

ALTURA/DIÂMETRO DE CORPOS DE PROVA X VARIABILIDADE NA RESISTÊNCIA DE ROCHAS

Length-diameter ratio of rock samples x variability in strength of rocks

LUIZ CARLOS RODRIGUES DE ALMEIDA*
JOSUÉ ALVES BARROSO**
EMÍLIO VELLOSO BARROSO***

RESUMO - Trata-se dos aspectos geométricos (relação altura/diâmetro - H/D) de corpos de prova usados em ensaios de compressão uniaxial. Questiona-se a necessidade de se adotar o limite de H/D = 2,5 proposto pela International Society for Rock Mechanics, particularmente no caso de rochas brandas. Discute-se a variabilidade intrínseca às rochas e propõe-se que este efeito pode ser mais significativo do que a variação de resistência imposta pela redução da relação H/D, até um limite igual a 2,0.

SYNOPSIS - This paper deals with the height/diameter aspects of rock samples used in uniaxial compressive strength tests. It discusses the necessity to obey the lower limit (2,5) proposed by International Society for Rock Mechanics, specially when weak weathered rocks are considered. It emphasises the intrinsic variability of rocks and states that this effect can be of greater significance than the strength changes imposed by a reduction of that ratio until a limit of 2,0.

1 - INTRODUÇÃO

Sabidamente uma das principais dificuldades relacionadas à investigação geotécnica de rochas brandas prende-se às suas características de desagregabilidade, sobretudo em rochas sedimentares pelíticas e naquelas que são derivadas do intemperismo. Nas operações de sondagens, as ações abrasivas e desagregadoras da coroa diamantada e do fluido de circulação, em presença de material pouco coesivo, fissurado ou expansível, constituem sério obstáculo a ser vencido para amostragem e posteriores ensaios de laboratório.

No Brasil, a utilização de barriletes duplos convencionais, tendo a água como fluido de circulação, é a técnica de amostragem mais frequentemente empregada. Baixos índices de qualidade da amostragem são, via de regra, observados quando em rochas brandas. Dobereiner (1989) e Barroso (1993) relatam valores de RQD entre 50% e 60% sob as condições descritas anteriormente. Se for considerada ainda a severidade do processo de usinagem de corpos de prova (cp), para obter-se paralelismo entre os topos e perpendicularidade desses com a superfície lateral, bem como para eliminação das rugosidades dessas superfícies, apenas alguns poucos corpos de prova (CP) são obtidos para ensaios de resistência. Esta dificuldade adicional decorre das recomendações da *International Society for Rock Mechanics* (ISRM, 1978) para preparação de amostras e execução de ensaios

* Geólogo - Instituto de Geociências - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil.

** Prof. Adjunto - Instituto de Geociências - Universidade Federal do Rio de Janeiro e Universidade Estadual do Norte Fluminense, Brasil.

*** Prof. Assistente - Instituto de Geociências - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil.

de compressão, que preconiza ainda um mínimo de cinco c.p., para se avaliar a repetibilidade dos dados.

Como forma de se contornar os problemas até aqui descritos, comumente realiza-se ensaios índices, sendo o de compressão puntiforme o mais difundido para avaliação da resistência. No entanto, Barroso et al. (1996), estudando perfis de intemperismo em gnaisses, relatam um aumento da variabilidade desses índices físicos com o aumento do estágio de alteração intempérica, ou seja, quanto mais brando o material maior a dispersão obtida na mensuração de suas propriedades. Para a compressão puntiforme, os autores relatam que os valores obtidos para os estágios de alteração mais avançados se apresentaram muito dispersos e são pouco conclusivos com respeito à resistência do material.

Vale ressaltar que equações para correção do valor de resistência à compressão uniaxial, em função das pequenas relações altura/diâmetro (H/D), já foram propostas (Szlavin, 1974; Turk e Dearman, 1986). No entanto, essas equações são aplicadas apenas ao tipo de rocha ensaiado e, portanto, de utilidade restrita. Tem-se observado na literatura que diversos autores (Prestes, 1993; Barroso, 1993; Tsidzi, 1990; Nunes, 1989; Dobereiner, 1984; Pells e Ferry, 1983; entre outros) executaram ensaios de compressão simples em rochas brandas empregando c.p. com relações H/D inferiores a 2,5; contrariamente ao que sugere a ISRM (1978).

A combinação dos aspectos abordados justifica a necessidade de se investigar a possibilidade de obtenção da resistência à compressão uniaxial utilizando-se relações H/D inferiores a 2,5, uma vez que corpos de prova com essas características são mais facilmente produzidos.

Neste artigo discute-se a real necessidade de se adotar geometria (relações H/D) tão restritiva quanto a que é sugerida pela ISRM (1978) nos ensaios para determinação da resistência à compressão uniaxial. Para tal, ensaiou-se corpos de prova cilíndricos, constituídos de argamassa cimento-areia, em vários traços e relações H/D . Com isto pretendeu-se eliminar a variabilidade intrínseca aos materiais rochosos e avaliar-se apenas os efeitos de extremidade, devidos ao atrito no contato entre a rocha e os pratos de carregamento da prensa, com a progressiva redução das relações H/D . A partir de então confrontou-se a magnitude desse efeito com a dispersão observada na resistência à compressão uniaxial em uma variedade de rochas brandas e um exemplo de rocha de resistência alta.

2 - COMPORTAMENTO DE ROCHAS EM COMPRESSÃO UNIAXIAL

Os aspectos relacionados à geometria dos corpos de prova, relevantes nos ensaios de compressão são a forma, razão H/D e o tamanho.

Referências a corpos de prova prismáticos e cilíndricos são mais frequentes na literatura. A complexa distribuição das deformações nas amostras prismáticas, a influência dessa forma sobre o tipo de ruptura e a maior facilidade na obtenção de amostras cilíndricas, a partir de testemunhos de sondagem, são os motivos de natureza teórica e prática que tornam o tipo cilíndrico largamente empregado em geotecnia.

Estudos experimentais evidenciam que a resistência diminui com o aumento do tamanho ou volume do corpo de prova, independentemente de sua forma (Lundborg, 1967 e Bieniawski, 1968).

Há um grande número de publicações mostrando a dependência entre os valores de resistência e as relações H/D dos corpos de prova (Kotte et al.; 1969; Bordia, 1971; Hawkes e Mellor, 1970). Estudos teóricos e experimentais revelam que para valores baixos dessa razão, sobretudo aqueles menores do que 1, o resultado do ensaio pode ser totalmente influenciado

pelas condições de contorno na região de contato entre a rocha e o metal das placas de distribuição do carregamento. Devido a um efeito conjugado do coeficiente de Poisson da própria rocha e o atrito existente nesse contato, há um confinamento nas extremidades do corpo de prova, induzindo uma distribuição de tensões que se afasta bastante do estado uniaxial (Bordia, 1971; Peng, 1971; Brady, 1971; Al-Chalabi e Huang, 1974; Wijk, 1980).

Tendo em vista o que foi exposto anteriormente, a ISRM (1981) faz as seguintes recomendações com relação à geometria dos corpos de prova: forma cilíndrica, diâmetro preferivelmente não menor do que 54 mm e relação H/D entre 2,5 e 3,0.

3 - METODOLOGIA DO ESTUDO

Como mencionado anteriormente, foram confeccionados c.p. de argamassa em diferentes traços, procurando representar quatro classes de resistência, a saber: 10, 15, 20 e 35 MPa. Este intervalo foi escolhido tendo em vista a abranger uma faixa representativa do que a própria ISRM (1978) estabelece como rochas brandas, entre 0,5 e 25 MPa.

Aspecto importante a salientar foi o controle de absorção de água: foram produzidos corpos de prova com valores normalmente observados em rochas alteradas. Para cada traço foram moldados corpos de prova com relações H/D de 1,0; 1,5; 2,0; 2,5 e 3,0, com diâmetro mantido constante em 50 mm.

Para a execução dos ensaios foi adotada a metodologia NBR 7215/91, atendendo ainda ao intervalo de tempo entre 5 e 10 minutos, recomendado pela ISRM, para ruptura de corpos de prova em compressão simples.

Paralelamente ao levantamento de dados sobre a resistência de rochas brandas e análise de sua variabilidade, como proposto por Rhode e Feng (1990), também foram realizados ensaios de compressão uniaxial em uma rocha ígnea intrusiva (quartzo-diorito), de composição mineralógica e textural bastante homogênea e sua mineralogia se apresenta: plagioclásio (50 %), quartzo (15 %), biotita (10-12 %), hornblenda (12-15 %), feldspato potássico (4-7 %), magnetita e apatita (8-10 %). A finalidade desses ensaios foi verificar a variação da resistência à ruptura para materiais geológicos de alta resistência.

4 - RESULTADOS

Na Tabela 1, apresenta-se os resultados médios de resistência, em MPa, e os coeficientes de variação (relação percentual entre o desvio e a média) para cada classe de resistência e relação H/D dos corpos de prova de argamassa. Observa-se que os coeficientes de variação são, na quase totalidade, inferiores a 5%.

A Tabela 2 mostra as reduções das resistências médias consoante o aumento da razão H/D para os corpos de prova de argamassa.

Verifica-se que a variação absoluta média (redução ou acréscimo) dos valores médios de resistência, considerando-se as relações 2,0; 2,5 e 3,0, é da ordem de 2,5 %. Particularizando, chega-se a uma variação média absoluta de 3,1 % na passagem da relação H/D de 2,5 para 3,0 e de apenas 1,9 % na passagem de 2,0 para 2,5. Os gráficos de resistência (MPa) x relação H/D (Fig. 1) ilustram bem o limite definido pela relação H/D = 2,0, a partir da qual as variações de resistência são diminutas, bastante inferiores àquelas obtidas com tipos litológicos diversos.

Tabela 1
Valores de resistência à compressão uniaxial das argamassas e os correspondentes coeficientes de variação para cada relação H/D.

Relação altura/diâmetro	Classes de resistência à compressão (MPa)			
	10	15	20	35
1,0	15,1 (3,2)	17,3 (0,8)	22,2 (4,3)	40,4 (4,2)
1,5	13,5 (3,9)	16,1 (2,0)	20,6 (3,8)	34,7 (2,1)
2,0	10,6 (0,9)	14,2 (3,5)	19,4 (1,5)	31,7 (0,9)
2,5	10,2 (3,9)	14,2 (5,3)	19,7 (2,5)	31,0 (2,3)
3,0	9,6 (4,2)	14,5 (2,1)	19,2 (0,6)	30,4 (3,6)

Tabela 2
Reduções percentuais de resistência média consoante o aumento da razão H/D nas diversas classes de argamassa.

Relação altura/diâmetro	10 MPa	Redução Parcial %
1,0	15,1	-
1,5	13,5	10,56
2,0	10,6	21,48
2,5	10,2	3,77
3,0	9,6	5,88
Relação altura/diâmetro	15 MPa	Redução parcial %
1,0	17,3	-
1,5	16,1	6,94
2,0	14,2	11,80
2,5	14,2	0,00
3,0	19,2	+2,11
Relação altura/Diâmetro	20 MPa	Redução parcial %
1,0	22,2	-
1,5	20,6	7,21
2,0	19,4	5,83
2,5	19,7	+1,55
3,0	19,2	2,54
Relação altura/Diâmetro	35 MPa	Redução parcial %
1,0	40,7	-
1,5	34,7	14,74
2,0	31,7	8,65
2,5	31,0	2,21
3,0	30,4	1,93

A Tabela 3 apresenta os resultados obtidos nos ensaios de compressão uniaxial no quartzo-diorito, cujas propriedades físicas são: peso específico seco 29,1 kN/m³, porosidade 0,80 % e absorção de 0,15 %.

Tabela 3
 Reduções percentuais, médias e coeficientes de variação para cada relação H/D
 no quartzo-diorito

Redução %	Relação altura/diâm.	Coef de variação (%)	Média (MPa)
-	1,5	6,50	110,31
19,41	2,0	4,40	88,89
2,86	2,5	4,08	86,35
0,82	3,0	6,58	85,64

O quartzo-diorito, de alta resistência e baixa deformabilidade, apresenta um coeficiente de variação médio 5,4 %, valor maior do que aqueles encontrados para os c.p. de argamassa. A redução parcial da resistência com a variação da relação H/D confirma o comportamento verificado para as argamassas, mostrando mais uma vez que a relação 2 constitui um limite muito bem definido.

A Tabela 4 apresenta alguns dados obtidos da literatura onde rochas gnaissicas provenientes de intemperismo, inclusive brandas, foram ensaiadas com relações H/D entre 2,5 e 2,0.

Tabela 4
 Valores médios de resistência à compressão simples (σ), do coeficiente de variação (Co.V.) e do ângulo (β) entre a foliação do gnaisse e a direção axial

Autor	Tipo de rocha	Rocha resistente			Rocha medianamente resistente			Rocha branda		
		β°	σ (MPa)	Co.V (%)	β°	σ (MPa)	Co.V (%)	β°	σ (MPa)	Co.V (%)
Barroso (1993)	Gnaisse Leptinitico	45	63,45	4,1	-	-	-	90	21,68	12,63
Prestes (1993)	Gnaisse Facoidal	35- 40	65,8	7,46	0	28,58	18,71	90	17,70	8,47

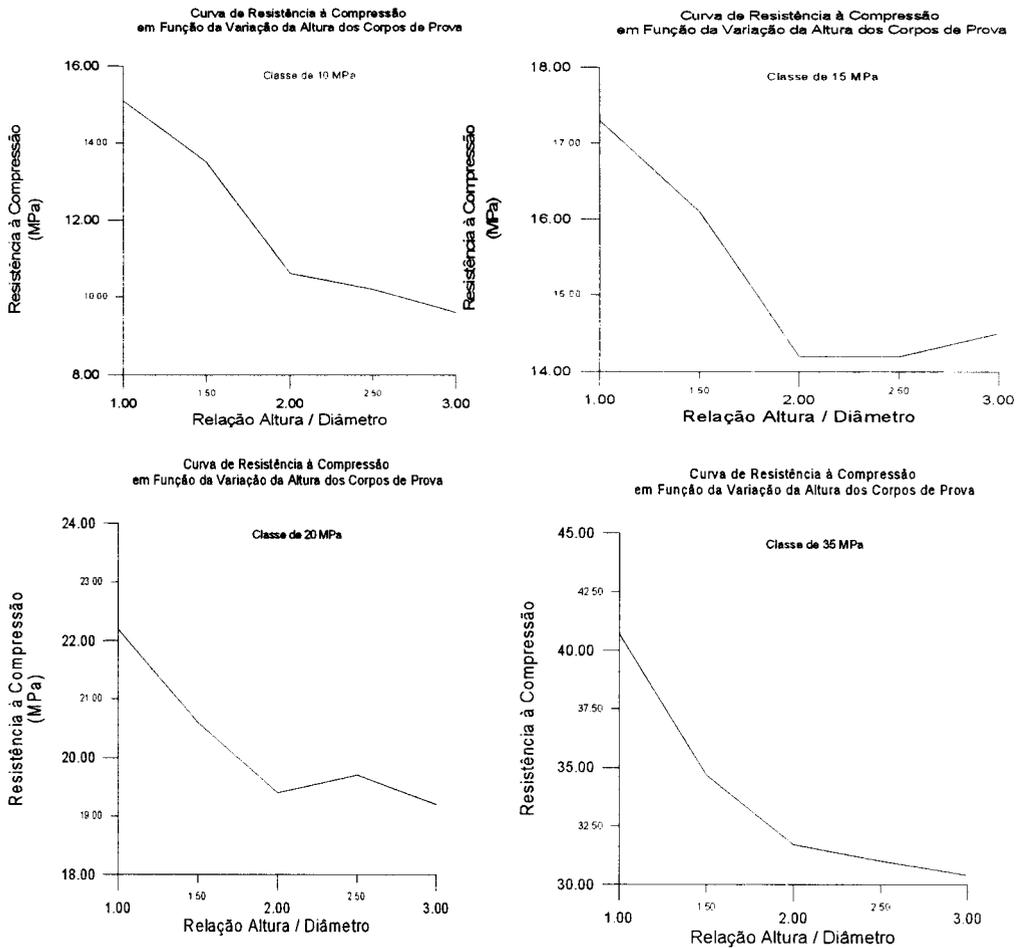


Figura 1 - Curva de resistência à compressão uniaxial em função da altura dos corpos de prova de argamassa e das classes de resistência.

Nota-se que os coeficientes de variação são, também neste caso, maiores do que aqueles verificados para a argamassa. Pode-se perceber que há uma tendência de aumento da variabilidade dos dados nos materiais mais intemperizados.

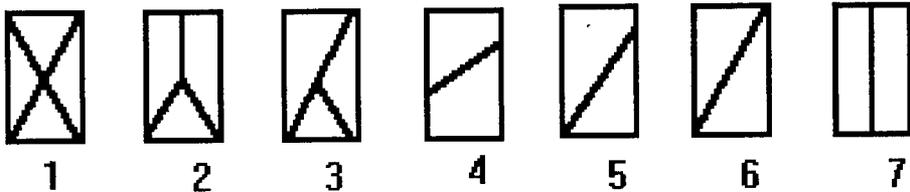
A Tabela 5 apresenta dados relativos a dois tipos de arenitos (Nunes, 1989). Deve-se notar também o elevado coeficiente de variação para este tipo de rocha, sobretudo no material brando.

Para efeito de classificação das amostras, foram observados os tipos de rutura mais frequentes para cada uma das classes de resistência e relações H/D investigadas adoptando-se o mesmo procedimento também para o quartzo-diorito, a Figura 2 apresenta os tipos encontrados.

Tabela 5

Valores médios de resistência à compressão simples (σ) e do coeficiente de variação (Co.V.) para dois tipos distintos de arenitos estudados por Nunes (1989)

Tipo de arenito	σ (MPa)	Classificação (ISRM, 1981)	Co.V. (%)
Quartzo arenito, maduro e com menos de 3% de matriz	22,61	Medianamente Resistente	53,07
Subarcósio, maduro e com menos de 3% de matriz	36,07	Branda	24,63



Tipo 1 - Cônica ; *Tipo 2* - Cônica com clivagem axial ; *Tipo 3* - Cônica com “cisalhamento”; *Tipo 4* - Superfície de “cisalhamento” de meio ; *Tipo 5* - Superfície de “cisalhamento” de topo; *Tipo 6* - Superfície de cisalhamento “diagonal”; *Tipo 7* - Fendilhamento axial.

Figura 2 - Exemplo dos tipos de ruptura dos corpos de prova considerados para efeito de classificação das mesmas.

Sabe-se das dificuldades de análise dos tipos de ruptura, uma vez que são afectados por efeitos diversos. No entanto, é possível destacar que as diversas relações H/D mostram tendências bem definidas, tanto das argamassas quanto do quartzo-diorito, cujos ensaios foram executados rigorosamente dentro de uma mesma sistemática e com os mesmos equipamentos. Assim é que se obteve, como padrão mais frequente entre os corpos de prova de argamassa, para a relação H/D = 1,0 o tipo 2, para as relações H/D = 1,5 e 2,0 o tipo 6, para a relação H/D = 2,5 o tipo 5 e para a relação H/D = 3,0 obteve-se o tipo 5. No caso do quartzo-diorito, na relação H/D = 1,5 o tipo mais comum foi o tipo 1, para as relações H/D = 2,0 e 2,5 predominou o tipo 6 e finalmente para a relação H/D = 3,0 o tipo 5.

Não foram considerados os tipos de ruptura da Figura 1 para os materiais apresentados nas Tabelas 4 e 5 face à anisotropia dos gnaisses (Tabela 4) e à grande variabilidade dos tipos de arenitos ensaiados (Tabela 5).

5 - CONCLUSÕES

Os ensaios em corpos de prova constituídos por argamassa, material homogêneo e confeccionado com o controle de suas características físicas e mecânicas, revelam que o efeito do confinamento nas extremidades dos corpos de prova, não é significativamente distinto quando se considera as relações H/D de 2,5 e 2,0. Esta conclusão apoia-se na pequena redução da resistência, cujo valor médio é de 1,9 %.

Por outro lado foi possível constatar-se a magnitude da variabilidade dos valores de resistência à compressão uniaxial associada à rochas, ensaiadas no intervalo entre 2,0 e 2,5 para razão H/D. Essa pode ser bastante elevada, sobretudo no caso de rochas brandas (intemperizadas ou não), ultrapassando em muito o valor acima.

O exposto nos dois parágrafos anteriores permite concluir que, tendo em vista a variabilidade intrínseca associada às rochas, é perfeitamente adequado utilizar-se corpos de prova com razão H/D mínima de 2,0. Este fato corrobora opiniões semelhantes já emitidas anteriormente por outros autores (Pells e Ferry, 1983; Hawkes e Mellor, 1970). A contribuição deste artigo está no enfoque da variabilidade intrínseca das rochas e sugere-se que seja revisto pela ISRM a recomendação de que o valor 2,5 seja o limite inferior da razão altura/diâmetro para os ensaios de compressão simples, cujo intuito seja apenas a caracterização da resistência.

Quanto aos tipos de ruptura apresentados na Figura 2, embora não conclusivos, destaca-se que a relação H/D = 2,0 mostrou regularidade, através de uma superfície única de ruptura ("cisalhamento").

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AL CHALABI, M. e HUANG, C.L. - *Stress distribution within circular cylinders in compression*. Int. Journal Rock Mech., Min. Sci. Vol. 11, pp. 45-56, 1974.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - NBR 7215 *Cimento Portland - determinação da resistência à compressão*. CB 18, 1991.
- BARROSO, E.V. - *Estudo das características geológicas e comportamento geotécnico de um perfil de intemperismo em leptinito*. Tese de Mestrado, Instituto de Geociências da UFRJ, Rio de Janeiro, 1993.
- BARROSO, E.V.; MARQUES, E.A.G.; CEZAR, G.S. e VARGAS Jr., E.A. - *Caracterização física de gnaiesses intemperizados do Município do Rio de Janeiro*. Cong. Bras. Geol. Eng., 8, ABGE, pp. 49-60, Rio de Janeiro, 1996..
- BIENIAWSKI, Z.T. - *The effect of specimen size on compressive strength of coal*. Int. Journal Rock Mech., Min. Sci, Vol. 5, pp. 325-335, 1968.
- BORDIA, S.K. - *The effects of size and stress concentrations on the dilatancy and fracture of rock*. Int. Journal Rock Mech. Sci. Vol. 8, pp. 629-640, 1971.
- BRADY, B.T. - *Effects of insert on the elastic behavior of cylindrical materials loaded between rough end plates*. Int. Journal of Rock Mech. Min Sci, Vol. 8, pp. 325-335, 1971.
- DOBEREINER, L. - *Engineering geology of weak sandstones London*. Tese para Doutorado, Department of Geology - Imperial College of Science and Technology, 1984.
- DOBEREINER, L. - *Constructions problems related to excavations on soft rocks*. Int. Cong. Soil Mech. Found. Eng., Relato Geral, Rio de Janeiro, 1989.
- HAWKES, I e MELLOR, M. - *Uniaxial testing in rock mechanics laboratories*. Engineering Geology, Vol. 4, pp. 177-285, 1970.

- ISRM - Suggested methods for determining the uniaxial compressive strength and deformability of rock materials. International Society for Rock Mechanics - Committee on Laboratory Tests, 1978.
- KOTTE, J.J.; BERCZES, Z.G.; GRAMBRG, J. e SELDENRATH, T.R. - *Stress strain relations and breakage of cylindrical granitic specimens under uniaxial and triaxial loads*. Int. Journal of Rock Mech. and Min. Sci., Vol. 6, pp. 581-595, 1969.
- LUNDBORG, N - *The strength size relation of granite*. Int. Journal of Rock Mech. and Min. Sci., Vol. 4, pp. 269-272, 1967.
- NUNES, A.L.L. - *Um estudo sobre as características de resistência e deformabilidade de arenitos*. Dissertação para Mestrado em Engenharia Civil - Pontificia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 1989.
- PELLS, P.J.N. e FERRY, M. J. - *Needless stringency sample preparation standards for laboratory testing of weak rocks*. Proc. Int. Cong. Rock Mechanics, 5, Melbourne Section a, pp. 203-207, 1983.
- PENG, S.D. - *Stress within elastic circular cylinders loaded uniaxially and triaxially*. Int. Journal Rock Mech. Min Sci., Vol. 8, pp. 399-432, 1971.
- PRESTES, A - *Aspectos geológico-geotécnicos de um perfil de alteração de gnaiss facoidal*. Dissertação para o Mestrado em Engenharia Civil - Pontificia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 1993.
- RODHE, J. e FENG, H - *Analysis of the variability of unconfined compression tests of rock*. Rock Mech. & Rock Eng., No. 23, pp. 231-236.
- SZLAVIN, J. - *Relationships between some physical properties of rock determined by laboratory test*. - Int. Journal of Rock Mech. and Min. Sciences & Geomech. Abstr., Vol. 11, pp. 57-66, 1974.
- TSIDZI, K.E.N. - *Compressive strength of foliated rocks*. Proc. Symp. on Mechanics of Jointed and Faulted Rock, pp. 421-428, 1990.
- TURK, N. e DEARMAN, W.R. - *A correction equation on the influence of length to diameter ratio on the uniaxial compressive strength of rocks*. Engineering Geology, Vol. 22, pp. 293-300, 1986.
- WIJSK, G. - *The uniaxial strength of rock materials*. Geotechnical Testing Journal, Vol. 3, pp. 115-119, 1980.