



Carlos Alberto Luza Huilca

**Estudo experimental do comportamento geomecânico
do travertino**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Eurípedes do Amaral Vargas Júnior

Rio de Janeiro
Maio de 2014



Carlos Alberto Luza Huilca

Estudo experimental do comportamento geomecânico do travertino

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Civil do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Eurípedes do Amaral Vargas Júnior

Orientador

Departamento de Engenharia Civil - PUC- Rio

Prof. Emilio Velloso Barroso

Universidade Federal do Rio de Janeiro

Erick Slis Raggio Santos

CENPES/Petrobras

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 23 de maio de 2014

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Carlos Alberto Luza Huilca

Graduou-se em Matemática e Engenharia Geológica na UNSA (Universidade Nacional de San Agustín Arequipa–Perú) em 2011. Ingressou no curso de mestrado em engenharia Civil – Geotecnia da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro no ano 2012, desenvolvendo dissertação na linha de pesquisa de Geotecnia Experimental com enfoque na linha de Mecânica das Rochas e Geologia de Engenharia.

Ficha Catalográfica

Luza Huilca, Carlos Alberto

Estudo experimental do comportamento geomecânico do travertino / Carlos Alberto Luza Huilca; orientador: Eurípedes do Amaral Vargas Júnior. – 2014.

149 f.: il. (color.); 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, 2014.

Incluí referências bibliográficas.

1. Engenharia civil – Teses. 2. Travertino 3. Caracterização geomecânica. 4. Resistência. 5. Porosidade. I. Eurípedes do Amaral Vargas Júnior. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. III. Título.

A meus pais Serafín, Justina e irmãos
pelo apoio e confiança.

Agradecimentos

Primeiramente a Deus, por sua presença em cada dia de mi vida, e pela força e coragem concedida durante a realização deste trabalho.

A meus pais Serafín e Justina por todo o carinho, atenção e tempo dedicado na minha formação e educação, sem vocês não teria chegado aonde cheguei.

A meus Irmãos Luz Marina, Edith, María, Patricia, Julio, Cecilia e primos Biviano, Claudio, Pablito e Cipriano pelo exemplo de dedicação e entusiasmo, assim como pelo apoio durante este período de muitas renúncias.

Ao meu orientador Professor Eurípedes do Amaral Vargas Jr. pelo estímulo e parceria na realização deste trabalho.

Ao professor Franklin Antunes, pela amizade e ensinamentos pessoais e profissionais transmitidos ao longo desta pesquisa.

A meus amigos da PUC-rio, em especial a Mirian Escalaya, Ronald Macazana, Francisco Cruz, Gary, Lidia, Perlita, Angela, Rosana e Fredy pelos conselhos, amizade e parceria, verdadeiramente pessoas admiráveis e inesquecíveis.

A meus caros amigos Sugey e Roberto que sempre estiveram prontos a ajudar-me desde meu primer dia no Brasil.

A todos do laboratório de Geotecnia e Estruturas da PUC-rio, em especial aos meus amigos Amaury e Euclides.

Ao pessoal do laboratório de mecânica de rochas e de tomografias de raios –X do CENPES/PETROBRAS, em especial a Flavia, Bete, Erick Slis, Francisco Ferreira, Marcos Soares, Rafael, Igor pela contribuição na realização dos ensaios de microtomografia e as orientações e sugestões na realização dos ensaios uniaxiais e triaxiais.

Ao Dario sua amizade e apoio na reconstituição das imagens do micro-tomógrafo e pelo acesso ao software Mimics 16.0.

Ao Guillermo e ao pessoal do laboratório da firma Martins & Campelo, José Campelo, Johan e Watson pelo apoio e guia durante a realização dos ensaios de

resistência mecânica.

Ao Departamento de Geologia da UFRJ e ao pessoal que labora nesta prestigiosa universidade especialmente ao professor Emilio e a Melissa pela contribuição no ensinamento dos ensaios triaxiais, assim também aos técnicos Tarciso Abreu, Sidney e Osorio, por sua grande competência profissional na elaboração das diferentes amostras usadas nesta pesquisa.

Ao professor Alexandre do Departamento de Geologia da UERJ.

Aos professores da Engenharia Civil da PUC-Rio pelos ensinamentos transmitidos durante estes dois anos de mestrado.

Ao professor Pablo Meza e ao Dr. Fernando Zuñiga y Rivero por seu apoio e motivação na realização do mestrado.

A Rita de Cássia, por sua paciência, apoio e informação brindada durante todo o mestrado.

A CAPES e à PUC-Rio, pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

Enfim, a todos os que de certa forma contribuíram a cumprir este grande objetivo que escolhi.

Muito obrigado.

Resumo

Luza Huillca, Carlos Alberto; Vargas Júnior, Eurípedes do Amaral (orientador). **Estudo experimental do comportamento geomecânico do travertino**. Rio de Janeiro, 2014. 149p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O Travertino é uma rocha amplamente usada no mundo como rocha ornamental, mas suas propriedades petrológicas e mecânicas análogas a rochas carbonáticas de reservatório influenciaram em sua escolha para a compreensão do comportamento geomecânico destas formações. Neste sentido, este trabalho procurou analisar o comportamento geomecânico do Travertino Romano mediante um programa experimental que incluiu uma caracterização da petrologia, da estrutura porosa e do comportamento mecânico da rocha. Foi determinada sua estrutura e textura sedimentar, composição química, mineralógica e índices físicos. Além disso, sua complexa estrutura porosa foi caracterizada por análise de imagens 2D e 3D geradas no microscópio óptico e no micro-tomógrafo de raios-X, com a determinação da presença de macro e micro poros, distribuídos aleatoriamente na rocha com uma baixa conectividade, assim mesmo foi também estabelecida uma relação entre a porosidade e a resistência. Analisaram-se também os resultados dos ensaios de resistência mecânica, que tanto para o estado de tensão uniaxial como triaxial mostraram um decréscimo da resistência com o incremento da porosidade, apresentando um comportamento frágil na maioria dos casos.

Palavras-chave

Travertino; caracterização geomecânica; resistência; porosidade.

Abstract

Luza Huillca, Carlos Alberto; Vargas Júnior, Eurípedes do Amaral (advisor). **Experimental study of the geomechanical behavior of travertine.** Rio de Janeiro, 2014. 149p. MSc. Dissertation - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The Travertine is a rock widely used in the world as an ornamental rock, but their analogous petrological and mechanical properties to carbonate rocks of reservoir influenced his choice to be able to understand the geomechanical behavior of these formations. Thus, this study sought to analyze the geomechanical behavior of Roman Travertine through an experimental program that included a characterization of petrology, the porous structure and mechanical behavior of the rock. Sedimentary structure and texture, chemical, mineralogical composition and physical indexes was determined. Moreover, Its complex porous structure was characterized by analysis of 2D and 3D images generated in the optical microscope and X-Ray micro CT-scanner, with the determination of the presence of macro and micro pores, randomly distributed in the rock with a low connectivity, so it was also established a relationship between the porosity and strength. Also analyzed the test results of mechanical strength, both to the state of uniaxial to triaxial stress showed a decrease in resistance with increasing porosity, with a brittle behavior in most cases.

Keywords

Travertine; geomechanical characterization; strength; porosity.

Sumário

1 Introdução	22
1.1. Objetivos	23
1.2. Organização	23
2 Rochas Carbonáticas	25
2.1.1. Constituintes das Rochas Carbonáticas	26
2.2. Classificação das Rochas Carbonáticas	28
2.2.1. Classificação de Folk	29
2.2.2. Classificação de Riding	31
2.3. O Travertino	33
2.3.1. Classificação do Travertino	34
2.4. Porosidade e Comportamento Mecânico	36
2.4.1. Estrutura Porosa	36
2.4.2. Resistência Mecânica dos Travertinos e sua Relação com a Porosidade	41
2.4.3. Resistência Mecânica e a Deformação	44
2.5. Micro-tomografia Computadorizada de Raios-X	45
3 Material	47
3.1. Material Utilizado	47
3.2. Travertino Romano	47
3.3. Contexto Geológico	48
3.4. Contexto Estratigráfico	50
4 Métodos	53
4.1. Considerações Iniciais	53
4.2. Caracterização Química	53
4.2.1. Fluorescência de Raios-X (XRF)	53
4.2.2. Análise da Química Elementar (EA)	54

4.3. Caracterização Mineralógica	55
4.4. Caracterização Petrológica	56
4.4.1. Preparação das Lâminas Delgadas	56
4.4.2. Análise Petrográfico	57
4.5. Caracterização da Estrutura Porosa	58
4.5.1. Preparação dos Corpos de Prova	58
4.5.2. Análise com Microscópio Eletrônico de Varredura	60
4.5.3. Micro-tomografia Computadorizada de Raios-X	60
4.6. Determinação de Índices Físicos	62
4.7. Caracterização da Resistência Mecânica	63
4.7.1. Equipamentos	63
4.7.2. Ensaios Uniaxiais e Triaxiais	70
5 Resultados	74
5.1. Composição Química	74
5.2. Análise Mineralógica	76
5.3. Análise Macroscópica	76
5.4. Análise com Microscópio Óptico	77
5.5. Análise com Microscópio Eletrônico de Varredura	79
5.6. Estrutura porosa	82
5.6.1. Análise com Microscópio Óptico	82
5.6.2. Análise com Microscópio Eletrônico de Varredura	84
5.6.3. Análise com Micro-tomógrafo de Raios-X	86
5.7. Índices Físicos	94
5.8. Resistência Mecânica	98
5.8.1. Resistência Uniaxial	98
5.8.2. Resistência Triaxial	104
5.9. Correlações	111
6 Conclusões	120
6.1. Sugestões para Trabalhos Futuros	122
7 Referências Bibliográficas	124

Apêndice I Imagens da Microscopia eletrônica de Varredura	130
Apêndice II Imagens 3D do Micro CT e Perfis da Porosidade	132
Apêndice III Corpos de Prova Fraturados	146

Lista de figuras

Figura 2.1 Formas cristalográficas típicas da calcita e dolomita. (Fonte: Ahr, 2008)	25
Figura 2.2 Esparita como material intergranular (esquerda) e Micrita de cor escuro e granulometria mais fina (direita).	26
Figura 2.3 Grãos aloquímicos (fonte: Reveco, 2005; Terra <i>et al.</i> , 2010).	27
Figura 2.4 Subdivisão da Classificação das rochas carbonáticas (Ahr, 2008)	28
Figura 2.5 Classificação gráfica de Folk 1962 (Fonte: Modificado Folk, 1962).	29
Figura 2.6 Espectro textural para sedimentos carbonáticos de Folk 1962 (Fonte: Domingues, 2011).	30
Figura 2.7 Escala de tamanho de grãos para Rochas Carbonáticas de Folk 1962 (Fonte: Modificado Folk, 1962).	31
Figura 2.8 Classificação de Riding: Diagrama triangular MSC, a) dominados pela matriz de suporte: Agglutinated Microbial Reefs, Cluster Reefs, Segment Reefs, Carbonato Mud Mounds. b) dominados pelo suporte esquelético: Frame Reefs. c) dominados pelo cimento de suporte: Cement Reefs (Fonte: Riding 2002).	31
Figura 2.9 Representação esquemática da Classificação das Rochas Carbonáticas de Riding (Fonte: Riding 2002).	32
Figura 2.10 Cement Reefs orgânicos e carbonatos Mud Mound plotados em um Diagrama MSC (Fonte: Riding, 2002).	33
Figura 2.11 Classificação unificada dos travertinos, Pentecost & Viles (1994) (Fonte: Domingues, 2011).	34
Figura 2.12 Tufa calcária (a) e travertino laminado (b).	35
Figura 2.13 Espaços vazios entre os grãos mostrando um corpo de poro e caminhos alongados conectando os poros, que são descritos como gargantas.	37
Figura 2.14 Classificação da porosidade de Choquette & Pray (1970). (Fonte: Modificado Scholle & Scholle, 2003).	38
Figura 2.15 Classificação genética da porosidade em rochas carbonáticas de Ahr 2008 (Fonte: Ahr, 2008).	40

Figura 2.16 Resistência em função da porosidade para diversos travertinos e tufas Carbonáticas (Fonte: Garcia-del-Cura <i>et al.</i> , (2012)).	43
Figura 2.17 Valores do UCS para o travertino em função do peso específico seco (Fonte: Çobanoğlu & Çelik, 2012).	43
Figura 3.1 Esquema da formação do travertino de Tivoli na bacia do Acque Albule pela descarbonização dos calcários do substrato pelas águas Hidrotermais (Fonte: Modificado Filippis <i>et al.</i> , 2013a).	48
Figura 3.2 Mapa geológico de Roma, Itália central, mostrando a localização da cidade de Tivoli, e a bacia do Acque Albule, com o planalto do travertino de Tivoli (Fonte: Modificado Filippis <i>et al.</i> , 2013a).	49
Figura 3.3 configuração das Placas tectônicas no cretáceo superior, mostrando os margens continentais adjacentes durante movimento NW da placa Africana: 84 Ma, o início da formação do cinturão dos Apenninos (Fonte: Handy <i>et al.</i> , 2010).	50
Figura 3.4 Mapa Geológico do planalto do travertino Tivoli e seções transversais dos depósitos do travertino separadas pelas superfícies de erosão S1,S2, S3, S4, S5 (Fonte: Modificado Filippis <i>et al.</i> , 2013b).	51
Figura 3.5 Esquema da sequência estratigráfica da Bacia Acque Albule com seus principais litotipos (Fonte: Modificado Gasparini <i>et al.</i> , 2002).	52
Figura 4.1 Espectrômetro de Fluorescência de Raios X por Energia Dispersiva 800 HS Shimadzu da PUC- Rio.	54
Figura 4.2 Analisador elementar EA 1112 Thermo Eléctron, PUC – Rio.	54
Figura 4.3 Vista do interior do difratômetro D8 DISCOVER BRUKER da PUC- Rio.	55
Figura 4.4 Lâminas delgadas do travertino, direções paralela e transversal à deposição.	56
Figura 4.5 Lupa de mesa e microscópio óptico usados na caracterização petrológica.	57
Figura 4.6 Amostras de mão metalizados em ouro prontas para ser usadas no MEV.	58
Figura 4.7 Preparação dos corpos de prova cilíndricos e cúbicos.	59
Figura 4.8 Corpos de prova Cúbico e cilíndrico retificados.	59
Figura 4.9 Micro – tomógrafo V Tome x L300 da marca GE/Phoenix	

(PETROBRAS/CENPES).	62
Figura 4.10 (a) Saturação do corpo de prova, (b) corpo de prova sendo pesado com membrana.	63
Figura 4.11 célula triaxial fechada sem instrumentação no corpo de prova, mostrando os componentes do corpo principal e tampa.	64
Figura 4.12 Esquema da célula triaxial aberta, mostrando seus componentes principais, 1. Corpo principal da tampa com fechamento rápido, 2. Came positivo de travamento rápido, 3. Came negativo de travamento rápido, 4. Conjunto de conectores elétricos e conexões hidráulicas, 5. Resistências para o aquecimento do fluido de confinamento, 6. Corpo de prova, 7. Cap inferior com três hastes de centralização, 8. Haste de carregamento axial, 9. Corpo principal da Célula triaxial.	65
Figura 4.13 Pressurizadores para o carregamento axial (esquerda) e lateral (direita)	66
Figura 4.14 Corpo de prova instrumentado com Clip gage de deslocamento radial e axial.	67
Figura 4.15 Curvas de calibração dos clip gage de deslocamento axial e radial (canal-0 e canal-1) usados nos ensaios.	68
Figura 4.16 Unidade eletro-hidráulica (esquerda) e skid com a tampa da Célula triaxial (direita).	69
Figura 4.17 Tela do software e Unidade de controle e monitoração.	70
Figura 5.1 Espectros da Fluorescência de raios-X da amostra M1, M2, M3.	75
Figura 5.2 Difractograma das amostras de travertino analisadas (calcita: Ca).	76
Figura 5.3 Porosidade Vugular, fenestral e framework com dimensões milimétricas a centimétrica, se observa a pouca interconectividade dos poros tipo vugular.	77
Figura 5.4 Poro mostrando a calcita espática na superfície, e Micrita de uma cor cinza escuro.	78
Figura 5.5 (a) Garganta com calcita espática de cristais isométricos e Micrita com uma textura microcristalina de aspecto grumoso. (b), (c) Calcita microcristalina na forma de fibras ou de aspecto plumoso.	78
Figura 5.6 Calcita cristalizada na superfície dos poros.	79
Figura 5.7 (a) Calcita espática formada por cristais de calcita. (b) Micrita ou	

calcita microcristalina sem grãos cimentados.	80
Figura 5.8 Área (1) e ponto (2) analisados no EDS	80
Figura 5.9 Resultados do EDS mostrando a distinta composição do travertino	81
Figura 5.10 Fácies massiva e bandeada presentes no travertino.	82
Figura 5.11 (a) (b) corte transversal dos poros conectados e garganta na direção da deposição, (b) porosidade intercristalina na calcita espática.	83
Figura 5.12 Distribuição dispersa e geometria irregular dos poros do tipo fenestral e vugular observadas pelo microscópio óptico.	83
Figura 5.13 Poros conectados por gargantas de diferentes larguras e uma ampliação da garganta de menor largura.	84
Figura 5.14 Porosidade intercristalina formada pelos grãos de calcita.	84
Figura 5.15 Poros tipo Intrapartícula localizados dentro dos cristais de calcita de forma irregular e sem nenhum material preenchendo os poros.	85
Figura 5.16 Elementos da estrutura porosa observada pelo MEV, poros e garganta dos poros de forma irregular e distribuição dispersa.	86
Figura 5.17 Porosidade fenestral vista no MEV.	86
Figura 5.18 Imagens tomográficas de um corpos de prova cúbicos e cilíndrico.	87
Figura 5.19 Perfil da porosidade ao longo do corpos de prova TR1.	89
Figura 5.20 Distribuição do tamanho dos poros.	90
Figura 5.21 Plugues NX (54 mm) com poros maiores aos registrados no microtomógrafo.	90
Figura 5.22 Estrutura porosa e sólido dos CP TR5 e C6, reconstituída no programa Avizo Fire 8.0.	91
Figura 5.23 Sólido e estrutura porosa dos CP TR2 e C2, reconstituída no programa Mimics 16.0.	91
Figura 5.24 Imagem 3D e perfil mostrando a variação da porosidade no interior do CP TR 2.	92
Figura 5.25 Imagem 3D e perfil mostrando a variação da porosidade no interior do CP C 2.	92
Figura 5.26 Objeto sólido criado no Mimics 16.0 mostrando a conectividade dos poros.	93
Figura 5.27 porosidade obtida na reconstituição da imagem 3D convertida a voxels.	93

Figura 5.28 Relação dos valores da porosidade do processamento de imagem J e do Mimics.	94
Figura 5.29 Gráfico da massa específica seca em função da porosidade, obtidos na determinação dos índices físicos.	96
Figura 5.30 Comparação dos valores da porosidade obtidos experimentalmente (porosidade efetiva) e nos programas Image J e Mimics.	97
Figura 5.31 Correlações entre a porosidade efetiva (experimental) e a porosidade do processamento das imagens do micro-tomógrafo.	97
Figura 5.32 Corpos de prova testados com (TR3) e sem (TR13) a massa corrida preenchendo os poros.	99
Figura 5.33 (a) Curva tensão axial versus deformação axial dos ensaios de resistência uniaxial, (b) Deformação volumétrica em função da deformação axial.	100
Figura 5.34 Corpo de prova TR 3 depois do ensaio de compressão uniaxial, com ruptura tipo fendilhamento acompanhada de colapso dos poros.	102
Figura 5.35 Corpo de prova TR 9 fraturado devido ao colapso de poros durante o ensaio de resistência uniaxial.	102
Figura 5.36 Classificação da rocha intacta de Deere & Miller (1966)	103
Figura 5.37 Membrana furada e poros colapsados no corpo de prova TR 12.	104
Figura 5.38 Variação do módulo elástico com a deformação axial.	105
Figura 5.39 (a) Curvas tensão desviadora versus deformação axial, (b) Curva deformação volumétrica versus a deformação axial.	106
Figura 5.40 Corpos de prova TR5 e TR6 fraturados	107
Figura 5.41 Círculos de Mohr e envolventes de ruptura de Mohr Coulomb (verde) e Hoek & Brown (vermelha) plotados no espaço τ vs σ no programa RocData 3.0.	108
Figura 5.42 Envoltórias de Mohr - Coulomb e Hoek & Brown no espaço σ_1 vs σ_3 obtidas dos ensaios triaxiais e uniaxiais.	109
Figura 5.43 Envoltória de ruptura de Kim & Lade para o travertino.	109
Figura 5.44 Influência do confinamento e da porosidade na resistência da rocha.	110
Figura 5.45 Faixa da variação da envoltória de ruptura.	111
Figura 5.46 Influência da porosidade na resistência uniaxial	112

Figura 5.47 Distribuição do tamanho dos poros para o CP TR2, com porosidade menor a 10 %.	112
Figura 5.48 Propagação da fratura no ensaio de resistência mecânica.	113
Figura 5.49 Massa específica seca em função da porosidade.	114
Figura 5.50 Resistência uniaxial em função da massa específica seca.	114
Figura 5.51 Gráficos do módulo de Young em função da porosidade.	115
Figura 5.52 Gráficos de correlação do módulo razão em função da porosidade.	116
Figura 5.53 Gráficos de correlação do módulo de Young em função da resistência.	116
Figura 5.54 Gráficos de correlação da Resistência uniaxial em função da porosidade de diferentes pesquisas.	117
Figura 5.55 Correlações da Resistência uniaxial em função da massa específica seca de diferentes pesquisas.	118

Lista de tabelas

Tabela 2.1 Comparação da porosidade dos arenitos e calcários (Rodriguez, 2006).	41
Tabela 2.2 Estruturas, texturas e tipos de poros mais representativos dos travertinos e tufas Garcia-del-Cura <i>et al.</i> (2012).	42
Tabela 4.1 Processamento das imagens de micro CT para determinar a porosidade usando o programa Image J.	61
Tabela 4.2 Especificações técnicas dos extensômetros axial e radial.	68
Tabela 4.3 Procedimento estabelecido para a montagem do corpo de prova e a preparação da célula triaxial para os ensaios uniaxiais e triaxiais.	71
Tabela 4.4 Distribuição do tipo de ensaio, tensão confinante e taxa de carregamento a ser aplicado em cada um dos corpos de prova.	73
Tabela 5.1 Composição química do travertino Romano.	74
Tabela 5.2 Resultados da difração de raios-X, mineralogia do travertino.	76
Tabela 5.3 Porosidade média obtida das imagens do micro CT.	88
Tabela 5.4 Tipo de poros de acordo a seu diâmetro (Fonte: Modificado Knackstedt <i>et al.</i> , 2006).	89
Tabela 5.5 Valores da porosidade determinada no programa Mimics	94
Tabela 5.6 Propriedades físicas do travertino.	95
Tabela 5.7 Resultados dos ensaios de resistência uniaxial e módulos elásticos e módulo razão	99
Tabela 5.8 Resultados dos ensaios triaxiais, parâmetros elásticos e porosidade.	104
Tabela 5.9 Parâmetros dos critérios de ruptura Mohr-Coulomb, Hoek-Brown e Kim-Lade.	108
Tabela 5.10 Parâmetros para os limites das envolventes de ruptura superior e inferior do travertino.	110
Tabela 5.11 Equações de regressão e índices de correlação da resistência uniaxial em função da porosidade de diferentes estudos.	118
Tabela 5.12 Equações de regressão e índices de correlação da resistência uniaxial em função da massa específica seca de diferentes estudos.	119

Lista de Abreviaturas

ASTM	American Society for Testing and Materials.
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
SAE	American Iron and Steel Institute
EA	Análise da química elementar.
CENPES	Centro de Pesquisa da Petrobras
CP	Corpo(s) de prova.
DCMM	Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia.
EDS	Energy dispersive x-ray detector
XRF	Fluorescência de Raios-X.
FE	Fundo escala
FE BSL	Fundo escala baixa frequência de aplicação de pressão
H & B	Hoek & Brown
LACQ	laboratório de Laboratório de Análise e Caracterização Química
Ltda.	Limitada.
MEV	Microscópio eletrônico de varredura ou microscopia eletrônica de varredura.
micro CT	Micro-tomografia computadorizada de raios-X
Ma	milhões de anos.
M - C	Mohr-Coulomb
NBR	Norma Brasileira
PUC Rio	Pontifícia Universidade Católica de Rio de Janeiro.
psi	Pounds per Square Inch
ISRM	Society International of Rock Mechanics.
Conf.	Tensão confinante
UCS	Uniaxial Compressive Strength
UERJ	Universidade Estadual de Rio de Janeiro
UFRJ	Universidade Federal de Rio de Janeiro
Volt.	Voltagem

Lista de Símbolos

H ou h	Altura
Al	Alumínio
ϕ	Ângulo de atrito interno do material
2θ	Ângulo de difração
atm	Atmosfera
cm	Centímetros
ν	Coeficiente de Poisson
c	Coesão
D ou d	Diâmetro
S	Enxofre
Sr	Estrôncio
Fe	Ferro
GPa	Gigapascal
H	Hidrogênio
kgf	Kilograma força
kN	Kilonewton
kPa	Kilopascal
kV	Kilovoltio
E	Leste
Mg	Magnésio
γ_s	Massa específica seca aparente
γ_{teo}	Massa específica teórica
M_{sat}	Massa saturada
M_{seca}	Massa seca
MN	Meganewton
MPa	Megapascal
m	Metro
μm	Micrometros.
mm	Milímetro
mV	Milivoltios

min	Minuto
E	Módulo elástico
N	Nitrogenio
N	Norte
Nº	Número
W	Oeste
m_i, s, a	Parâmetros da rocha intacta do critério de Hoek & Brown
m, n	Parâmetros do critério de Kim & Lade simplificado
"	Polegadas
%	Porcentagem
$n\%$	Porosidade
K	Potásio
p_a	Pressão atmosférica
I_1	Primeiro invariante de tensão
km	Quilômetros
C_o	Resistência uniaxial
K	Rigidez
s	Segundos
Si	Silicio
Na	Sódio
S	Sul