

Comportamento de Rochas Sob Carregamento Cíclico em Ensaios de Compressão

Matheus Montes Pimenta

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, mathpime@gmail.com

André Cezar Zingano

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, andrezin@ufrgs.br

Fernando Alves Cantini Cardozo

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, fernando.cantini3@hotmail.com

RESUMO: Compreender as propriedades físicas e mecânicas de rochas em laboratório é um dos estudos fundamentais em projetos de engenharia. Com o objetivo de caracterizar a resistência e deformabilidade em diversos tipos de rochas, ensaios de compressão uniaxial e triaxial com diferentes pressões confinantes foram realizados observando-se o efeito dos ciclos de carregamento e descarregamento no comportamento das rochas. Foram analisados parâmetros como a relação entre curva tensão-deformação, módulo de elasticidade, deformação total e influência do pré-carregamento e pressão confinante na deformação e resistência à compressão das amostras. Os resultados mostram que rochas duras, como o Itabirito, apresentam comportamento frágil e tornam-se mais resistentes com o aumento da pressão confinante, enquanto rochas brandas, como o siltito, tornam-se dúcteis mesmo sob baixas pressões de confinamento. Também foi observado que ao final de cada ciclo de descarga e recarga ocorre uma deformação plástica comparada à curva inicial de carregamento e em alguns casos, o módulo de elasticidade difere consideravelmente em diversos estágios da deformação.

PALAVRAS-CHAVE: Ensaio de Compressão Uniaxial, Triaxial, Cíclico, Módulo de Elasticidade.

1 INTRODUÇÃO

Compreender as propriedades físicas e mecânicas de rochas em laboratório é um dos estudos fundamentais em mecânica das rochas. A influência da relação altura/diâmetro e tamanho dos corpos de prova tem sido amplamente discutido na literatura geotécnica, o que é chamado de efeito de escala na resistência das rochas, sendo aceito que existe uma significativa redução na resistência com o aumento do tamanho da amostra, também já foi discutido que o contrário é válido (Peng e Zhang, 2007). As propriedades mecânicas de rochas, como tensão de ruptura, ângulo de ruptura e ductibilidade são funções da temperatura, taxa de deformação e estado de tensões sobre a rocha (Paterson e Wong, 2005), e desde o trabalho pioneiro de Adams e Nicolson (1901 *apud* Mogi, 2007) muitos experimentos tem sido feitos

usando os testes convencionais de compressão uniaxial e triaxial para discutir como estes fatores influenciam na determinação de suas propriedades geomecânicas. O estudo da deformabilidade das rochas é bastante relevante nos problemas de engenharia. Nos projetos envolvendo fundações de barragens sobre um maciço formado por vários tipos de rocha, com diferentes propriedades de deformabilidade, ocorrem tensões de cisalhamento e de tração devidas aos diferentes valores de deflexão da fundação. Em projetos de túneis, o conhecimento da expansão da cavidade é de fundamental importância, sobretudo na definição do suporte e revestimento (Goodman, 1989). Motivado em pesquisas anteriores de caracterização das propriedades físicas e mecânicas de rochas em laboratório, este trabalho propõe o estudo do efeito de ciclos de carga e descarga, no comportamento mecânico de rochas, em ensaios

de compressão uniaxial e triaxial para diversas pressões confinantes.

2 PROPRIEDADES DE DEFORMABILIDADE DAS ROCHAS

Deformabilidade significa a capacidade da rocha se deformar quando submetida a ação de um carregamento ou descarregamento. Sua determinação em laboratório segue os mesmos métodos utilizados na medida da resistência em rocha intacta e pode ser classificada em deformação elástica ou plástica (permanente). Constantes elásticas e plásticas estão associadas com a descrição de diversas propriedades mecânicas, como módulo de deformação permanente, módulo de elasticidade, módulo volumétrico, coeficiente de Poisson, tensão de escoamento, tensão de ruptura, etc.

Neste trabalho é abordado apenas o módulo de elasticidade (E), um parâmetro mecânico que proporciona uma medida de rigidez e corresponde ao coeficiente angular da parte linear da curva tensão-deformação; e mesmo quando a curva não apresenta proporcionalidade, o valor de E (GPa), segundo o método da tangente, especifica-se por uma porcentagem fixa da tensão de pico, geralmente 50%, isto é:

$$E = \frac{\sigma_{c(50)}}{\varepsilon_{a(50)}} \quad (2)$$

onde $\sigma_{c(50)}$ é a tensão em 50% da tensão de pico e $\varepsilon_{a(50)}$ é a deformação axial em $\sigma_{c(50)}$.

3 ENSAIOS DE COMPRESSÃO

3.1 Ensaio de compressão uniaxial

É o teste mais frequentemente utilizado no estudo de mecânica das rochas na determinação da sua resistência, deformabilidade e constantes elásticas. Dados de compressão simples ainda são a base de muitas classificações de maciços rochosos (Azevedo e Marques, 2002).

Neste ensaio, corpos de prova em forma cilíndrica são comprimidos paralelamente ao seu

eixo longitudinal. A resistência à compressão uniaxial (UCS) (MPa) é expressa segundo a seguinte relação:

$$UCS = \frac{P_{\max}}{A} \quad (1)$$

onde $P_{\max}$ (KN) é o máximo carregamento exercido sobre a amostra (carga de ruptura) e A (mm^2) é a área da seção transversal da amostra.

3.2 Ensaio de compressão triaxial

Neste ensaio a tensão principal maior (σ_1) é aplicada ao longo do eixo de um corpo de prova cilíndrico (compressão axial) e a tensão principal média (σ_2) e menor (σ_3) são aplicadas lateralmente à amostra exercendo uma pressão confinante (compressão radial). Este é o teste mais útil no estudo das propriedades mecânicas de rochas (Jeager *et al*, 2007) e pode ser usado para determinar além das constantes elásticas e resistência à compressão, ângulo de atrito interno e coesão a partir do critério de ruptura de Mohr-Coulomb.

O efeito da tensão de confinamento é obtido por meio da aplicação de óleo sob pressão em uma câmara triaxial, onde é colocada a amostra de rocha envolvida por uma membrana impermeável. Esta célula triaxial forma o conjunto amostra/câmara sugerido por Hoek e Franklin em 1968 (Hoek e Brown, 1980).

Nos ensaios realizados neste trabalho, duas das três tensões principais são iguais, sendo assim $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3 > 0$.

4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Os ensaios cíclicos de compressão foram realizados segundo especificações das normas ASTM Internacional e as recomendações da Sociedade Internacional de Mecânica das Rochas (ISRM) em prensa servo controlada, com capacidade máxima de 2000 KN e taxa de carregamento constante, conforme mostra a Figura 1. As deformações axiais foram medidas através de Transformadores Diferenciais Lineares Variáveis (LVDT), com curso máximo de 11 mm. Os corpos de prova eram cilíndricos, apresentavam relação altura/diâmetro média

igual a 2 e foram comprimidos em sucessivos carregamentos cíclicos.



Figura 1. Prensa servo-controlada da marca Controls utilizada nos ensaios de compressão triaxial e uniaxial.

A pressão aplicada sobre o corpo de prova para cada ciclo de carga e descarga correspondia de 20-30% da resistência à compressão da amostra (baseado em conhecimento prévio), e em diferentes estágios da deformação a pressão aplicada era reduzida à praticamente zero e após isso, um ciclo de carga iniciava novamente até que fosse atingido a tensão de ruptura.

As rochas utilizadas nos ensaios foram Itabirito, Arenito, Siltito, Quartzito e Calcário Calcítico. Algumas amostras estavam sob forma de testemunho de sondagem, outras sob forma de blocos, que foram extraídas com uma perfuratriz diamantada e posteriormente, as faces foram serradas perpendicularmente ao eixo do corpo de prova. O número de amostras, diâmetro médio do corpo de prova e a carga média para cada ciclo de carregamento classificado por rocha é mostrado na Tabela 1.

Tabela 1. Informações das rochas utilizadas nos ensaios.

Rocha	Nº de amostras	Diâmetro (mm)	Carga/ciclo (MPa)
Itabirito	9	50	100
Arenito	3	36	50
Siltito	7	47	25
Quartzito	8	47	80
Calcário	4	55	60

4 RESULTADOS

4.1 Relação tensão-deformação

Na discussão da deformação de rochas sob compressão, é necessário dividir a tensão em duas partes: (1) tensões não-desviadoras ($\sigma_{\text{méd}}$)

são compressões aplicadas igualmente em todas as direções, tratando-se de um estado hidrostático de tensões; (2) tensões desviadoras (σ_{dev}) são os esforços normais e de cisalhamento, diminuídos dos esforços hidrostáticos, são estas tensões responsáveis por deformação e destruição de rochas, enquanto tensões não-desviadoras geralmente não causam deformações (Fiori e Carmignani, 2001).

As curvas tensão-deformação de alguns dos ensaios cíclicos realizados sob diversas tensões confinantes são apresentados na Figura 2. O eixo das ordenadas é a tensão diferencial compressiva ($\sigma_1 - \sigma_3$), o eixo das abscissas a deformação (ε) e a pressão confinante σ_3 é dada para cada curva.

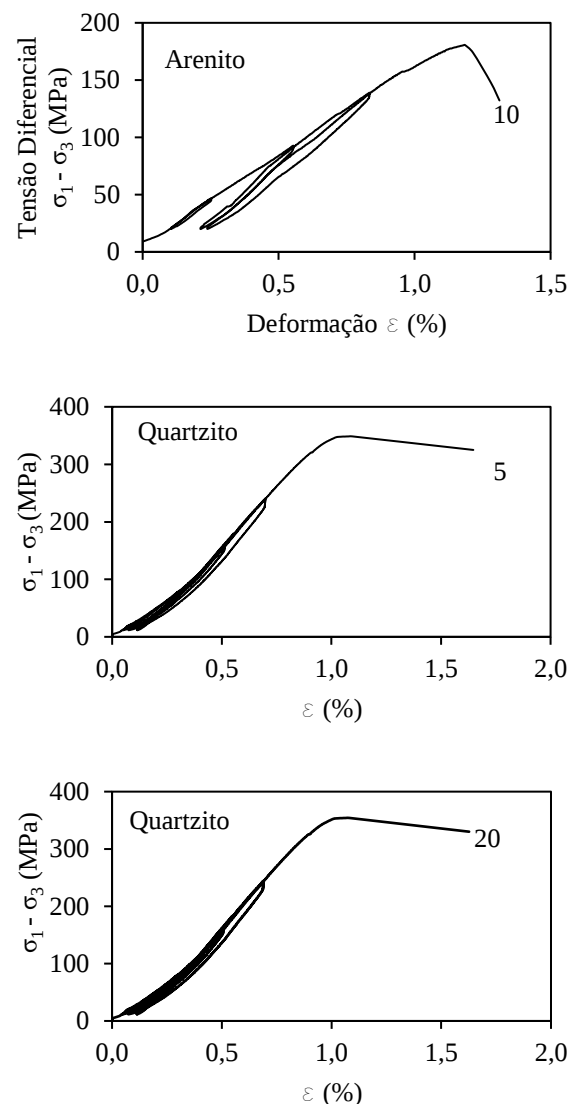


Figura 2. Curva tensão-deformação dos ensaios de compressão sob carregamento axial cíclico para vários tipos de rochas; pressão confinante em MPa é dada para cada curva.

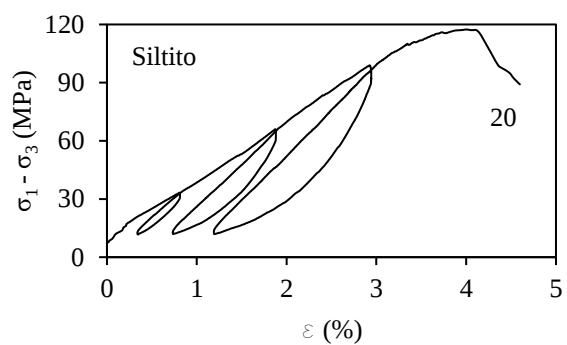
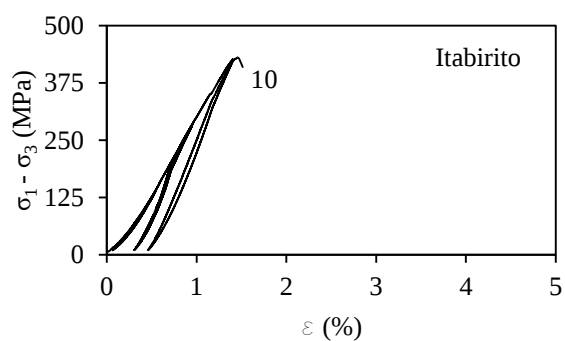
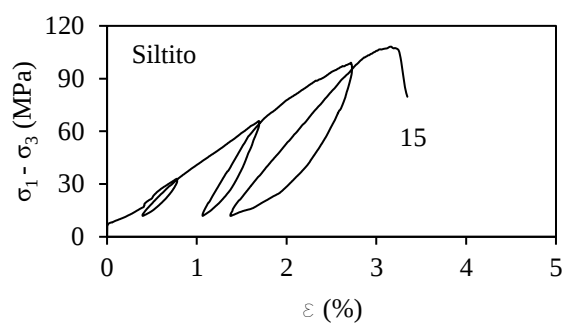
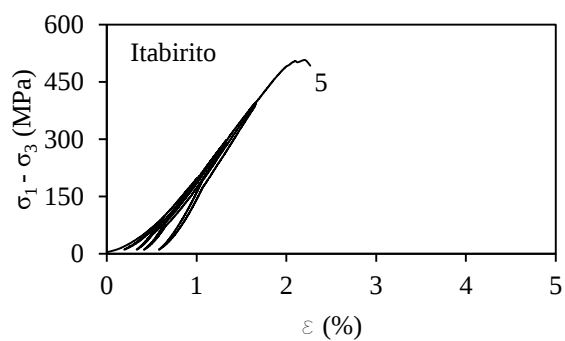
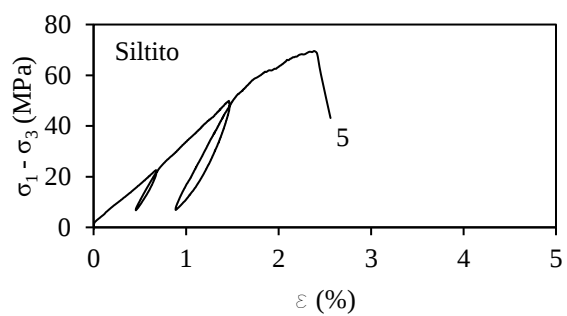
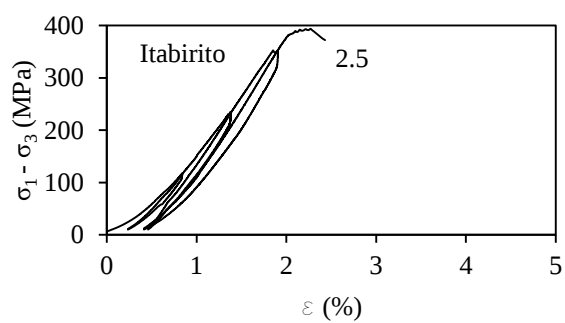
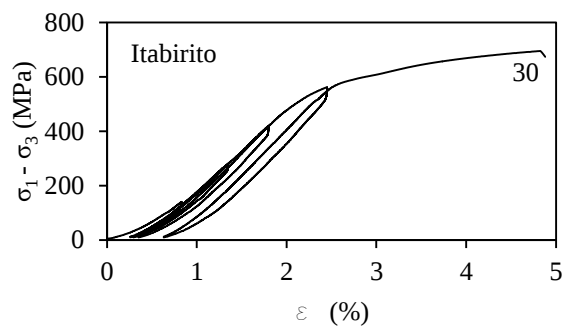
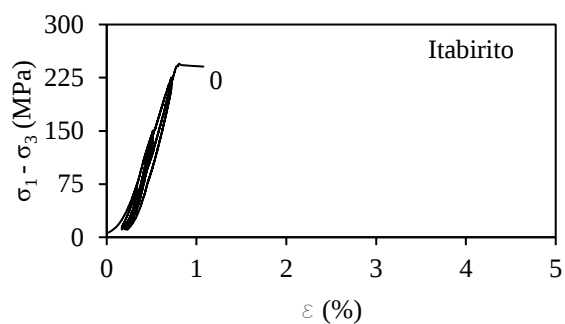
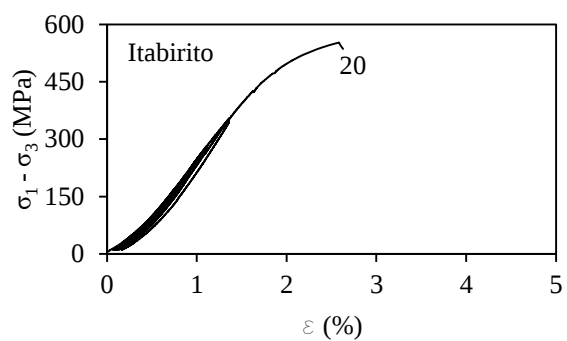
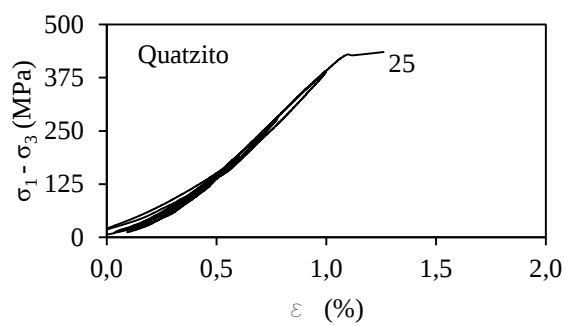


Figura 2. Continuação.

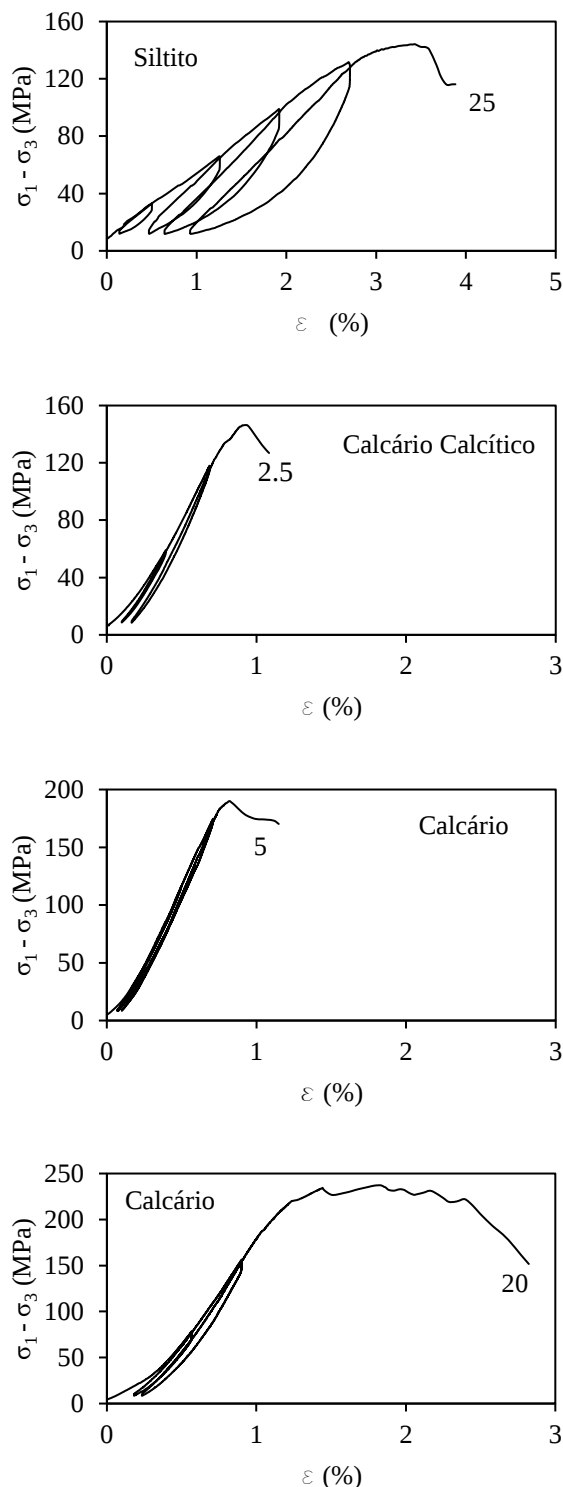


Figura 2. Continuação.

Os resultados mostram que rochas duras, como o Itabirito e Quartzito, são muito frágeis e rompem mesmo sob baixas deformações, e tornam-se mais fortes com o aumento da pressão confinante, enquanto rochas brandas, como o Siltito, tornam-se dúcteis mesmo sob altas ou baixas pressões de confinamento.

Na fase inicial da deformação, em que a rocha

apresenta comportamento elástico, foi observado que ao final de cada ciclo de descarga e recarga ocorre uma deformação permanente comparada à curva inicial de carregamento e em muitos casos, o módulo de elasticidade difere consideravelmente em diversos estágios da deformação.

O comportamento rúptil de rochas, é caracterizado por uma mudança súbita na inclinação da curva tensão-deformação próxima ao ponto de escoamento, seguido por uma completa perda de coesão ou acentuada queda na tensão de compressão, isto foi observado nos ensaios de Itabirito, Quartzito e Calcário (que também apresentou uma curva de resistência residual na amostra com $\sigma_3 = 20$ MPa).

Com o aumento da pressão confinante, o rápido declínio na capacidade de carga após a tensão de escoamento torna-se cada vez menos acentuado, e é atingido um estágio conhecido como transição rúptil-dúctil, e a rocha passa a ter comportamento plástico, como observado no ensaio de Itabirito com $\sigma_3 = 30$ MPa. Nesta fase a amostra continua a se deformar sem acréscimo significativo no valor da tensão.

O comportamento dúctil, observado no Siltito e Arenito, é caracterizado pela curva tensão-deformação não apresentar alteração súbita ou inclinação descendente próxima ao ponto de escoamento, resistindo a grandes deformações.

4.2 Relação entre resistência e pressão confinante

A maioria das rochas sofre enrijecimento pelo confinamento, principalmente aquelas altamente fissuradas (Azevedo e Marques, 2002). Este efeito do enrijecimento e o fato de que à medida que cresce a pressão confinante, a expansão radial da rocha é impedida, diminuindo sua deformabilidade, implicam no aumento significativo da resistência à compressão com o aumento da pressão confinante.

Os resultados dos ensaios mostram que com o aumento da pressão confinante, as rochas apresentam capacidade de resistir a maiores cargas apresentando menores deformações, e a ductibilidade permite atingir maiores deformações permanentes sem que haja ruptura.

A relação entre resistência e pressão confinante é mostrada graficamente na Figura 3.

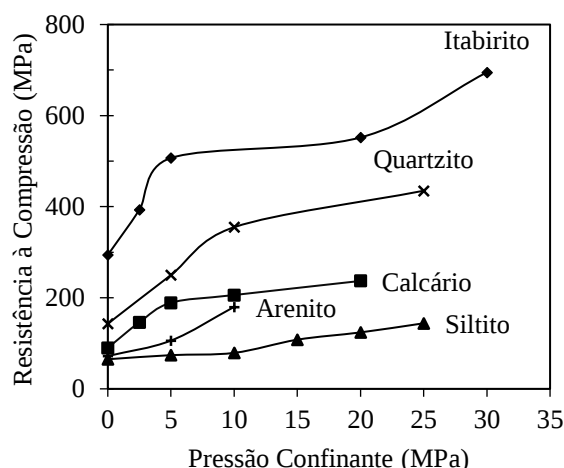


Figura 3. Relação entre resistência à compressão e pressão confinante.

4.3 Módulo de elasticidade

A Figura 4 mostra a análise da relação entre módulo E e deformação total (ε) para diferentes pressões confinantes. De acordo com os resultados, módulo de elasticidade difere consideravelmente para diferentes estágios da deformação. Em rochas compactas duras, como o Quartzito ou Calcário, o módulo E mantém-se praticamente constante ou apresenta pouca variação, enquanto que o Siltito, geralmente diminui com o aumento da deformação. A diminuição do módulo E com o aumento da deformação, é atribuída ao microfaturamento da rocha, enquanto que o aumento do módulo E , sob alta pressão confinante, pode ser atribuído pela compactação das fraturas da rocha.

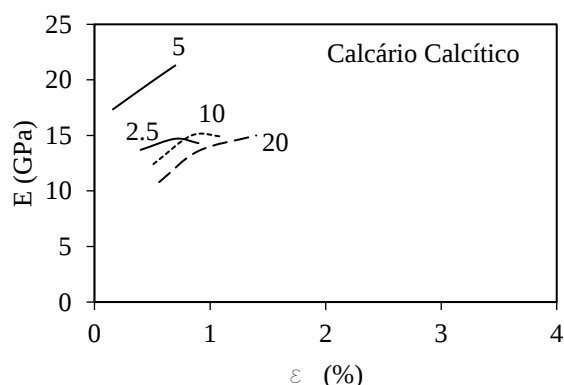


Figura 4. Relação entre módulo de elasticidade (E) e deformação total (ε). Pressão confinante em MPa é dada para cada curva.

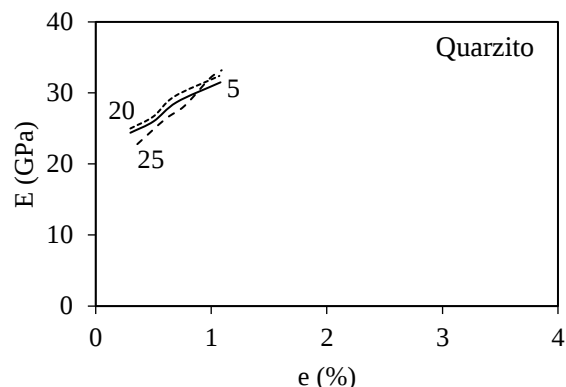
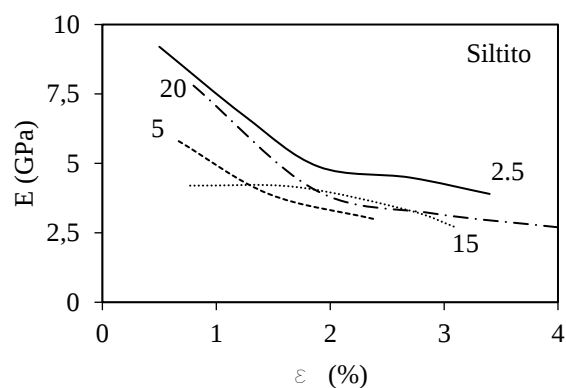


Figura 4. Continuação.

A relação entre módulo de elasticidade e pressão confinante (σ_3) para cada ensaio é mostrada na Figura 5.

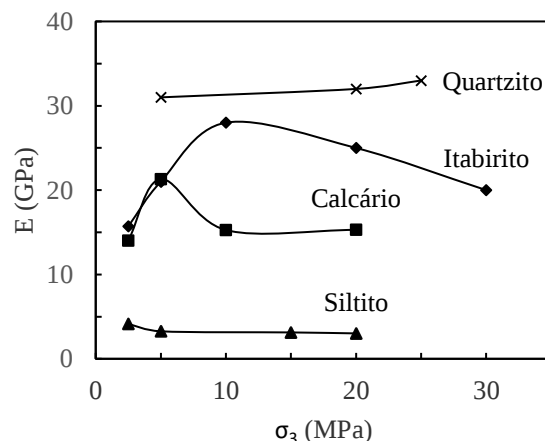


Figura 5. Relação entre módulo de elasticidade (E) e pressão confinante (σ_3).

Os resultados mostram que o Quartzito (rocha mais compacta) apresenta o maior módulo E , é praticamente constante e aumenta suavemente com o aumento da pressão confinante. O Siltito (rocha mais dúctil) possui o menor módulo, e também é praticamente constante. Normalmente

o módulo E aumenta com a pressão confinante, e as variações presentes nas amostras de Calcário e Itabirito podem ser atribuídas à estrutura cristalina ou mecânica do corpo de prova especificamente.

4.4 Deformação permanente

A deformabilidade de rochas sob compressão é parcialmente elástica e parcialmente plástica. A deformação elástica é definida como a recuperação da deformação durante a curva de descarregamento, em que o corpo de prova é descomprimido até a tensão diferencial próxima a zero, ou a diferença entre a deformação total (ε) e permanente, e a deformação permanente (ε_p) é definida como uma deformação não recuperada; esta plasticidade pode ocorrer devido à microfraturamentos, fissuração, fechamento dos poros, dilatância, compressão dos grãos, etc.

A relação entre deformação permanente e deformação total em função da pressão confinante é apresentada na Figura 6.

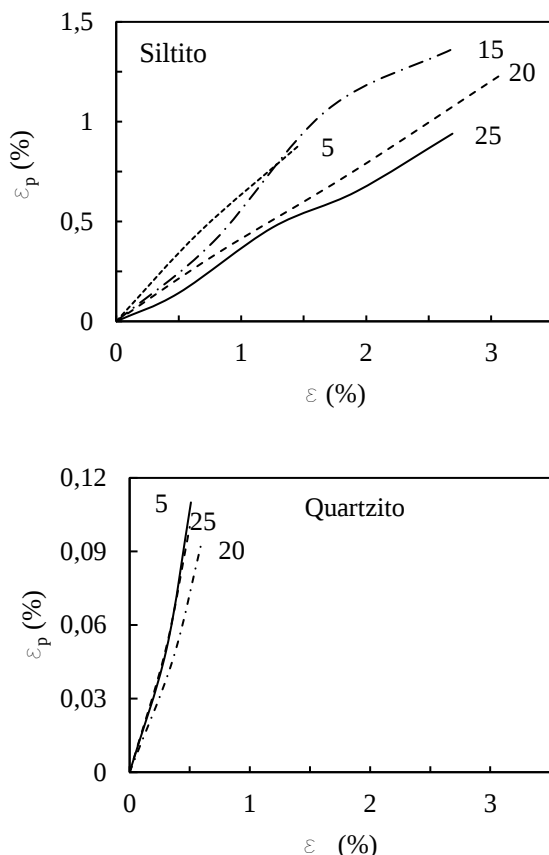


Figura 6. Relação entre deformação permanente e deformação total. σ_3 em Mpa é dado para cada curva.

Os resultados mostram que a ε_p é observada logo no início da deformação em vários ensaios. No Quartzito (rúptil), a relação $\varepsilon_p/\varepsilon$ é muito baixa (10-15%), conclui-se que é praticamente elástica e apresenta-se sempre próxima a fase linear da curva tensão-deformação. No Siltito (dúctil), a relação $\varepsilon_p/\varepsilon$ é alta independente da tensão confinante ($>60\%$) e ε_p aumenta continuamente. Quanto maior a pressão confinante, maior a capacidade de deformação da rocha até atingir a carga de ruptura (discutido na seção 4.3).

4.5 Influência do pré-carregamento

Conforme visto nas curvas tensão-deformação dos ensaios com carregamento cíclico (Fig. 2), o módulo de elasticidade e a plasticidade são afetados por compressão e deformação prévios, e a cada ciclo de compressão-descompressão, a curva de recarga geralmente diverge da curva virgem ou do ciclo de carregamento anterior e além disso, em alguns casos este histórico de deformação também é capaz de influenciar na resistência à compressão uniaxial da rocha.

A Figura 7 apresenta o efeito do pré-carregamento na resistência à compressão uniaxial em um conjunto de amostras de Itabirito. São apresentadas a curva tensão-deformação (1) do corpo de prova virgem e a curva (2) do corpo de prova previamente comprimido axialmente em 20 MPa até 0,1% de deformação e reensaiado após um período de 24 horas em repouso.

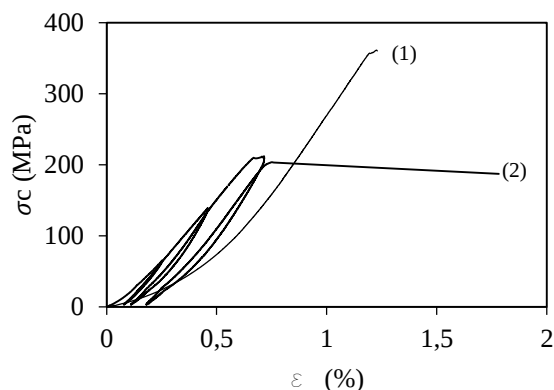


Figura 7. Curvas tensão-deformação dos ensaios de compressão uniaxial do Itabirito. (1) amostra virgem; (2) amostra pré-carregada sob pressão axial de 20 MPa.

Os resultados mostram que a curva (2) apresenta transição elastoplástica durante o escoamento e a carga de ruptura ocorre ligeiramente abaixo da tensão de pico, enquanto que a curva (1) apresenta proporcionalidade entre a tensão e deformação, ou seja, é linearmente elástica, suporta carga compressiva muito maior para deformações menores sem indicar plasticidade e subitamente rompe, caracterizando seu caráter rúptil. Além disso, a amostra previamente comprimida apresenta resistência à compressão uniaxial (UCS = 212 MPa) significativamente menor do que a amostra virgem (UCS = 361 MPa), isto pode ocorrer devido ao surgimento de deformações e fissuras permanentes durante o pré-carregamento.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A deformabilidade das rochas não é completamente elástica, e de maneira geral, não deve ser caracterizada somente por constantes elásticas, visto que várias rochas tem comportamento elástico no laboratório e no campo podem apresentar plasticidade (devido à fissuras, fraturas, planos de acamamento, etc).

Comparados aos ensaios tradicionais, os ensaios cíclicos mostraram-se representativos às situações reais de variação no estado de tensões, como no caso de túneis ou taludes expostos a ondas de compressão e descompressão durante operações de desmonte com explosivos.

Os fenômenos observados tem aplicação importante na construção de modelos numéricos, pois a atribuição de parâmetros fixos pode desconsiderar o comportamento elastoplástico e variabilidade das propriedades das rochas, que sofrem influência na rigidez e propriedades mecânicas conforme o histórico de deformação.

Em trabalhos futuros outras rochas e novos parâmetros como porosidade, demais constantes elásticas e velocidade das ondas sísmicas P e S serão incluídos nas análises.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Professor André Cezar Zingano, do Departamento de Engenharia de Minas (Demin) da UFRGS pela orientação.

Ao Demin/UFRGS, ao Laboratório de Pesquisa Mineral e Planejamento Mineiro (LPM) pela estrutura oferecida durante a realização deste trabalho.

À Fundação Luiz Englert (FLE) pelo apoio irrestrito à promoção da pesquisa, educação e cultura, pelo investimento em bolsas de Iniciação Científica aos estudantes.

Dedicamos este trabalho aos nossos familiares, pelas muitas horas substituídas do convívio familiar, e, especialmente, aos amigos do laboratório de mecânica das rochas pela ajuda na preparação das amostras e realização dos ensaios.

REFERÊNCIAS

- Azevedo, I.C.D. e Marques E.A.G. (2002) *Introdução à Mecânica das Rochas*, Cadernos Didáticos 85, Editora UFV, Viçosa, 363 p.
- Brown, E.T. (ed) (1981) *Rock Characterization, Testing and Monitoring – ISRM Suggested Methods*, Pergamon Press, Oxford, UK, 211 p.
- Fiori, A.P. e Carmignani, L. (2001) *Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas: aplicações na estabilidade de taludes*, Editora da UFPR, Curitiba, 550 p.
- Goodman, R.E. (1989) *Introduction to Rock Mechanics*, 2nd ed, John Wiley & Sons, New York, USA, 562 p.
- Hoek, E. e Brown, E.T. (1980) *Underground Excavations in Rock*, IMM, London, UK, 527 p.
- Jaeger, J.C, Cook, N.G.W. e Zimmerman, R.W. (2007) *Fundamentals of Rock Mechanics*, 4th ed, Blackwell Publishing Ltd, Malden, MA, USA, 475 p.
- Mogi, K. (2007) *Experimental Rock Mechanics*, Taylor & Francis Group, London, UK, 361p.
- Peng, S. e Zhang, J. (2007) *Engineering Geology for Underground Rocks*, Springer, Berlin, 320 p.
- Paterson, M.S. e Wong, T. (2005) *Experimental Rock Deformation – The Brittle Field*, 2nd ed, Springer, Berlin, 347 p.