em determinado projeto.

Apesar do estudo de resistência à compressão uniaxial ser um importante fator na descrição geomecânica, o seu uso pode ser limitado devido à exigência de minuciosa preparação de amostras, alto custo de execução do experimento, destruição das amostras e o fato de que nem sempre existe a disponibilidade de testemunhos intactos para realização dos experimentos.

Por esse motivo a obtenção da resistência à compressão uniaxial através de métodos indiretos mostra-se atrativa do ponto de vista econômico e operacional.

Muitos autores abordaram a obtenção da resistência à compressão uniaxial de forma indireta através da correlação entre propriedades elásticas estáticas e dinâmicas (Azimian et al, 2013). Neste caso verifica-se um vasto número de diferentes equações que correlacionam a resistência à compressão uniaxial com outras propriedades, incluindo a velocidade de propagação de ondas compressoriais (V_p), como mostrado por Ehsan et al. (2015). A base dessa relação se dá pelo fato de que as características citadas por Jaeger et al. (2008) também afetam outras propriedades físicas tais como velocidade de propagação de ondas, módulos elásticos e porosidade.

Este trabalho apresenta a correlação entre a velocidade de propagação de ondas compressoriais (V_p) e dos módulos elásticos dinâmicos com a resistência à compressão uniaxial, considerada um dos mais importantes parâmetros na avaliação operacional e de riscos relacionados a projetos da indústria do petróleo e mineração.

Estudos correlatos tem mostrado que correlações válidas e confiáveis existem e podem levar a sérias melhorias no entendimento e aplicação de tais propriedades pela indústria (Freyburg, 1972; McNally, 1987; Kahraman, 2001; Sharma and Singh, 2008).

Neste estudo foram analisadas 30 amostras de rochas (calcário, arenito e dolomito), extraídos de diferentes afloramentos nos Estados Unidos, que foram disponibilizadas pelo Centro de Pesquisa da Petrobras (CENPES), como parte de um programa de testes interlaboratoriais.

Metodologia

Os ensaios petrofísicos e geomecânicos devem ser realizados segundo padrões estabelecidos pela ASTM. Segundo Sousa *et al.* (2014), para estudos petrofísicos realizados com o uso do equipamento Autolab 500[®], são utilizados testemunhos cilíndricos, com dimensões de aproximadamente 38 mm de diâmetro e 50 mm de comprimento (Figura 1a). Por outro lado, segundo a norma ASTM D4543-01, os ensaios de compressão uniaxial exigem preparação de plugs cilíndricos retos, com diâmetro igual ou superior a 50 mm e relação altura/diâmetro do plug variando entre 2,0 e 2,5 (Figura 1b). De acordo com Nogueira (2000) quando é necessário testar testemunhos de menor diâmetro, é desejável que o diâmetro do plug seja 10 vezes maior do que o diâmetro máximo do grão mineral, ficando recomendado um diâmetro 20 vezes maior.

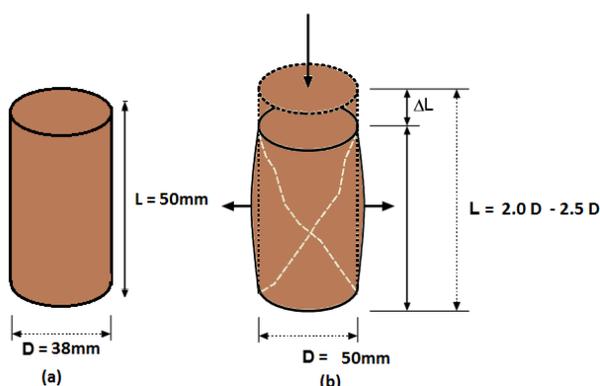


Figura 1: Dimensões dos plugs analisados

Os valores de porosidade foram obtidos através do uso de permoporosímetro a gás, aparato que permite a estimativa da porosidade, sob pressão ambiente, a partir da medição do volume de grãos da amostra. Através da injeção de gás nitrogênio em recipiente contendo a amostra, aplica-se a lei de Boyle e mede-se o volume de grãos da amostra, sendo a diferença entre o volume total e o volume de grãos obtido, o volume de poros. A partir daí obtém-se a porosidade pela razão entre o volume de poros e o volume total da amostra.

Os ensaios de velocidade foram realizados usando-se o equipamento Autolab500[®], disponível no Laboratório de Petrofísica da UFCG, que registra o tempo de trânsito da transmissão direta de ondas compressionais (P) e cisalhantes (S) através do comprimento axial da amostra. Sabendo-se o tempo de trânsito e o comprimento da amostra, obtém-se a velocidade. A partir das velocidades de propagação das ondas e da densidade total dos plugues, são calculados os módulos elásticos, i.e., módulo de elasticidade (E), módulo de cisalhamento (G), incompressibilidade (K) e razão de Poisson (ν), de acordo com as equações apresentadas por diversos autores (Bourbié *et al.*, 1987; Sheriff, 1991; Soares, 1992).

As amostras foram enviadas pelo CENPES ao Laboratório de Petrofísica da UFCG, onde foram realizados ensaios de densidade de grãos, porosidade e velocidade de propagação de ondas elásticas (Tabela 1). As rochas estudadas neste trabalho são consideradas padrões internacionais.

Tabela 1: Identificação das amostras ensaiadas com suas respectivas formações geológicas e litotipos.

FORMAÇÃO	AMOSTRA	LITOLOGIA
BOISE (IDAHO)	BOS-020	ARENITO
MESAVERDE	CGS-015	ARENITO
OHIO	BHS-001	ARENITO
GERMANY	BES-001	ARENITO
KANSAS	BBS-001	ARENITO
KIPTON	BFS-001	ARENITO
EDWARDS PLATEAU	LPS-020	ARENITO
KIPTON	SGS-010	ARENITO
EDWARDS PLATEAU	KBS-002	ARENITO
KANSAS	BGS-003	ARENITO
KIPTON	BRS-023	ARENITO
EDWARDS PLATEAU	PSS-002	ARENITO
UTAH	CTS-002	ARENITO
KENTUCKY	KKS-003	ARENITO
UTAH	TBS-001	ARENITO
UTAH	NGS-002	ARENITO
TENNESSEE	COS-001	ARENITO
OHIO	SCS-001	ARENITO
IDAHO	IGS-002	ARENITO
BEDFORD	IL1-005	CALCÁRIO
BEDFORD	IL2-004	CALCÁRIO
BEDFORD	IL3-020	CALCÁRIO
EDWARDS PLATEAU	AC-012	CALCÁRIO
EDWARDS PLATEAU	LD-004	CALCÁRIO
EDWARDS PLATEAU	DP-09	CALCÁRIO
EDWARDS PLATEAU	EY-08	CALCÁRIO
EDWARDS PLATEAU	EW-005	CALCÁRIO
	CML-001	CALCÁRIO
NIAGARA	GD-07	DOLOMITO
THORTON	SD-12	DOLOMITO

Resultados e Discussão

As correlações propostas neste trabalho apresentam a relação entre a velocidade de propagação de ondas compressionais e dos respectivos módulos elásticos com a resistência à compressão uniaxial. A figura 2 apresenta a relação entre a resistência à compressão uniaxial e a densidade total dos plugues. É possível identificar a relação exponencial entre as duas propriedades, sendo que as amostras de arenito apresentam uma menor dispersão do que a observada para os calcários. No caso das duas amostras de dolomito analisadas verifica-se

uma tendência similar àquela encontrada para os calcários.

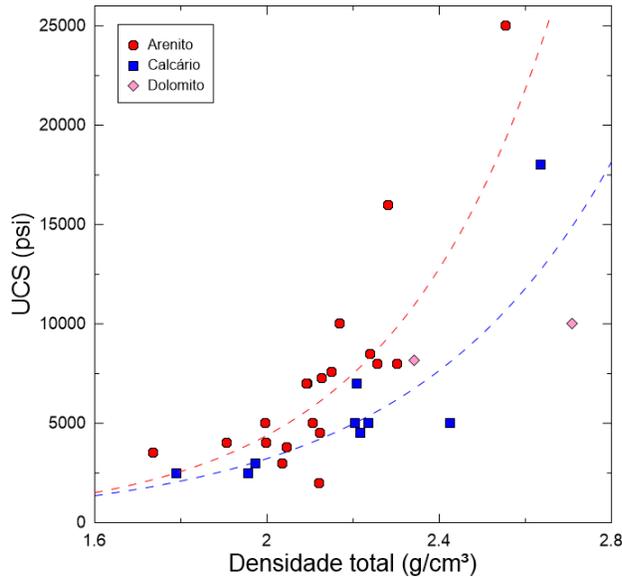


Figura 2: Relação entre a resistência à compressão uniaxial (UCS) e a densidade total.

Quando UCS é comparado com a porosidade, verifica-se uma relação inversamente proporcional entre esses dois parâmetros. Sendo os valores de resistência à compressão uniaxial mais altos aqueles que apresentam menor porosidade e, na medida em que a porosidade aumenta é possível observar uma redução nos valores de UCS (Figura 3).

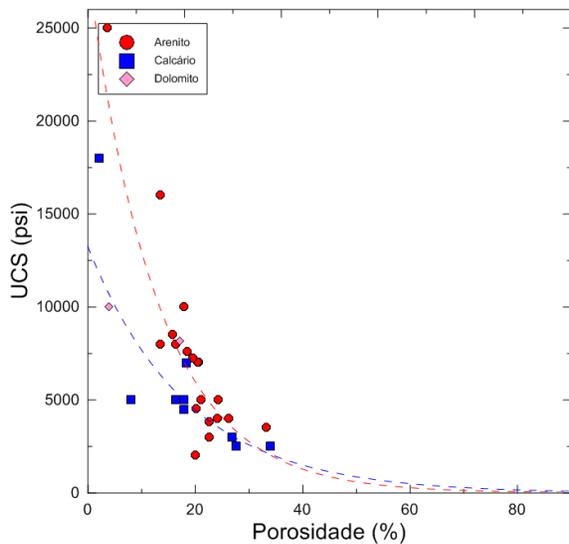


Figura 3: Resistência à compressão uniaxial versus porosidade

A velocidade de propagação de ondas é um parâmetro que pode ser facilmente obtido a partir de perfis sísmicos e ensaios laboratoriais de baixo custo. A figura 4 apresenta a relação entre a resistência à compressão uniaxial e a velocidade de propagação de ondas P através da amostra. A relação entre UCS e V_p mostra correlação

entre os parâmetros analisados, contudo a dispersão das amostras evidencia que mesmo aquelas pertencentes à mesma litologia podem apresentar diferenças. Uma interpretação para este fato se dá pela influência do ambiente geológico e dos diferentes campos de tensão sob os quais as diferentes formações são submetidas.

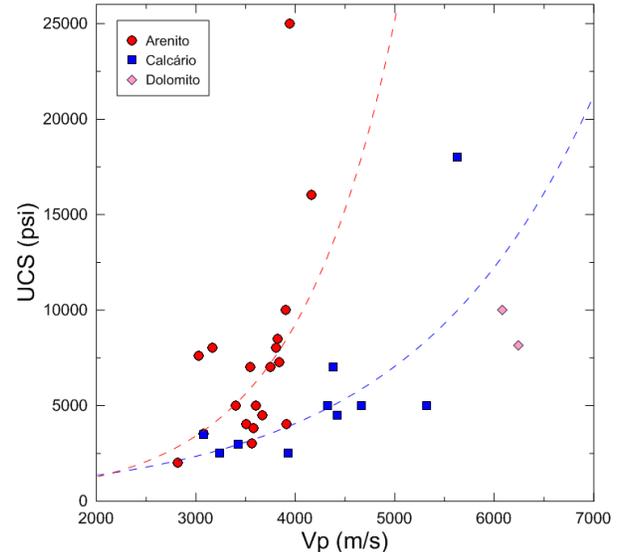


Figura 4: Relação entre a resistência à compressão uniaxial versus V_p

As velocidades de onda cisalhantes, mostradas nas figuras 5 e 6 mostram que para esse tipo de onda existe uma dispersão menos acentuada do conjunto de dados, mostrando uma relação mais forte do que aquela encontrada para as ondas compressionais.

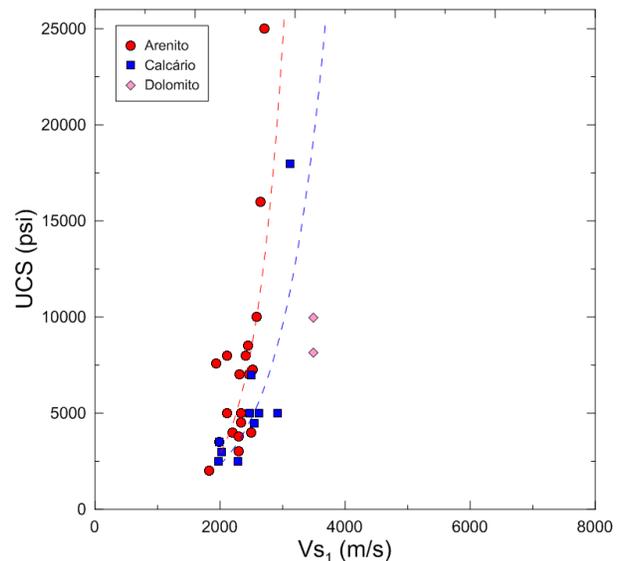


Figura 5: Resistência à compressão uniaxial versus VS_1

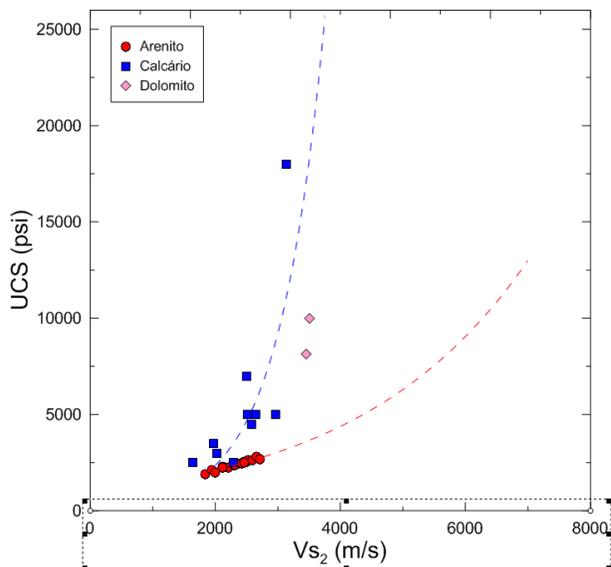


Figura 6: Resistência à compressão uniaxial versus VS_2

Vários estudos mostram que, na maioria dos casos, existe uma forte relação entre o UCS e o módulo de Young estático, Reyer & Philipp (2014). No caso do módulo de Young dinâmico é possível observar uma correlação mais fraca do que a encontrada por métodos estáticos, contudo é possível reconhecer um aumento exponencial da resistência à compressão uniaxial com o aumento do módulo de Young. (Figura 7).

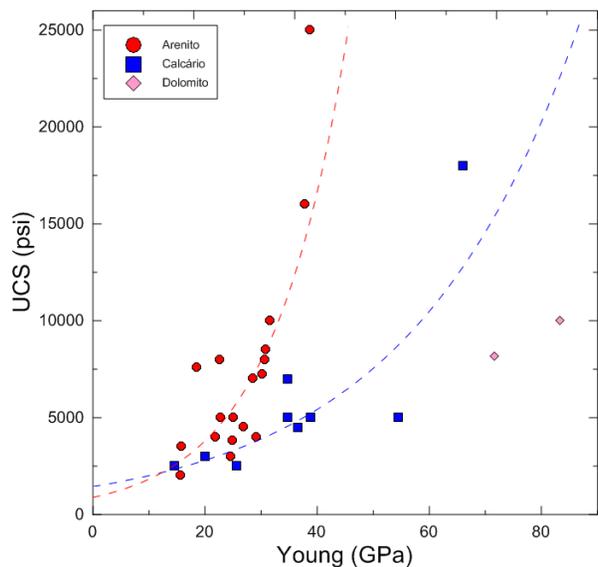


Figura 7: Associação entre a resistência à compressão uniaxial versus módulo de Young dinâmico (E_d)

Analogamente, o módulo de incompressibilidade, e módulo de cisalhamento, figuras 8 e 9 respectivamente. Ocorre correlação exponencial entre a resistência à compressão uniaxial e estes módulos, verificando-se valores de módulos elásticos dinâmicos maiores quando

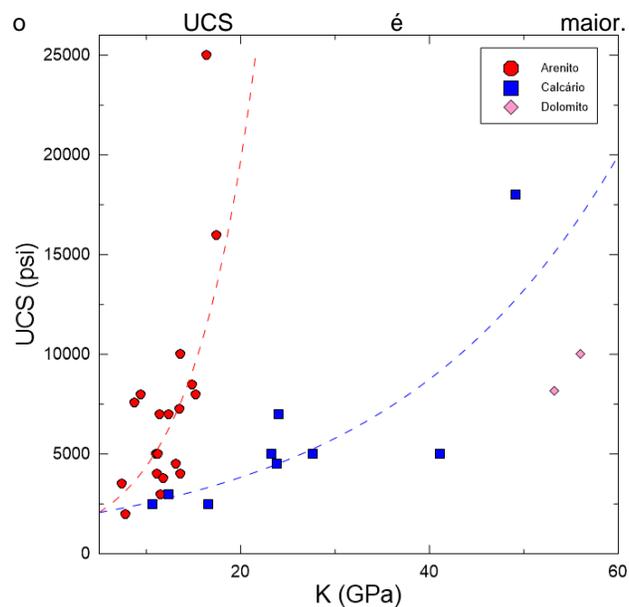


Figura 8: Resistência à compressão uniaxial versus Módulo de incompressibilidade

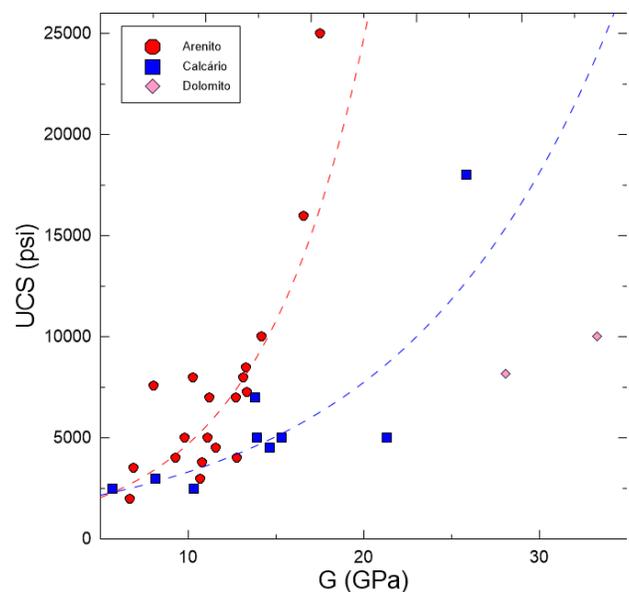


Figura 9: Resistência à compressão uniaxial versus Módulo de cisalhamento

Conclusões

O estudo e correlação entre as propriedades elásticas estáticas e dinâmicas é uma alternativa promissora para a descrição mecânica das rochas, possuindo vastas aplicações nas indústrias do petróleo e da mineração. Contudo informações relacionadas ao ambiente de formação, tipo de cimentação e distribuição de tensões, dentre outros, cumprem papel relevante na relação entre os parâmetros estudados. Tanto as velocidades de propagação de ondas quanto os módulos elásticos dinâmicos apresentam correlação exponencial e dispersão na base de dados, sugerindo que mesmo amostras pertencentes ao mesmo litotipo podem apresentar variações consideráveis nessas relações.

A comparação entre as propriedades elásticas estáticas e dinâmicas de arenitos, calcários e dolomitos de diferentes afloramentos estadunidenses mostra que apesar de haver correlação entre esses dados, é necessário verificar a relação entre as propriedades de rochas sedimentares oriundas de um mesmo ambiente de formação, para que seja feita a avaliação do papel exercido pelos demais fatores inerentes à geologia local.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao convênio firmado entre a PETROBRAS e a Universidade Federal de Campina Grande, através da Rede Carmod, que permitiu a realização deste trabalho, e ao CENPES pelas amostras de rochas disponibilizadas.

Referências

NAJIBI, A. R ; GHAFoori M.; LASHKARIPOUR G. R.; ASEF R. M. (2015). Empirical relations between strength and static and dynamic elastic properties of Asmari and Sarvak limestones, two main oil reservoirs in Iran.

ASTM D 4543-01. (1991). Standard practices for Preparing Rock Core Specimens and determining dimensional and shape tolerances,

AZIMIAN, A.; AJALLOEIAN R., FATEHI L. (2013). An Empirical Correlation of Uniaxial Compressive Strength with P-wave Velocity and Point Load Strength Index on Marly Rocks Using Statistical Method, Springer Science Business Media Dordrecht 2013.

JAEGER, J.C., COOK, N.G.W., ZIMMERMAN, R.W. (2007). Fundamentals of Rock Mechanics, fourth ed. Blackwell Publishing.

MOOS, D., ZOBACK, M.D., BAILEY, L. (1999). Feasibility study of the stability of openhole multilaterals, Cook Inlet, Alaska. 1999 SPE Mid-Continent Operations Symposium held in Oklahoma City, Oklahoma, 28–31 March 1999, SPE 52186.

SHARMA, P.K., SING, T.N. (2010). A correlation between P-wave velocities, impact strength index, slake durability index and uniaxial compressive strength.

MOMENI, E.; NAZIR, R.; ARMAGHANI, D. J.; AMIN, M. F. M.; MOHAMAD E. T. (2015) Prediction of Unconfined Compressive Strength of Rocks, A Review Paper. Faculty of Civil Engineering, Universiti Teknologi Malaysia, 81310 UTM Johor Bahru, Johor, Malaysia, 2015.

NOGUEIRA, J. A., (2000). Propriedades Mecânicas da Rocha Intacta na Mineração de Ferro. Dissertação de Mestrado Apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG.

BOURBIÉ, T.; COUSSY, O.; ZINSZNER, B. (1987). Acoustics of porous media. Éditions Technip. France.

SOARES, J.A. (1992). Um estudo da estabilidade mecânica de poços em formações pouco consolidadas. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-graduação em Geofísica. Universidade Federal do Pará.

HOEK, E. and BROWN, E. T. (1980a). Underground excavations in rock. London: Instn Min. Metall.

FREYBURG, E. (1972). Der Untere und Mittlere Buntsandstein SWThüringen in seinen gesteintechnischen Eigenschaften, Ber.Dtsch. Ges. Geol. Wiss. A Berlin, 17, 911–919, 1972.

KAHRAMAN, S. (2001). Evaluation of simple methods for assessing the uniaxial compressive strength of rock, Int. J. Rock Mech. Min., 38, 981–994,

SHARMA, P. K. and SINGH, T. N. (2008). A correlation between P wave velocity, impact strength index, slake durability index and uniaxial compressive strength, B. Eng. Geol. Environ., 67, 17–22.

SOUSA, W. B., SOARES J. A., FREIRE, L. A, (2014). Análise Petrofísica da Tufa Carbonática do Afloramento Felipe Guerra, Bacia Potiguar.

DINCER, I., ACAR, A., ÇOBANOĞLU, I., and URAS, Y. (2004). Correlation between Schmidt hardness, uniaxial compressive strength and Young's modulus for andesites, basalts and tuffs, B. Eng. Geol. Environ., 63, 141–148,.