



UFRJ

Amanda Martins Souza de Mello

**DETERMINAÇÃO E CORRELAÇÃO DOS PARÂMETROS
ELÁSTICOS ESTÁTICOS E DINÂMICOS DE ROCHAS A
PARTIR DE ENSAIOS SIMULTÂNEOS DE COMPRESSÃO
SIMPLES E ULTRASSÔNICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso
(Bacharelado em Geologia)



UFRJ

Amanda Martins Souza de Mello

**DETERMINAÇÃO E CORRELAÇÃO DOS PARÂMETROS
ELÁSTICOS ESTÁTICOS E DINÂMICOS DE ROCHAS A PARTIR
DE ENSAIOS SIMULTÂNEOS DE COMPRESSÃO SIMPLES E
ULTRASSÔNICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Geologia do Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, apresentado como requisito necessário para obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

Orientador(es):
Emílio Velloso Barroso
Andrea Ferreira Borges

Rio de Janeiro
Janeiro de 2009

MELLO, Amanda Martins Souza de
Determinação e Correlação dos Parâmetros Elásticos Estáticos e Dinâmicos de Rochas a partir de Ensaios Simultâneos de Compressão Simples e Ultrassônicos / Amanda Martins Souza de Mello -- Rio de Janeiro: UFRJ / IGeo, 2009.

x, 22 p.: il.; 30 cm

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geologia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Departamento de Geologia, 2009.

Orientador(es): Emílio Velloso Barroso, Andrea Ferreira Borges

1. Geologia. 2. Geologia de Engenharia e Ambiental – Trabalho de Conclusão de Curso. I. Emílio, Velloso Barroso, Andrea Ferreira Borges. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Departamento de Geologia. Determinação e Correlação dos Parâmetros Elásticos Estáticos e Dinâmicos de Rochas a partir de Ensaios Simultâneos de Compressão Simples e Velocidade de Propagação de Ondas



UFRJ

Amanda Martins Souza de Mello

**DETERMINAÇÃO E CORRELAÇÃO DOS PARÂMETROS ELÁSTICOS
ESTÁTICOS E DINÂMICOS DE ROCHAS A PARTIR DE ENSAIOS
SIMULTÂNEOS DE COMPRESSÃO SIMPLES E ULTRASSÔNICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Geologia do Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, apresentado como requisito necessário para obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

Orientador(es):
Emílio Velloso Barroso
Andrea Ferreira Borges

Aprovada em:30.01.2009

Por:

Orientador: Emílio Velloso Barroso

Orientadora: Andrea Ferreira Borges

Eurípides do Amaral Vargas Jr. (UFRJ)

Melissa Cristina Duque Nogueira (CENPES / PETROBRAS)

Dedico este trabalho à minha família, em especial aos meus pais, Jarbas e Sandra, pelo incentivo, apoio, compreensão e amor ao longo dos anos.

Agradecimentos

À minha família, em especial aos meus pais, Jarbas e Sandra, pelo amor, dedicação e compreensão, ao longo de todos os anos.

Ao Felipe Medeiros Simbras por todo companheirismo, apoio e incentivo sempre.

À Margareth que foi sempre muito importante como amiga e companheira.

Aos meus orientadores Emílio Velloso Barroso e Andrea Ferreira Borges por todo o suporte, ensinamentos e amizade durante a elaboração deste trabalho.

Ao pessoal do Laboratório de Mecânica das Rochas do CENPES Marcos Dantas, Marcos Soares, Janaína, Rafael e Rodrigo por toda a paciência, atenção e ajuda ao longo da realização dos ensaios.

Ao Técnico em Exploração do Petróleo Lincoln Ferreira pela enorme paciência nas etapas iniciais de manuseio do SMEDS e ao longo de toda a realização dos ensaios.

Ao pessoal do Lemetro Rafael, Viviane, Rodrigo, Gilmar e Anderson por tornarem meus dias mais divertidos e pela ajuda ao longo desta pesquisa.

À ANP pela concessão da bolsa e suporte financeiro durante o desenvolvimento deste projeto.

A todos aqueles que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho de conclusão final de curso.

Muito Obrigada

Resumo

MELLO, Amanda Martins Souza de. **Determinação e Correlação dos Parâmetros Elásticos Estáticos e Dinâmicos de Rochas, a partir de Ensaios Simultâneos de Compressão Simples e Ultrassônicos** 2009. 01, 22 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geologia) – Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

As informações geomecânicas têm vasta aplicação na indústria do petróleo, tanto na exploração quanto na produção. Estudos de fraturamento hidráulico, análise de estabilidade de poços, previsão da produção de areia e avaliação de dano mecânico de reservatórios são alguns exemplos de questões de mecânica das rochas relacionados com o petróleo. Sabe-se que as velocidades das ondas elásticas podem ser medidas em laboratório e que estas dependem da densidade da rocha, coeficiente de Poisson e módulo de elasticidade. Um ensaio de laboratório pode ser realizado propagando ondas elásticas primárias (ou compressionais) e secundárias (ou cisalhantes) através de testemunhos de rochas a partir de um pulso ultra-sônico, simultaneamente à compressão. Esse tipo de ensaio possibilita calcular as propriedades elásticas dinâmicas e estáticas da rocha. A obtenção de relações entre as propriedades elásticas estáticas e dinâmicas é uma tarefa de grande importância, pois possibilita que registros sísmicos de perfilagem sejam utilizados em projetos de engenharia. Deve ser lembrado o quão caro são testemunhos para a indústria do petróleo e que os ensaios geomecânicos são destrutivos e consomem tempo. Alguns dados prévios mostram que parâmetros elásticos dinâmicos são consideravelmente mais elevados que aqueles determinados em ensaios quase-estáticos. Franklin & Dusseault (1989) e Goodman (1989) apresentaram valores para os parâmetros elásticos dinâmicos podendo chegar a 10 vezes mais altos que os estáticos, enquanto Bloch *et al.* (1994) constatou valores máximos de três. O foco principal desse trabalho é a obtenção de relações de propriedades elásticas dinâmicas e estáticas. Um equipamento experimental desenvolvido especialmente para esse estudo foi construído no Centro de Pesquisas da Petrobrás. Seis rochas ígneas, uma metamórfica e uma sedimentar foram testadas e dados preliminares mostram relações entre os módulos de elasticidade dinâmico-estáticos com valores variando de 0,9 a 3,0 com uma média de valores de aproximadamente 1,7. Problemas relacionados com a observação precisa do tempo de trânsito das ondas cisalhantes produziram uma enorme dispersão no coeficiente de Poisson. Devido a esse problema não é seguro estabelecer nenhuma relação para os coeficientes de Poisson dinâmicos e estáticos.

Palavras-chave: Propriedades Elásticas, Módulo de Elasticidade, Coeficiente de Poisson

Abstract

MELLO, Amanda Martins Souza de. **Determination and Correlation of the Static and Dynamic Elastic Parameters of Rocks from Simultaneous Tests of Simple Compression and Ultrasonics**. 2009. 01, 22 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geologia) – Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

The Geomechanical informations have a wide application in the petroleum industry from exploration to production activities. Hydraulic fracturing process, well stability analysis, prediction of sand production and evaluation of reservoir damage are some few examples of petroleum related rock mechanics issues. It is well known that elastic wave velocities can be measured at laboratory and that they are dependent of rock density, Poisson's ratio and modulus of elasticity. A laboratory test can be arranged in order to propagate primary (or compressional) and secondary (or shear) elastic waves throughout a rock specimen in an ultrasonic pulse test when the rock is simultaneously compressed. This kind of test makes possible to calculate dynamic and static elastic rock properties. Obtaining relationships between dynamic and static elastic properties is a task of major importance because it would permit that seismic well logging could be used for well engineering designs. It should be remembered how expensive rock specimens are for petroleum industry and that geomechanical tests are destructive and time consuming. Some previous data points out that dynamic elastic parameters are considerably higher than obtained during quasi-static tests. Franklin and Dusseault (1989) and Goodman (1989) have presented values of dynamic elastic parameter ten times higher than static ones while Bloch *et al.* (1994) have stated maximum ratios of three. The main focus of this work is to obtain dynamic-static elastic properties ratios. An experimental apparatus specially designed for this study was constructed at Petrobras Research Centre. Six igneous, one metamorphic and one sedimentary rocks were tested and preliminary data shows dynamic-static ratios of elastic modulus varying from 0,9 to 3,0 with average values close to 1,7. Problems related to the accurate observation of shear wave's transit time produced a high dispersion of Poisson's ratio. Due to that problem it is not safe to establish any ratio value for Coefficient of Poisson.

Key-words: Elastic Properties, Modulus of Elasticity, Poisson coefficient

Lista de Figuras

Figura 1 - Corpos de provas das rochas utilizadas nos ensaios.....	5
Figura 2 - Ensaios simultâneos de Compressão Uniaxial e Medida de Propagação de Ondas.....	6
Figura 3 - Diagrama funcional do Sistema de Medidas Estáticas e Dinâmicas Simultâneas (Ferreira & Soares, 2008).....	7
Figura 4 - Osciloscópio mostrando a variação das ondas V_p e V_s (Ferreira & Soares, 2008).....	7
Figura 5 - Módulo de configuração do Sistema de Medidas Estáticas e Dinâmicas Simultâneas (Ferreira & Soares, 2008).....	8
Figura 6 - Detalhe dos “caps” com os dois cristais piezelétricos (Ferreira & Soares, 2008).....	9
Figura 7 – Gráfico de Tensão x Deformação, mostrando em que parte do gráfico é feita o cálculo do módulo de elasticidade estático.....	10
Figura 8 - Gráfico de tensão axial vs. deformação da amostra BM2, ao longo dos três ciclos de recarregamento.....	11
Figura 9 - Gráfico de tensão axial vs. deformação da amostra BM2, com o traço da linha que se ajusta à curva de deformação axial, para os cálculos dos módulos de elasticidade estáticos em relação ao primeiro ciclo de recarregamento.....	12
Figura 10 - Gráfico de tensão axial vs. deformação da amostra BM2, com o traço da linha que se ajusta à curva de deformação axial, para os cálculos dos módulos de elasticidade estáticos em relação ao segundo ciclo de recarregamento.....	12
Figura 11 - Gráfico de tensão axial vs. deformação da amostra BM2, com o traço da linha que se ajusta à curva de deformação axial, para os cálculos dos módulos de elasticidade estáticos em relação ao terceiro ciclo de recarregamento.....	13
Figura 12 - Gráfico dos módulos de elasticidade dinâmicos vs. estáticos.....	17
Figura 13 - Gráfico dos coeficientes de Poisson dinâmicos vs. estáticos.....	17

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Ciclos de carregamento e descarregamento com os respectivos valores de tensões axiais aplicados nas rochas ígneas e metamórficas ensaiadas.....	9
Tabela 2 - Ciclos de carregamento e descarregamento com os respectivos valores de tensões axiais aplicados no arenito.....	10
Tabela 3 - Altura, diâmetro, litologia, peso, porosidade e massa específica das oito amostras ensaiadas.....	15
Tabela 4 - Módulos de elasticidade e coeficientes de Poisson estáticos.....	16
Tabela 5 - Módulos de elasticidade e coeficientes de Poisson dinâmicos.....	16
Tabela 6 - Módulos de elasticidade e coeficientes de Poisson estáticos do arenito.....	18
Tabela 7 - Módulos de elasticidade dinâmicos do arenito.....	18
Tabela 8 – Relações entre os módulos de elasticidade dinâmicos e estáticos e os coeficientes de Poisson dinâmicos e estáticos para cada ciclo de recarregamento.....	19

Sumário

Agradecimentos.....	iv
Resumo.....	v
<i>Abstract</i>	vi
Lista de figuras.....	vii
Lista de tabelas.....	viii
1 INTRODUÇÃO	1
2 MATERIAIS E MÉTODOS.....	4
3 RESULTADOS.....	15
4 CONCLUSÕES.....	20
5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	22
Apêndice – Gráficos Tensão x Deformação	

1 INTRODUÇÃO

As propriedades acústicas das rochas são obtidas através de investigações sísmicas e/ou perfilagem. Estas fornecem as velocidades de propagação das ondas elásticas compressoriais (P) e cisalhantes (S), nas rochas que circundam um poço. De acordo com Ellis (1987) o processamento dos tempos de trânsito das ondas P e S permite a obtenção dos parâmetros elásticos dinâmicos das rochas, em contra-partida os parâmetros elásticos estáticos são determinados a partir de gráficos de tensão-deformação em ensaios de Compressão Uniaxial. A obtenção das constantes elásticas (Módulo de Elasticidade e Coeficiente de Poisson) dinâmicas é de grande importância, pois através da perfilagem permitem obter dados para investigar o comportamento mecânico das rochas em regiões não testemunhadas, uma vez que a medição ocorre *in situ*. Além disto a testemunhagem é cara e, portanto, somente é realizada em trechos selecionados, logo, não é possível a aquisição direta dos parâmetros por ensaios de laboratório ao longo de todo poço. Como alternativa, as propriedades das rochas, como porosidade, constantes elásticas e parâmetros de resistência, podem ser calculadas ou estimadas a partir de medidas das velocidades de propagação de ondas. Desta forma, tais propriedades podem ser estimadas a partir de perfis. Por exemplo, as constantes elásticas podem ser calculadas a partir das velocidades de propagação de ondas de compressão e cisalhante, obtidas em perfil sônico completo, e da massa específica, obtida em perfis de densidade.

A velocidade de propagação de ondas pode também ser medida em laboratório, usualmente em ensaios de pulso ultrassônico, isoladamente ou simultaneamente a um ensaio de carregamento quase-estático, permitindo estabelecer uma correlação direta dos

parâmetros estáticos e dinâmicos (mesmo material, mesmo estado de tensões e mesmas condições de saturação). Uma vez estabelecidas tais correlações, torna-se possível a avaliação contínua ao longo de todo o intervalo perfilado das constantes elásticas das rochas. Esse é um ponto de grande interesse, pois os dados geomecânicos são obtidos em amostras de pequenas dimensões e em intervalos de profundidade não contínuos, ou seja, representam intervalos discretos se comparados à profundidade total da perfuração.

As constantes elásticas dinâmicas são consideravelmente mais altas que aquelas determinadas em ensaios de carregamento quase-estático, podendo as razões entre essas propriedades, chegar a valores maiores que 10 vezes (Franklin e Dusseault, 1989; Goodman, 1989). Esta diferença é marcante em rochas fraturadas e resulta, principalmente, da baixa amplitude da onda, que é insuficiente para fechar poros e fissuras. Além disto, a taxa de deformação aplicada por uma onda elástica é muito mais alta que em ensaios quase-estáticos, o que faz com que o material apresente maior rigidez (Franklin e Dusseault, 1989). Os valores das constantes elásticas dinâmicas dependem de diversos fatores, a saber: estado de tensões, massa específica, porosidade, história de tensões, fluidos presentes, grau de saturação, amplitude de deformações, frequência de vibração, estrutura, efeitos secundários (dependentes do tempo) e temperatura. As correlações usualmente são feitas com o módulo de deformabilidade, ao contrário deste trabalho que utiliza o módulo de elasticidade.

O estudo de laboratório tem a finalidade de aprimorar a interpretação dos resultados de perfilagem, calibrar os perfis com relação aos parâmetros mecânicos elásticos das rochas e permitir o desenvolvimento de novas aplicações para as ondas elásticas na produção de petróleo (Bloch *et al.*, 1994).

A presente pesquisa tem como **objetivo** a obtenção das propriedades elásticas estáticas e dinâmicas, principalmente, de rochas ígneas e metamórficas através das velocidades de propagação de ondas volumétricas e ensaios de compressão simples e a partir das propriedades elásticas obtidas, buscar correlações entre estas.

O estudo tem como **finalidade** a obtenção de informações geomecânicas ao longo de todo o intervalo perfilado, desta forma possibilitando uma avaliação contínua ao longo de todo o poço permitindo ações preventivas.

A **relevância** do estudo está na correlação entre propriedades elásticas estáticas e dinâmicas, de grande importância para projetos de poços e estudos de caracterização de reservatórios, pois permite aproveitar as informações de perfilagem para fins de geologia de engenharia reservatórios e de engenharia de poços, reduzindo os custos de testemunhagem e de ensaios geomecânicos. Serve também de importante fonte de dados para investigar o comportamento mecânico das rochas em locais de onde não é possível extrair amostras, possibilitando ações preventivas. Há que se ressaltar ainda a relativa escassez de dados desta natureza na literatura técnica.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Primeiramente foram selecionadas oito amostras, sendo seis granitóides, um gnaisse e um arenito da Formação Botucatu (Figura 1). Posteriormente foi feita uma classificação megascópica das rochas ígneas, de acordo com o diagrama de Streckeisen (1974), dentre as quais, cinco foram classificadas como álcali-feldspato granitos e uma como um granodiorito.

O estudo utilizou equipamentos ainda em fase de testes, o que justifica a utilização de rochas ígneas e metamórficas com baixo grau de alteração e/ou sãs e de uma amostra de arenito da Formação Botucatu, que foi escolhida como primeira rocha sedimentar a ser ensaiada nesta pesquisa por suas características de homogeneidade e isotropia, dadas por sua mineralogia de composição essencialmente quartzosa e ausência de estruturas, diminuindo a atenuação. O emprego desses tipos de rochas teve como objetivo a obtenção de sinais pouco atenuados e estabelecer uma metodologia de interpretação dos sinais das ondas compressoriais e cisalhantes.

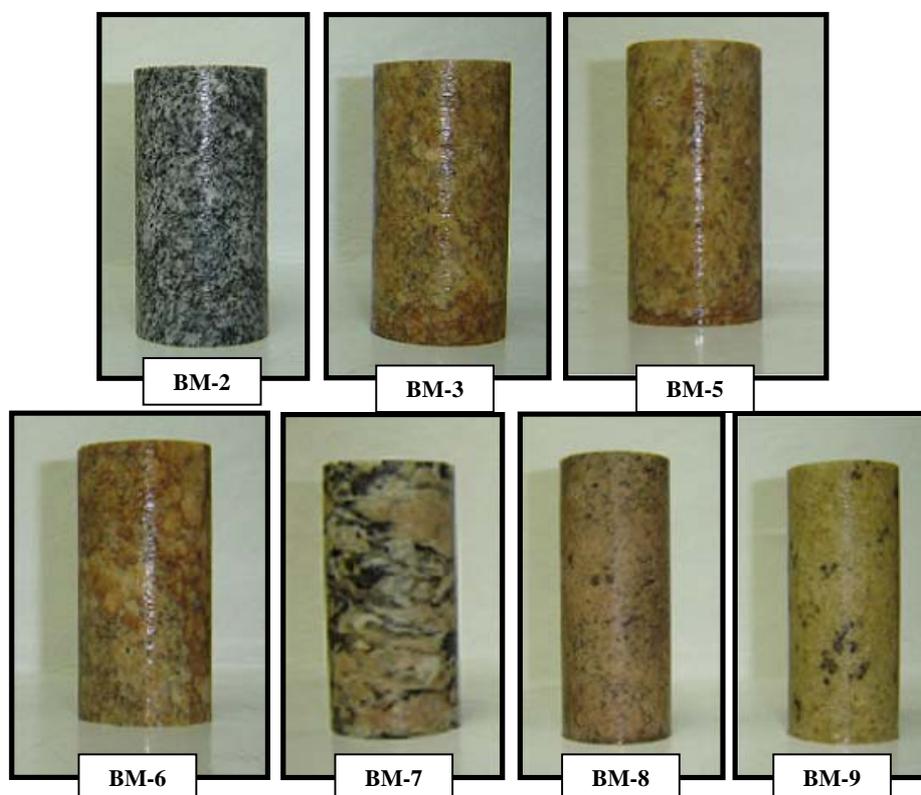


Figura 1 - Corpos de provas das rochas utilizadas nos ensaios.

Após a seleção e classificação megascópica das amostras, estas foram usinadas segundo as especificações da ISRM (1981), a fim de evitar os efeitos de extremidade que levam ao confinamento artificial dos corpos de provas. Mediram-se então as alturas e diâmetros das oito amostras. Em seguida as rochas foram submersas em água destilada para a obtenção da massa saturada. Posteriormente colocadas na estufa, onde repousaram por 24 horas. O método de ensaio para a determinação da massa específica e da porosidade seguiu as normas da ISRM (1981).

Para realização deste trabalho foi utilizado o Sistema de Medidas Estáticas e Dinâmicas Simultâneas (SMEDS), desenvolvido no CENPES/PETROBRAS (Ferreira &

Soares, 2008), que permite adquirir, registrar e processar dados de ensaios dinâmicos de forma simultânea aos ensaios estáticos de mecânica de rochas (Figura 2).



Figura 2 - Ensaios simultâneos de Compressão Uniaxial e Medida de Propagação de Ondas.

De acordo com Ferreira & Soares (2008), durante os ensaios estáticos, são posicionados “caps” de topo e base nas extremidades axiais da amostra de rocha. No interior dos “caps” estão localizados cristais piezelétricos (PZT), que são responsáveis pela geração de ondas. Ambos os “caps” possuem características idênticas, porém um é utilizado como transmissor, enquanto o outro é utilizado como receptor. Após a colocação dos dois “caps” em ambas as extremidades da rocha, o sistema então gera um pulso elétrico para o transmissor. Desta forma, é gerado um sinal mecânico acústico que se propaga ao longo de toda a amostra de rocha até alcançar a outra extremidade, onde está localizado o receptor, ocorrendo então o processo contrário, isto é, o transdutor transforma energia acústica em elétrica (Figura 3).

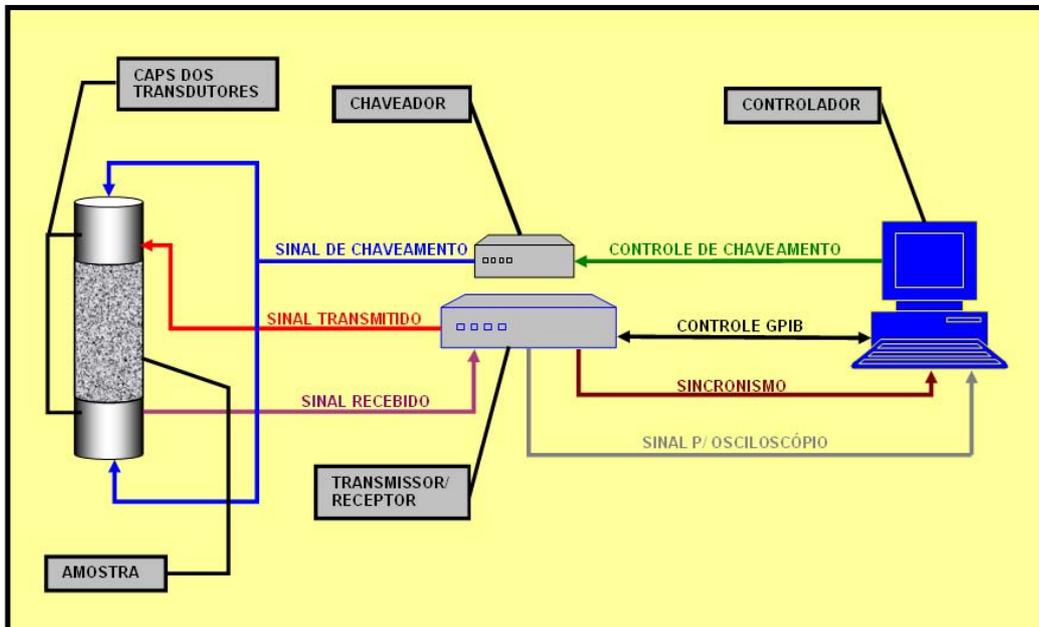


Figura 3 - Diagrama funcional do Sistema de Medidas Estáticas e Dinâmicas Simultâneas (Ferreira & Soares, 2008).

Neste momento o sinal elétrico é amplificado, enviado a um osciloscópio (Figura 4) para visualização e armazenamento (Figura 5).

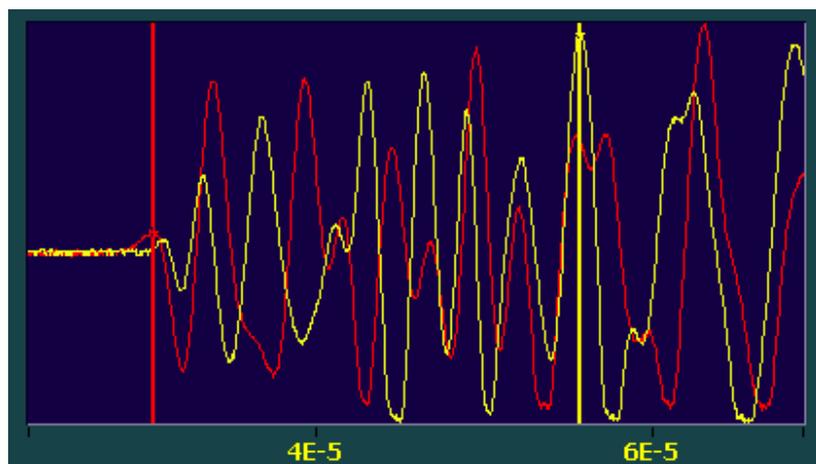


Figura 4 - Osciloscópio mostrando a variação das ondas V_p e V_s (Ferreira & Soares, 2008).



Figura 5 - Módulo de configuração do Sistema de Medidas Estáticas e Dinâmicas Simultâneas (Ferreira & Soares, 2008).

Esta seqüência de eventos ocorre para dois tipos de sinais: o sinal de onda cisalhante ou secundária (S) e de onda compressional ou primária (P). Isto é possível, pois dentro dos “caps” existem dois cristais piezelétricos (Figura 6), um responsável pela propagação da onda cisalhante e o outro pela propagação da onda compressional. A escolha do tipo de onda a se propagar é feita a partir de um comando remoto, por um dispositivo chaveador. A partir da medida do tempo de propagação e do comprimento, calculam-se as velocidades.

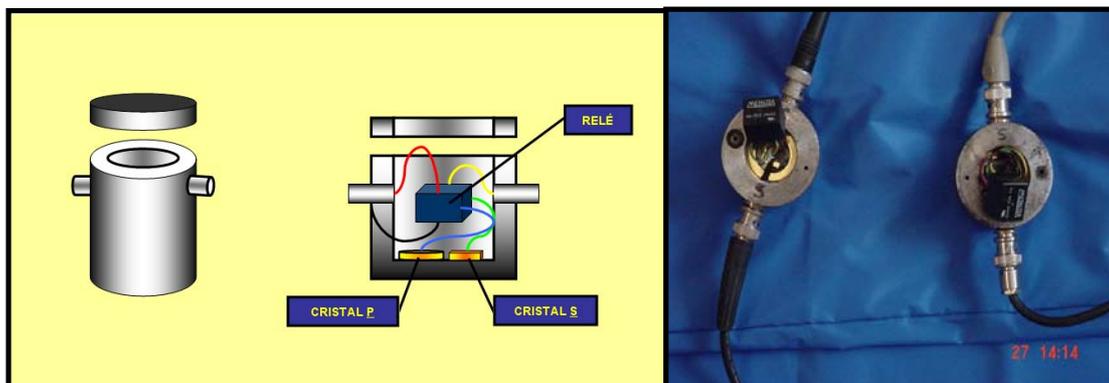


Figura 6 - Detalhe dos “caps” com os dois cristais piezelétricos (Ferreira & Soares, 2008).

Posteriormente, foram então realizados os ensaios uniaxiais e com medidas simultâneas das velocidades das ondas compressoriais e cisalhantes (V_p e V_s , respectivamente). Os ensaios de Compressão Simples foram divididos em ciclos de carregamento e descarregamento (Tabela 1 e 2), com medidas de deformação axial e diametral.

Tabela 1 - Ciclos de carregamento e descarregamento com os respectivos valores de tensões axiais aplicados nas rochas ígneas e metamórficas ensaiadas.

Ciclo	Fase	σ_{axial} (MPa)
1°	Carregamento	0 a 5
	Descarregamento	5 a 0
2°	Carregamento	0 a 10
	Descarregamento	10 a 0
3°	Carregamento	0 a 15
	Descarregamento	15 a 0
4°	Carregamento	0 a 15

Tabela 2 - Ciclos de carregamento e descarregamento com os respectivos valores de tensões axiais aplicados no arenito.

Ciclo	Fase	σ_{axial} (MPa)
1°	Carregamento	0 a 5
	Descarregamento	5 a 0
2°	Carregamento	0 a 10
	Descarregamento	10 a 0
3°	Carregamento	0 a 15
	Descarregamento	15 a 0
4°	Carregamento	0 a 30
	Descarregamento	30 a 0
5°	Carregamento	0 a 30

O cálculo dos parâmetros elásticos estáticos foi realizado nos ciclos de recarregamento, pois nestes a deformação é elástica, e o objetivo era calcular as constantes elásticas (Figura 7).

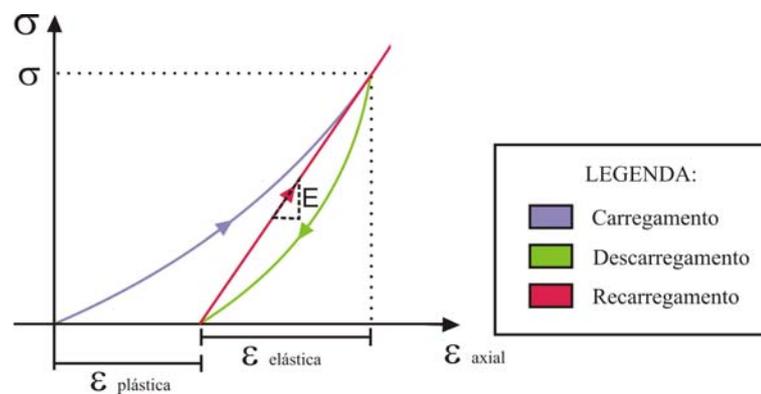


Figura 7 – Gráfico de Tensão x Deformação, mostrando em que parte do gráfico é feita o cálculo do módulo de elasticidade estático.

Com base nos valores de tensão axial, deformação axial e deformação diametral, obtidos nos ensaios quase-estáticos de compressão uniaxial, com medidas de deformação axial e diametral, foram confeccionados gráficos (Figura 8, 9, 10 e 11). A partir destes gráficos foram calculados os módulos de elasticidade e os coeficientes de Poisson estáticos nos ciclos de recarregamento de cada rocha ensaiada.

Primeiramente, mediram-se as inclinações das retas de deformação axial e deformação diametral, sendo os módulos de elasticidade estáticos as inclinações das retas de deformação axial. Posteriormente, encontraram-se os coeficientes de Poisson estáticos, dividindo os valores dos módulos de elasticidade pelas inclinações das retas de deformação diametral.

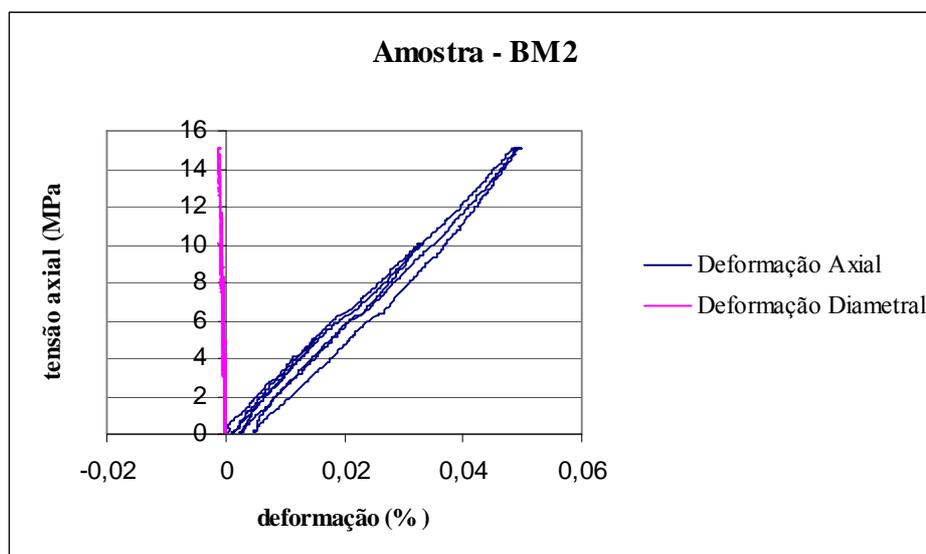


Figura 8 - Gráfico de tensão axial vs. deformação da amostra BM2, ao longo dos três ciclos de recarregamento.

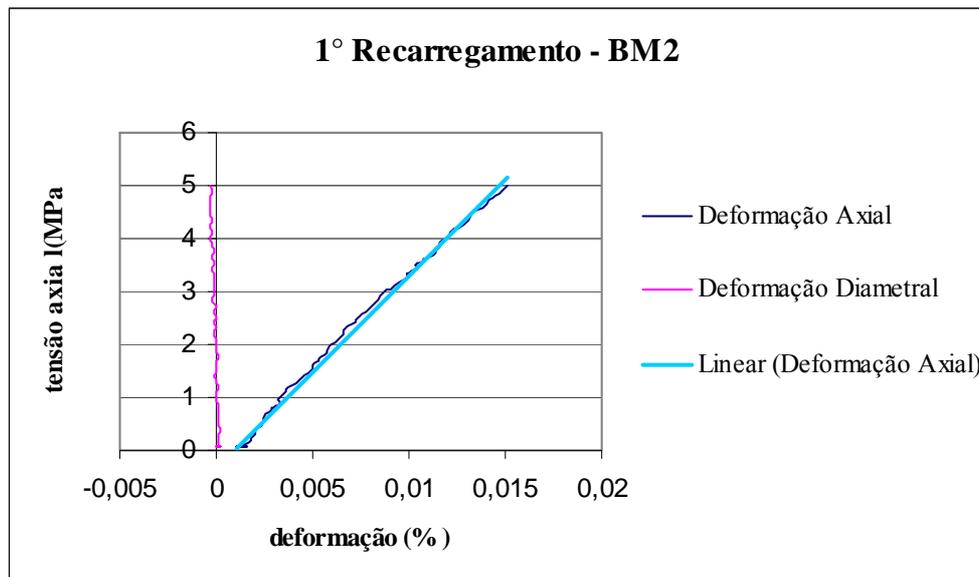


Figura 9 - Gráfico de tensão axial vs. deformação da amostra BM2, com o traço da linha que se ajusta à curva de deformação axial, para os cálculos dos módulos de elasticidade estáticos em relação ao primeiro ciclo de recarregamento.

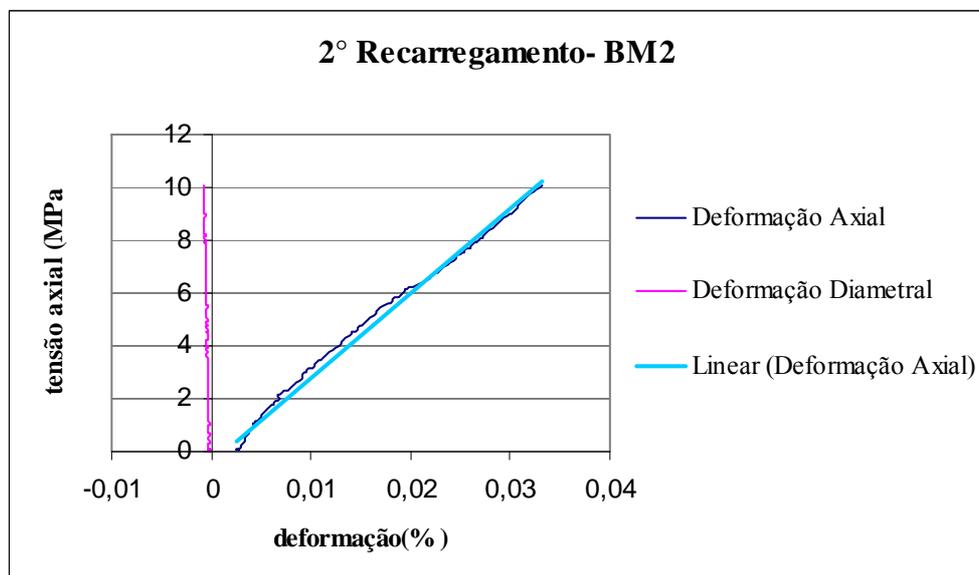


Figura 10 - Gráfico de tensão axial vs. deformação da amostra BM2, com o traço da linha que se ajusta à curva de deformação axial, para os cálculos dos módulos de elasticidade estáticos em relação ao segundo ciclo de recarregamento.

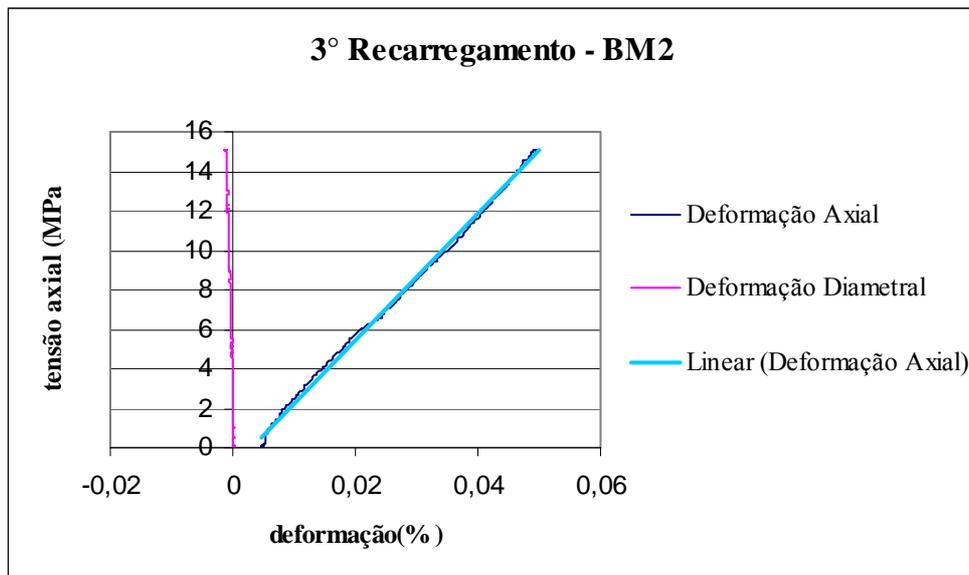


Figura 11 - Gráfico de tensão axial vs. deformação da amostra BM2, com o traço da linha que se ajusta à curva de deformação axial, para os cálculos dos módulos de elasticidade estáticos em relação ao terceiro ciclo de recarregamento.

Já na fase de interpretação, o SMEDS gerou, para cada ensaio, um arquivo com o registro das velocidades V_p e V_s em vários instantes escolhidos nos trechos de recarregamento.

As formulações usadas para os cálculos dos parâmetros elásticos dinâmicos (Equações 1 e 2) partiram da teoria da elasticidade e da equação da onda. As hipóteses admitidas são de uma frente de onda plana se propagando numa barra de seção transversal constante e não confinada (Goodman, 1989).

$$E = \rho V_p^2 \quad (1)$$

$$\nu = \frac{V_p^2}{2V_s^2} - 1 \quad (2)$$

Após os cálculos, escolheu-se um tempo para cada ciclo de recarregamento, preferencialmente um instante intermediário, assumindo-se o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson dinâmicos desse ponto (instante) como sendo representativo do recarregamento em questão.

3 RESULTADOS

A partir das medições de diâmetro, altura, massa seca, massa saturada, volume total e volume de vazios das amostras de rochas ígneas e metamórfica ensaiadas foram calculadas suas massas específicas seca e saturada e sua porosidade. Com base na Tabela 3 pode-se notar que tais amostras apresentaram baixíssima porosidade.

Tabela 3 - Altura, diâmetro, litologia, peso, porosidade e massa específica das oito amostras ensaiadas.

Amostra	Altura (mm)	Diâmetro (mm)	Litologia	M_{seca} (g)	M_{sat} (g)	V_{total} (cm ³)	V_{vazio} (cm ³)	η (%)	ρ_{seca} (g/cm ³)	ρ_{sat} (g/cm ³)
BM2	104.3	51.9	Granito	586.61	587.97	221.12	1.36	0.62	2,67	2,66
BM3	105.8	52.3	Granito	585.84	587.51	227.66	1.67	0.73	2,59	2,58
BM5	105.5	52.3	Granito	585.02	586.73	227.25	1.71	0.75	2,60	2,58
BM6	106.4	52.4	Granito	589.09	591.02	229.34	1.93	0.84	2,58	2,58
BM7	108.5	53.5	Gnaisse	640.07	641.29	243.91	1.22	0.50	2,64	2,63
BM8	135.9	54.1	Granito	811.52	814.27	313.13	2.75	0.88	2,61	2,60
BM9	130.8	53.7	Granito	766.32	768.29	296.87	1.97	0.66	2,60	2,59
AM1	101.3	50.6	Arenito	441.90	.....	.....	.....	.....	.....	.....

Já com base nos dados obtidos nos ensaios uniaxiais, com medidas de deformação axial e diametral e com medidas simultâneas das velocidades das ondas V_p e V_s , foram calculados os módulos de elasticidade e os coeficientes de Poisson, estáticos (Tabela 4) e dinâmicos (Tabela 5), ao longo dos ciclos de recarregamento.

Tabela 4 - Módulos de Elasticidade e Coeficientes de Poisson estáticos.

Amostra	1ºRecarregamento		2ºRecarregamento		3ºRecarregamento	
	E _{estático} (GPa)	v _{estático}	E _{estático} (GPa)	v _{estático}	E _{estático} (GPa)	v _{estático}
BM2	36,46	0,03	31,96	0,02	32,09	0,03
BM3	40,41	0,10	46,29	0,07	51,26	0,07
BM5	52,24	0,05	58,13	0,06	59,71	0,08
BM6	29,19	0,01	32,02	0,01	40,88	0,04
BM7	16,71	0,01	22,23	0,02	31,53	0,03
BM8	34,35	0,06	26,38	0,04	28,21	0,05
BM9	46,61	0,03	38,86	0,03	37,95	0,04

Tabela 5 - Módulos de Elasticidade e Coeficientes de Poisson dinâmicos.

Amostra	1ºRecarregamento		2ºRecarregamento		3ºRecarregamento	
	E _{dinâmico} (GPa)	v _{dinâmico}	E _{dinâmico} (GPa)	v _{dinâmico}	E _{dinâmico} (GPa)	v _{dinâmico}
BM2	42,15	0,32	46,10	0,27	50,64	0,24
BM3	58,04	0,19	59,90	0,18	62,14	0,21
BM5	59,79	0,12	62,90	0,15	66,25	0,16
BM6	50,71	0,16	66,87	0,28	67,84	0,29
BM7	50,13	0,21	60,05	0,28	56,04	0,11
BM8	40,03	0,31	43,47	0,30	58,12	0,46
BM9	41,73	0,12	51,29	0,29	61,02	0,39

Após os cálculos foram elaborados gráficos de $E_{\text{dinâmico}}$ vs. $E_{\text{estático}}$ (Figura 12) e $\nu_{\text{dinâmico}}$ vs. $\nu_{\text{estático}}$ (Figura 13), a fim de comparar os valores obtidos nos diferentes ensaios.

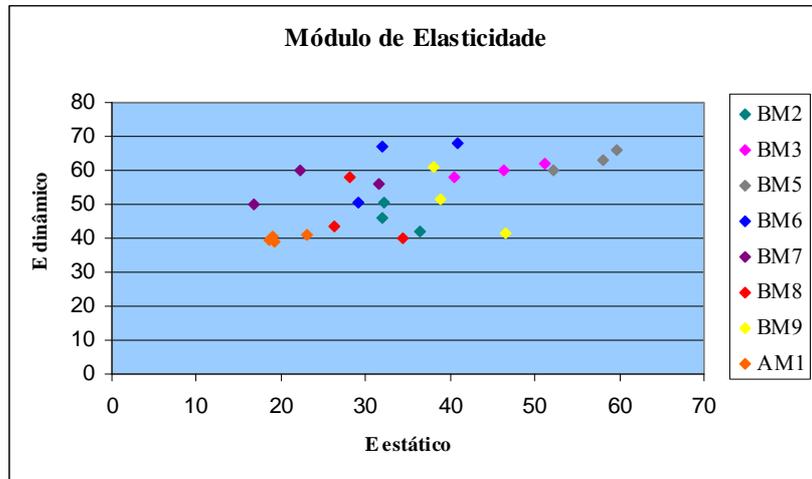


Figura 12 - Gráfico dos módulos de elasticidade dinâmicos vs. estáticos.

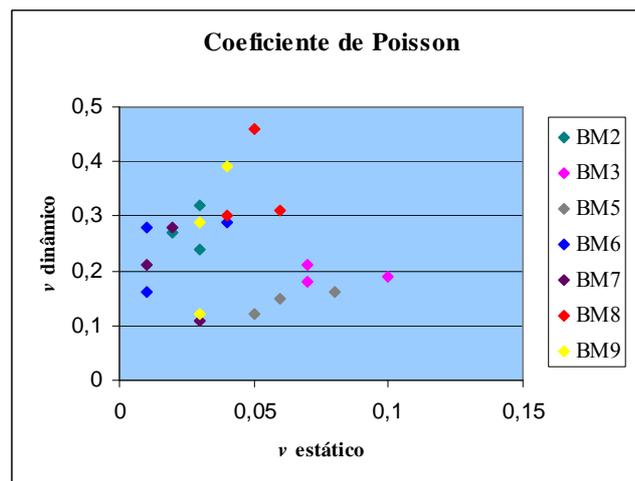


Figura 13 - Gráfico dos coeficientes de Poisson dinâmicos vs. estáticos.

Posterior aos ensaios realizados com rochas ígneas e metamórficas, adotou-se o mesmo procedimento experimental para uma amostra de rocha sedimentar (AM1 – arenito da Formação Botucatu). Diferentemente dos outros ensaios, este foi dividido em quatro ciclos de carregamento e descarregamento para que os intervalos de tensão aplicada em cada ciclo fosse suficientemente baixo para não colocar em risco a integridade da amostra (Tabela 6). Os resultados experimentais para os parâmetros elásticos estáticos são apresentados no Tabela 7 para cada trecho de recarregamento. No Tabela 8 estão listados apenas os módulos de

elasticidade dinâmicos porque não foi possível identificar com confiança os tempos de chegada das ondas cisalhantes, inviabilizando o cálculo do coeficiente de Poisson dinâmico.

Tabela 6 - Módulos de elasticidade e coeficientes de Poisson estáticos do arenito.

Amostra	1°Recarregamento		2°Recarregamento		3°Recarregamento		4°Recarregamento	
	$E_{\text{estático}}(\text{GPa})$	$\nu_{\text{estático}}$	$E_{\text{estático}}(\text{GPa})$	$\nu_{\text{estático}}$	$E_{\text{estático}}(\text{GPa})$	$\nu_{\text{estático}}$	$E_{\text{estático}}(\text{GPa})$	$\nu_{\text{estático}}$
AM1	18,92	0,004	18,57	0,008	19,29	0,01	23,00	0,02

Tabela 7 - Módulos de elasticidade dinâmicos do arenito.

Amostra	1°Recarregamento	2°Recarregamento	3°Recarregamento	4°Recarregamento
	$E_{\text{dinâmico}}(\text{GPa})$	$E_{\text{dinâmico}}(\text{GPa})$	$E_{\text{dinâmico}}(\text{GPa})$	$E_{\text{dinâmico}}(\text{GPa})$
AM1	40,41	39,73	39,07	40,94

A partir dos resultados obtidos foram calculadas as relações entre os módulos de elasticidade dinâmicos e estáticos e os coeficientes de Poisson dinâmicos e estáticos para cada ciclo de recarregamento.

Tabela 8 – Relações entre os módulos de elasticidade dinâmicos e estáticos e os coeficientes de Poisson dinâmicos e estáticos para cada ciclo de recarregamento.

Amostras	Fase (Recarregamento)	$\frac{E_{dinâmico}}{E_{estático}}$	$\frac{\nu_{dinâmico}}{\nu_{estático}}$
BM2	1°	1.16	10.67
	2°	1.44	13.50
	3°	1.58	8.00
BM3	1°	1.44	1.90
	2°	1.29	2.57
	3°	1.21	3.00
BM5	1°	1.14	2.40
	2°	1.08	2.50
	3°	1.11	2.00
BM6	1°	1.74	16.00
	2°	2.09	28.00
	3°	1.66	7.25
BM7	1°	3.00	21.00
	2°	2.70	14.00
	3°	1.78	3.67
BM8	1°	1.16	5.17
	2°	1.65	7.50
	3°	2.06	9.20
BM9	1°	0.90	4.00
	2°	1.32	9.67
	3°	1.61	9.75
AM1	1°	2.13	.....
	2°	2.14	.....
	3°	2.02	.....
	4°	1.78	.....

4 CONCLUSÕES

O emprego desses tipos de rochas teve como objetivo a obtenção de sinais pouco atenuados e estabelecer uma metodologia de interpretação dos sinais das ondas compressionais e cisalhantes, buscando correlações satisfatórias, a fim de que o estudo futuramente possa ser empregado para rochas selantes e reservatórios com diferentes características.

Conforme mencionado anteriormente (vide cap.1), segundo Franklin e Dusseault (1989) e Goodman (1989) as constantes elásticas dinâmicas são consideravelmente mais altas que aquelas determinadas em ensaios de carregamento quase-estático, podendo chegar a 10 vezes. Bloch *et al.* (1994) encontraram relações inferiores a três entre os módulos de elasticidade dinâmicos e estáticos ao ensaiarem arenitos de procedência não informada em carregamentos triaxiais com 15 MPa de tensão confinante e sem a execução de ciclos de carregamento e descarregamento.

A partir dos resultados obtidos pode-se observar que assim como no trabalho de Bloch *et al.* (1994), as relações entre os módulos de elasticidade dinâmicos e estáticos atingiram o valor máximo de três.

Já em relação aos coeficientes de Poisson, os resultados obtidos não podem ser considerados confiáveis, impossibilitando uma correlação para esta propriedade para as rochas ígneas e metamórficas e apesar das características favoráveis da amostra de rocha sedimentar não se obteve os tempos de chegada da onda cisalhante. As hipóteses para tais ocorrências foram à utilização de amostras de comprimentos elevados, o que pode ter

causado dificuldades na aquisição das ondas cisalhantes, efeitos de tensões baixas e/ou potência dos cristais.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Best, M.G. (1982) *Igneous and Metamorphic Petrology*: W.H. Freeman and Company, San Francisco, 630p.

Bloch, M., Soares, J. A. & Dillon, L. D. 1994. Obtenção dos Módulos Elásticos de Rochas através da Propagação de Ondas P e S. *In*: 1º SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MECÂNICA DAS ROCHAS, 1, Foz do Iguaçu, p. 319-326.

Ellis, D.V., (1987). *Well logging for Earth Scientists*. Elsevier. New York.

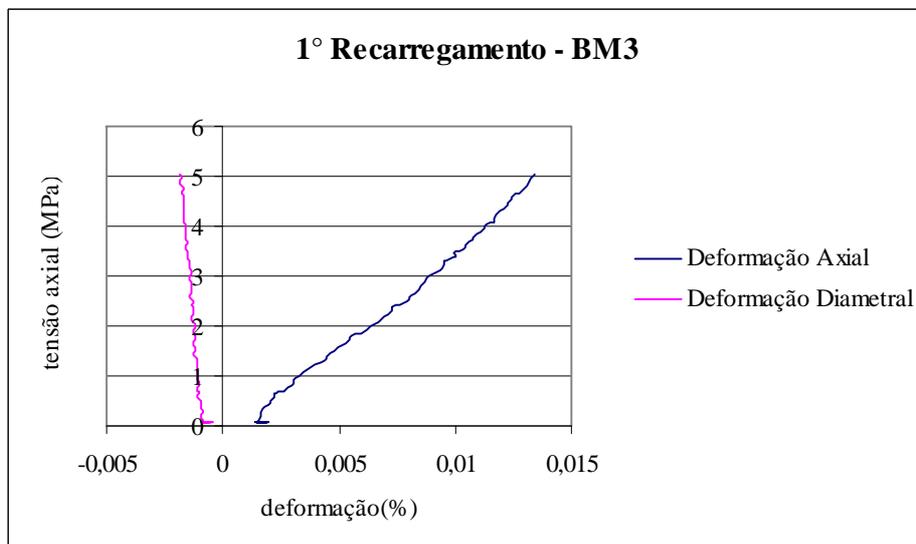
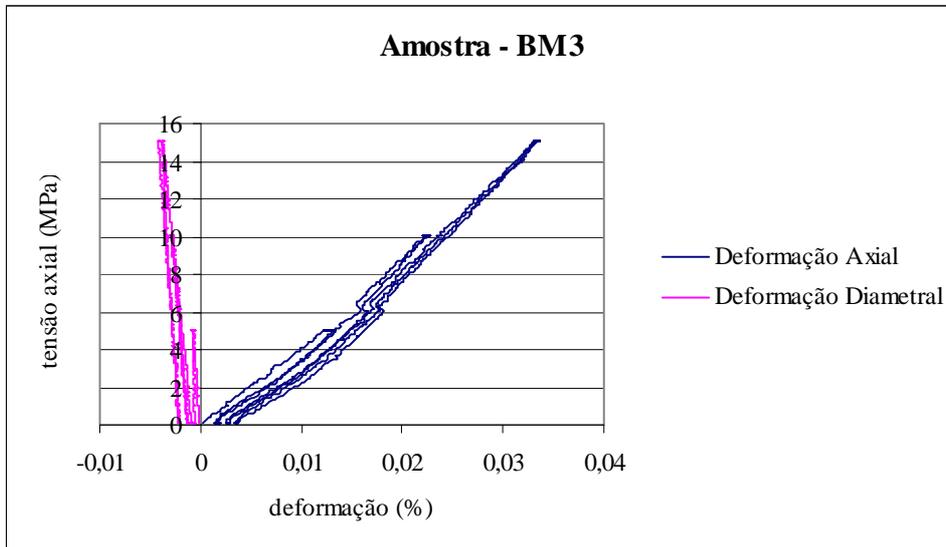
Ferreira, L. H. T & Soares, A. C. 2008. *Manual do SMEDS — Sistema de Medidas Estáticas e Dinâmicas Simultâneas*. 2. v. Rio de Janeiro, RJ.

Franklin, J. A. & Dusseault, M.B. (1989). *Rock Engineering*. McGraw-Hill, Inc., EUA. ISBN: 0-07-021888-9.

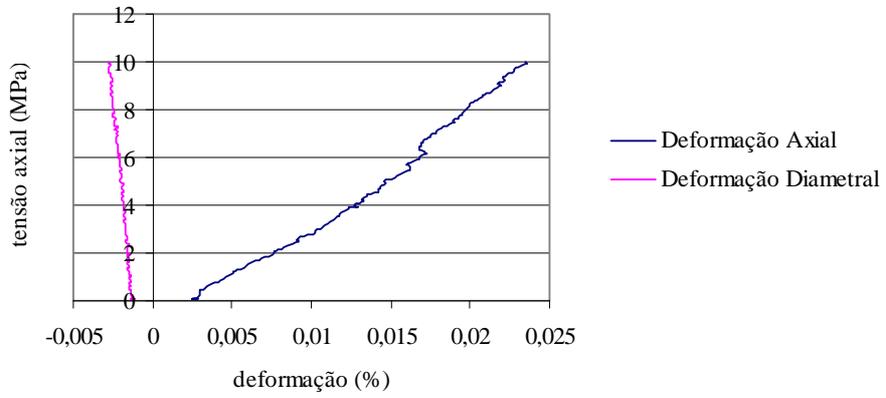
Goodman, R. E. 1989. *Introduction to Rock Mechanics*, second edition. Wiley. 562 p.

ISRM. (1981). *Rock Characterization Testing and Monitoring*. ISRM Suggested Methods. Ed. Pergamon .211p.

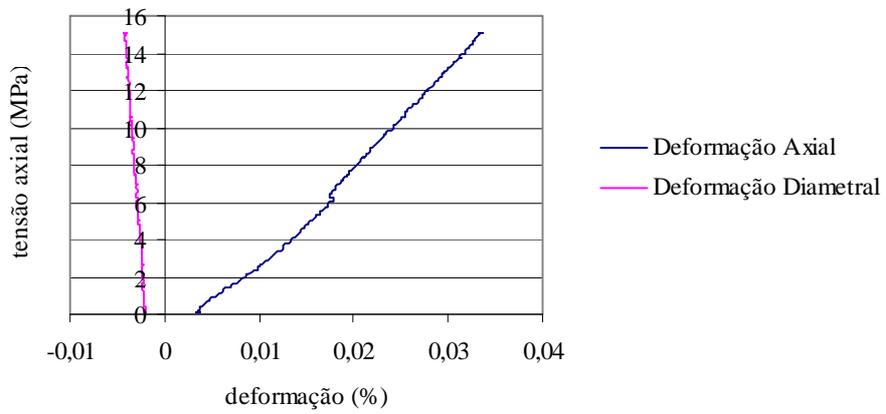
Apêndice – Gráficos de Tensão x Deformação das rochas ensaiadas

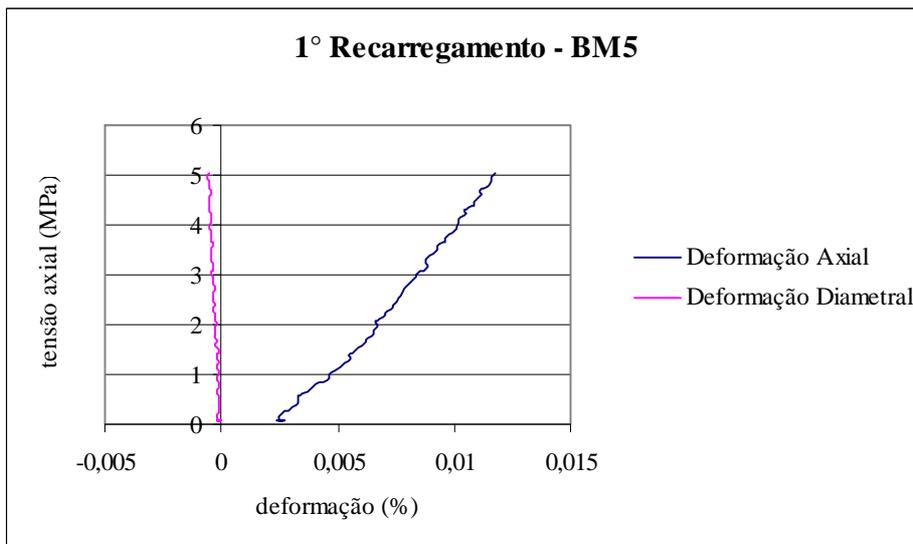
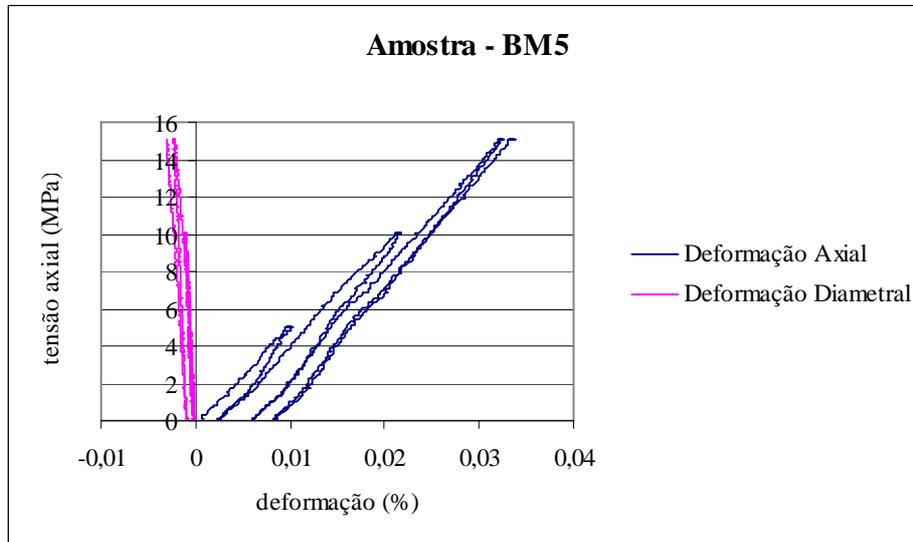


2º Recarregamento - BM3

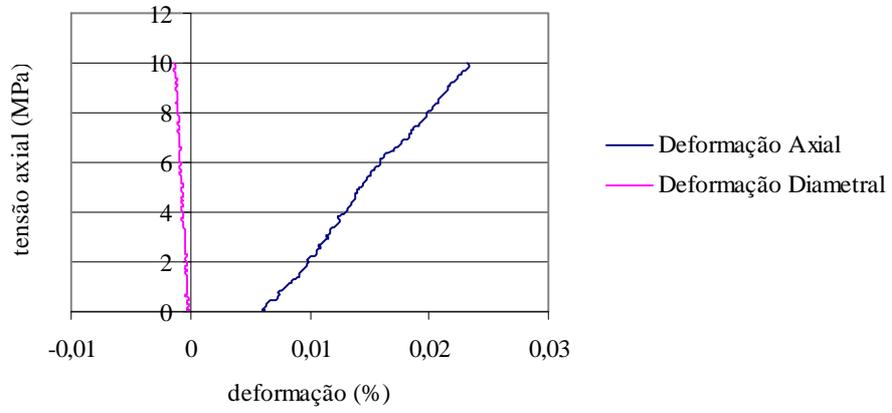


3º Recarregamento - BM3

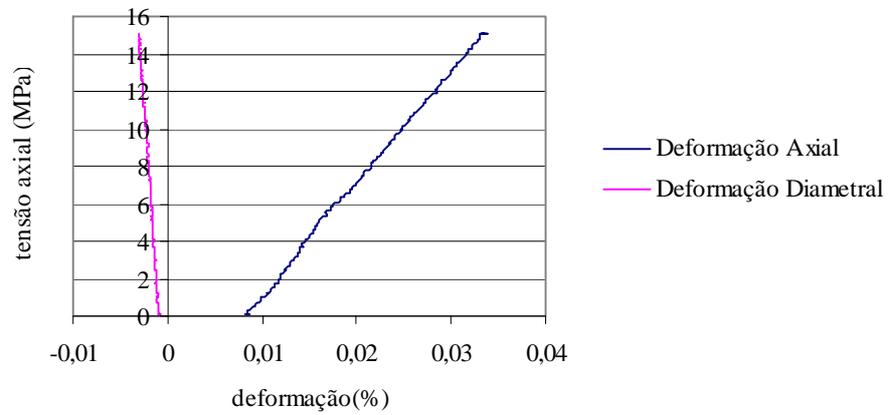


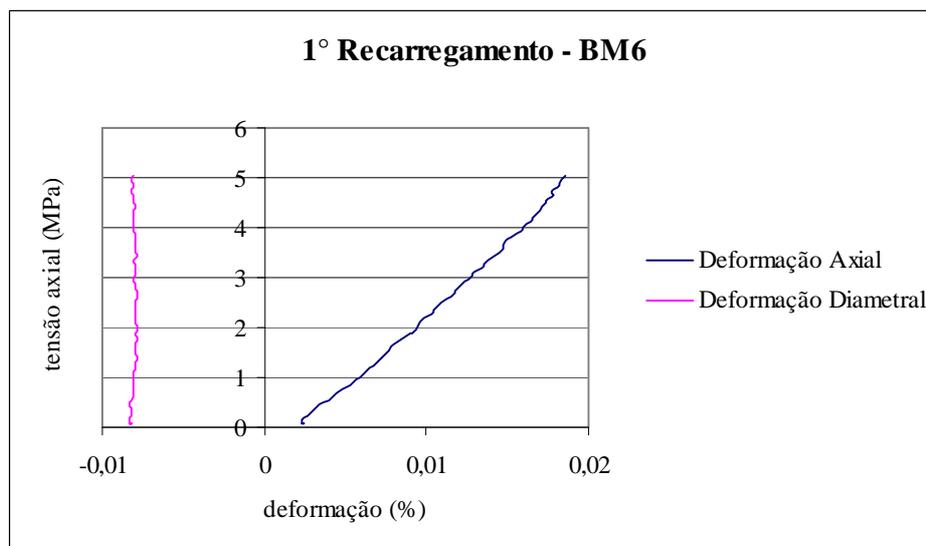
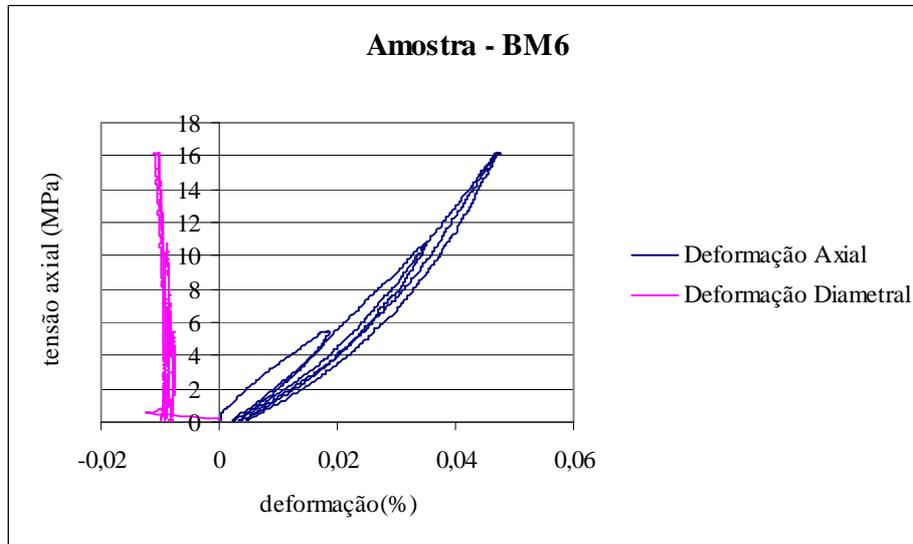


2° Recarregamento - BM5

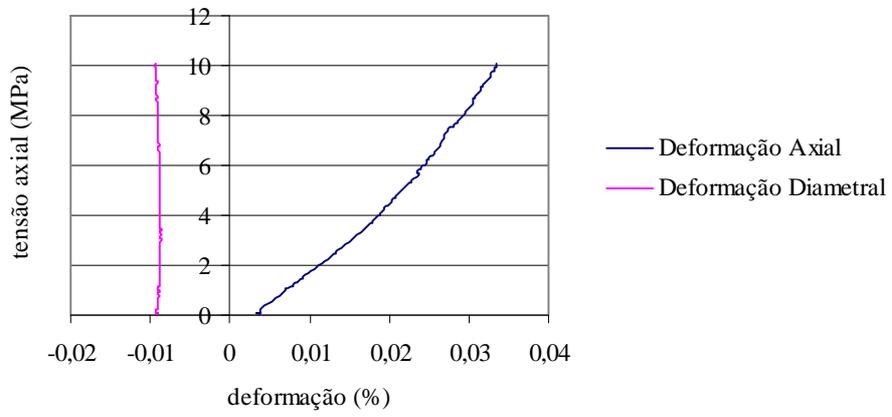


3° Recarregamento - BM5

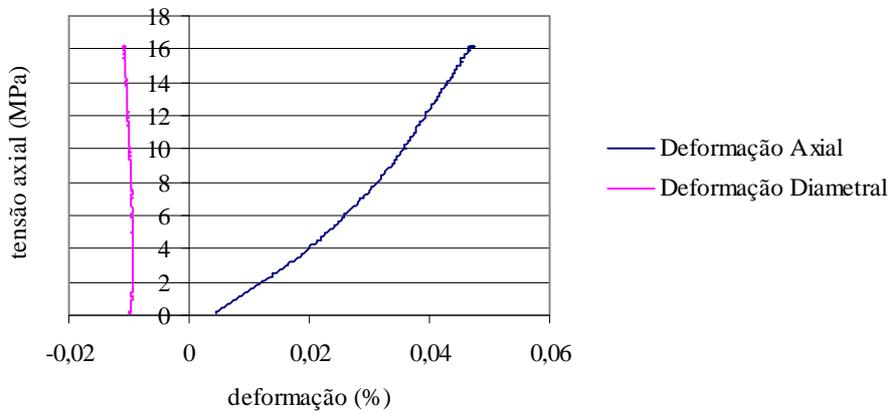


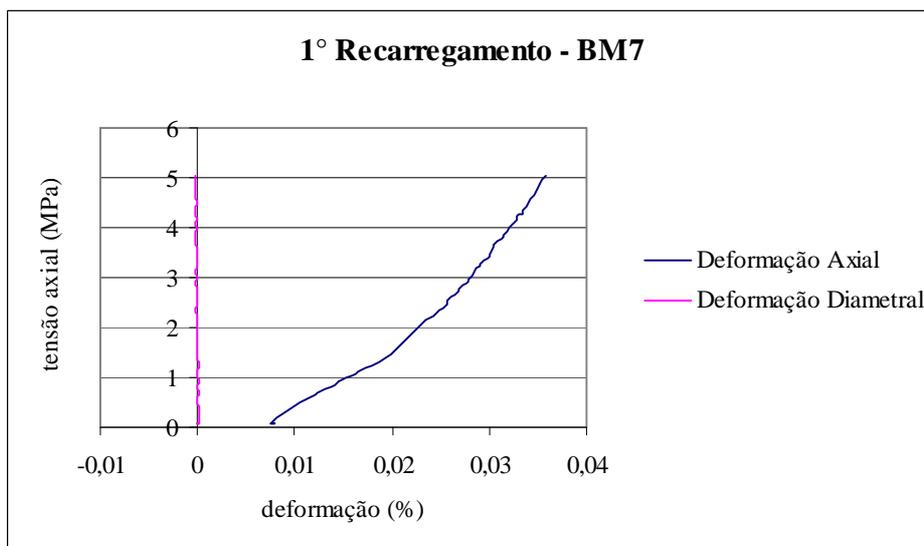
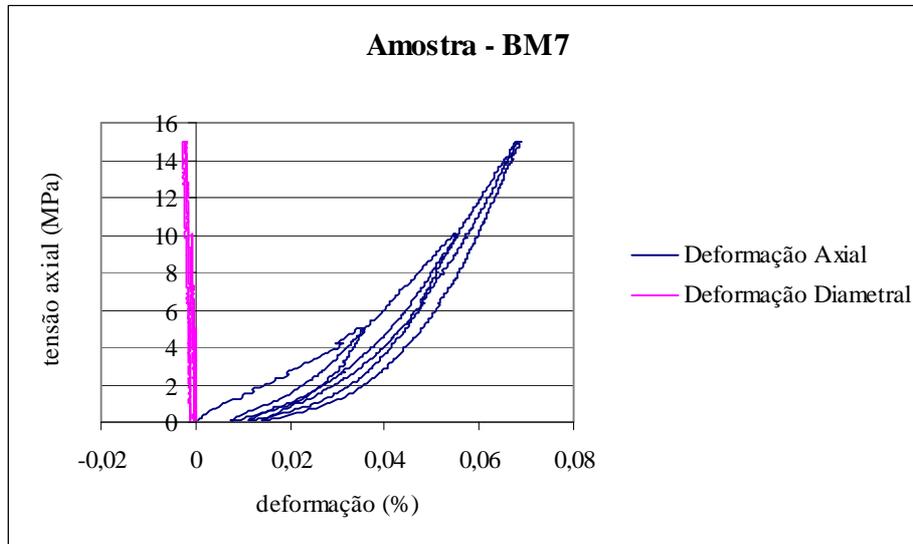


2° Recarregamento - BM6

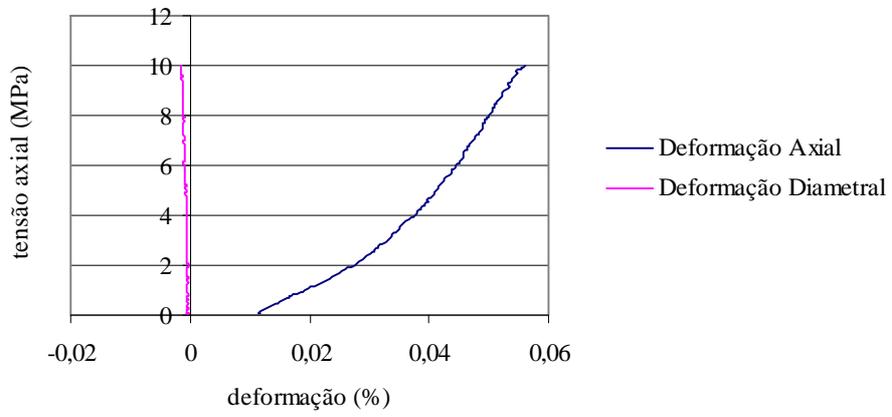


3° Recarregamento - BM6

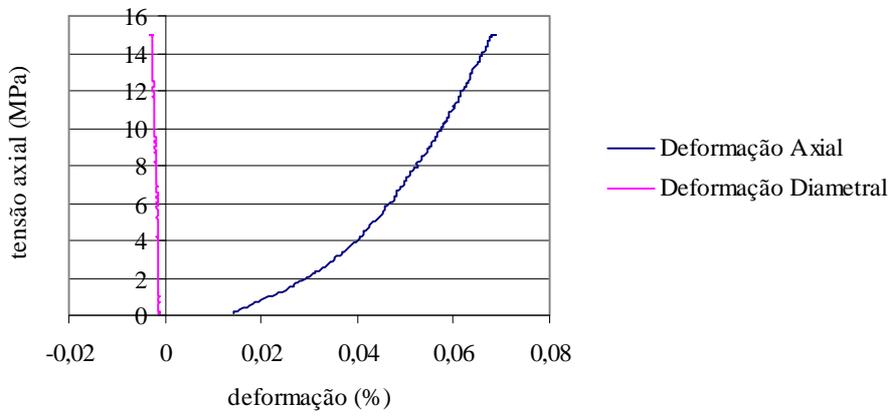


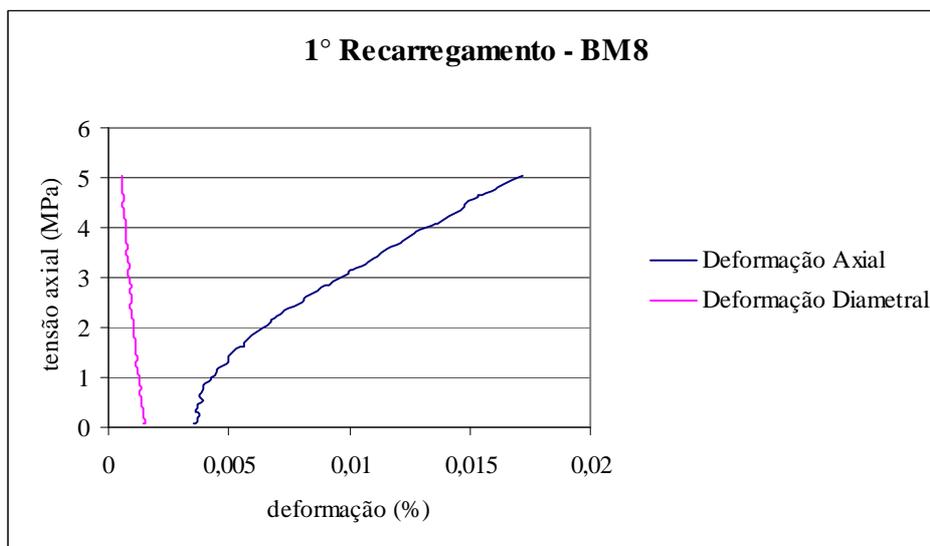
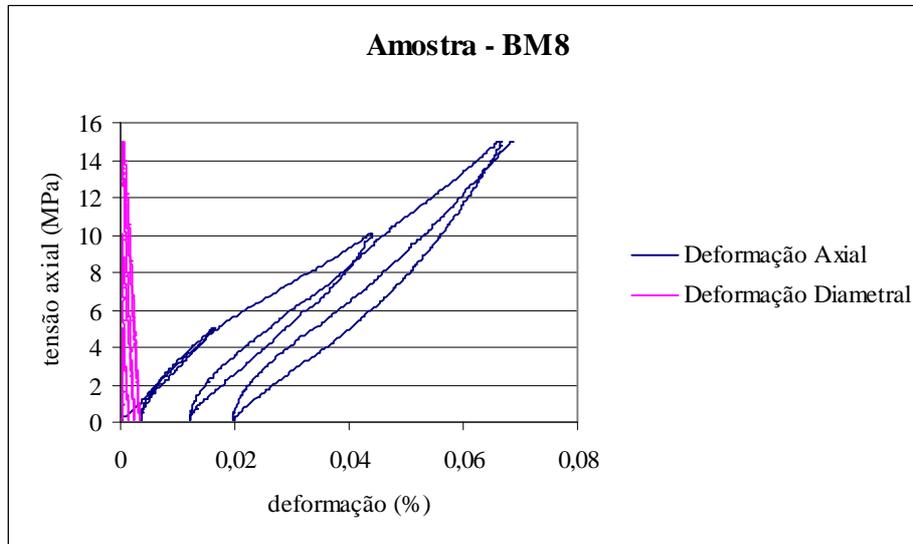


2° Recarregamento - BM7

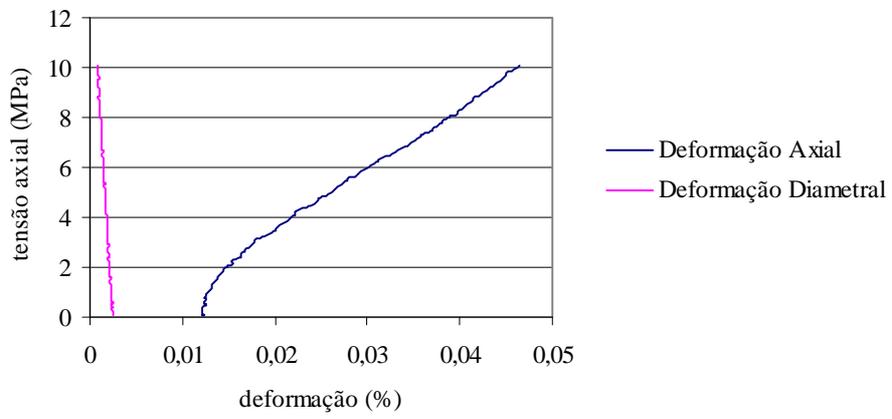


3° Recarregamento - BM7

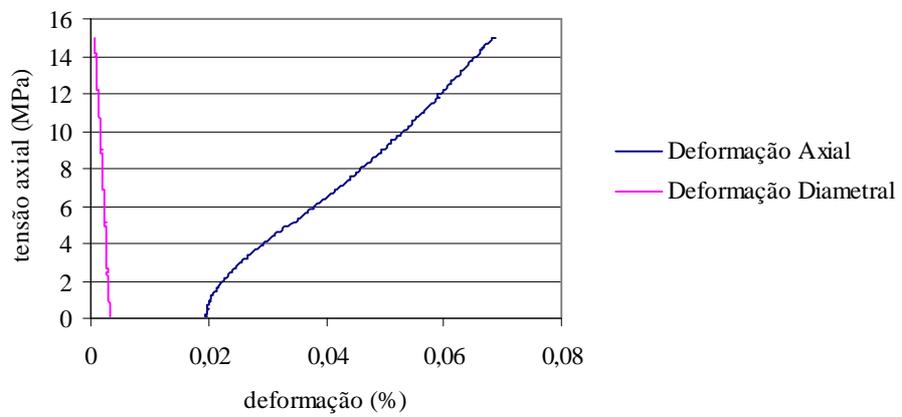


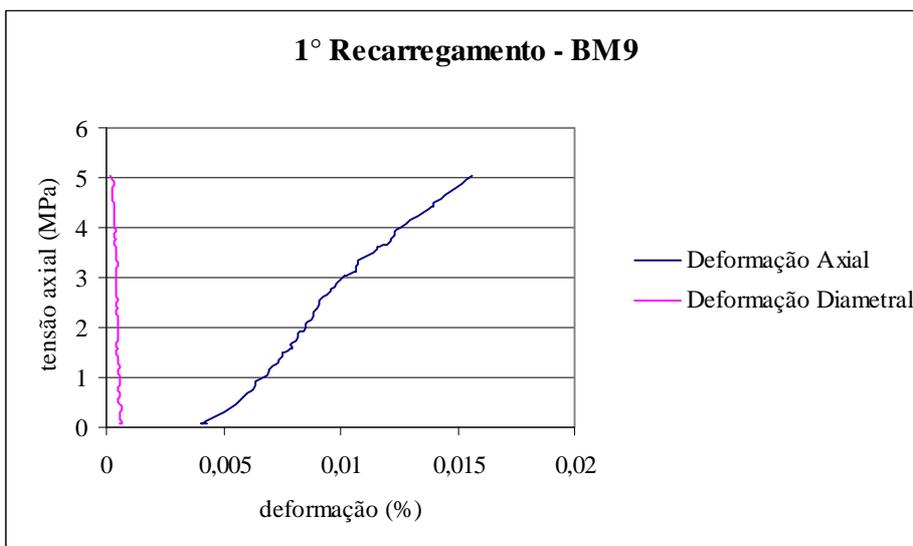
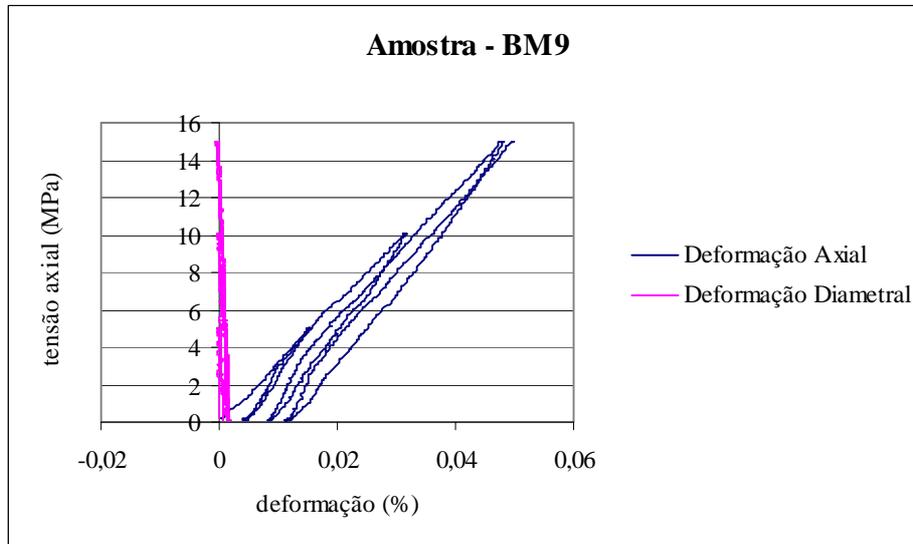


2° Recarregamento - BM8

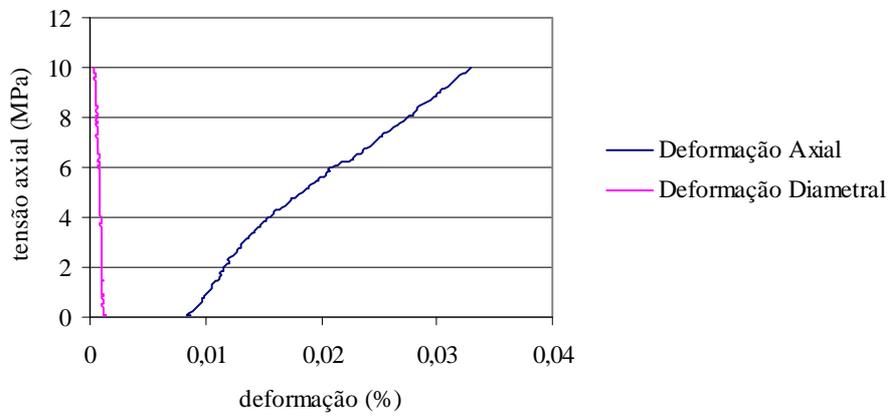


3° Recarregamento - BM8

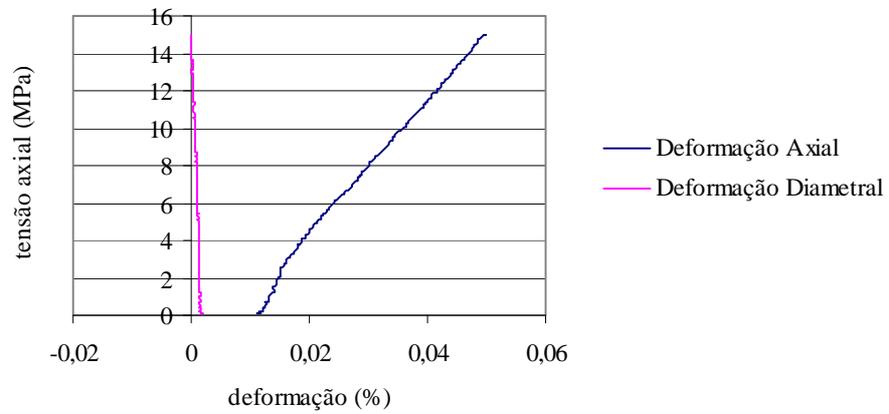




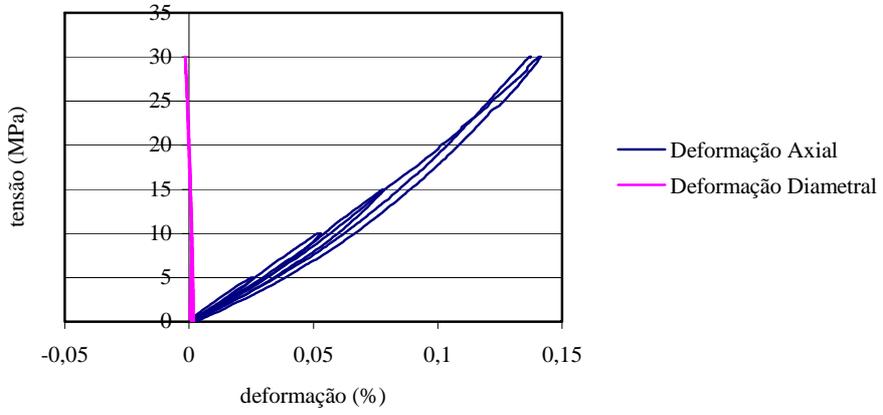
2° Recarregamento - BM9



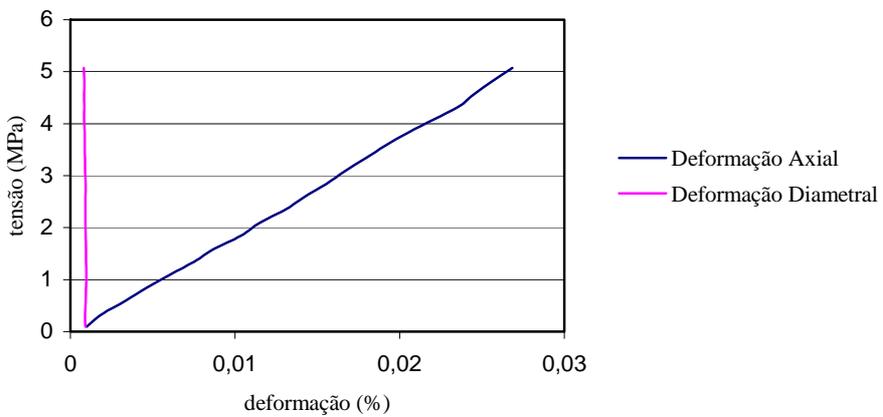
3º Recarregamento - BM9



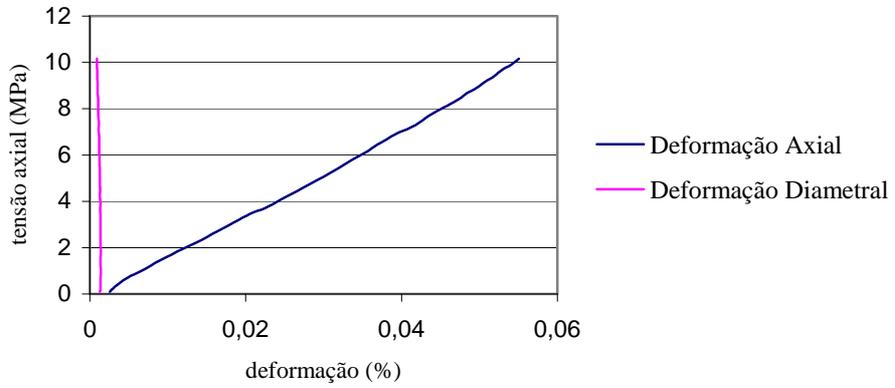
Amostra - AM1



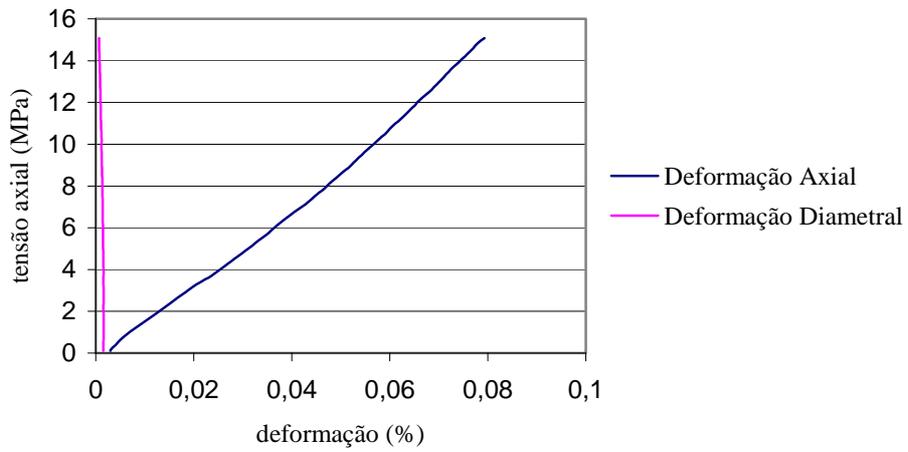
1° Recarregamento - AM1



2° Recarregamento - AM1



3° Recarregamento - AM1



4° Recarregamento - AM1

