

Universidade de São Paulo

Instituto de Geociências

**AVALIAÇÃO COMPARATIVA DOS DADOS OBTIDOS EM  
ENSAIOS DE COMPRESSÃO UNIAXIAL ENTRE CORPOS  
DE PROVA DE GRANITO E GNAISSE**

Felipe Manica de Souza

Orientador: Prof. Dr. Edilson Pissato

Co-Orientador: Me. Alexander Martin Silveira Gimenez

MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA

(TF-17/17)

SÃO PAULO

2017

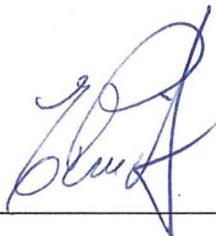
**AVALIAÇÃO COMPARATIVA DOS DADOS OBTIDOS EM  
ENSAIOS DE COMPRESSÃO UNIAXIAL ENTRE CORPOS  
DE PROVA DE GRANITO E GNAISSE**

De acordo:

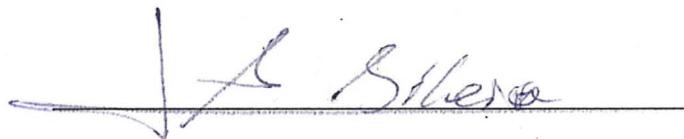
Aluno: Felipe Manica de Souza

Felipe Manica de Souza

Orientador: Prof. Dr. Edilson Pissato



Co-Orientador: Me. Alexander Martin Silveira Gimenez



## AGRADECIMENTOS

Agradeço aqueles que me ajudaram a realizar este trabalho, a começar pelos que cordialmente aceitaram a me guiar nesse projeto, o Prof. Dr. Edilson Pissato, meu orientador, que me auxiliou no suporte conceitual, na obtenção dos corpos de prova etc. e o Me. Alexander Martin Silveira Gimenez (Uruguaio), meu co-orientador, que me conduziu na realização dos ensaios físicos e de ultrassom, dicas na elaboração da monografia, ajudou com indicações bibliográficas, etc.

Também expresso minha gratidão ao Prof. Dr. Eduardo César Sansone que me permitiu utilizar o Laboratório de Mecânica de Rochas do Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo da POLI-USP e doou todas as amostras do granito e também várias do gnaisse e ao técnico do laboratório, o Jorge, por também ter me ajudado na doação dos corpos de prova e a contactar o Aron, e ajudado a extraír, cortar e polir a outra parte dos corpos de prova feitos a partir de blocos de rocha, mesmo apesar das dificuldades encontradas com o entupimento da caixa de escoamento da serra copo.

Obrigado ao Aron por ter me recebido na Embu S.A. Engenharia e Comércio, em Embu das Artes, e ajudado a obter os blocos de gnaisse.

Sou muito grato ao Prof. Dr. Rogério Pinto Ribeiro por ter me bem recebido no Departamento de Geotecnica da USP de São Carlos e permitido o uso da prensa do Laboratório de Mecânica de Rochas e ao técnico Benedito Osvaldo Souza pela grande paciência de ter preparado e operado a prensa em todos os ensaios uniaxiais, bem como ter montado o extensômetro, reservando e dedicando o uso da mesma durante uma semana para a realização dos testes.

Agradeço ao Prof. Dr. Gergely A. J. Szabó por me explicar como tirar as fotos das lâminas petrográficas.

O auxílio de todos foi fundamental e o trabalho não poderia ser concluído sem essa ajuda.

## RESUMO

Efetuou-se ensaios de compressão uniaxial em corpos de prova cilíndricos retos de granito e gnaisse de mesmo tamanho, com o objetivo de se fazer a avaliação comparativa entre essas rochas, relatando-se diferenças no comportamento das mesmas, que têm composições mineralógicas similares, mas diferentes texturas, quando submetidas a esforços compressivos. Comparou-se, também, os resultados obtidos para diferentes corpos de prova de um mesmo tipo de rocha. Foram ainda feitos ensaios complementares, de propagação de ondas ultrassônicas longitudinais e de medição das propriedades físicas das amostras, bem como uma caracterização petrográfica macro e microscópica, com o objetivo de se obterem dados complementares que ajudariam a explicar os resultados obtidos nos ensaios principais.

Ambas as rochas tinham planos de fraqueza com diferentes e múltiplas direções de orientação, que podiam ser observadas em uma mesma amostra, o granito com microfraturas preenchidas e o gnaisse com foliações. Apesar disso, havia a tendência das amostras, de ambas as rochas, de se romperem a  $20^\circ$  do eixo axial. Isso se contrapunha ao esperado de  $45^\circ$ , que, segundo modelos teóricos, é o ângulo de máximo esforço cisalhante. O valor de  $20^\circ$ , porém, tendia a ser o plano que cortava a de uma a outra intersecção entre as bases e o lado do cilindro, em um plano que tendia a ter a diagonal de uma seção meridiana imaginária do cilindro. A conclusão foi de que a expressão do modo de ruptura é tão dependente das dimensões do corpo de prova quanto dos aspectos texturais.

Observou-se também que valor do módulo de ruptura para o granito era maior do que para o gnaisse. A conclusão foi que a presença de planos de fraqueza mais bem definidos e pronunciados, uma vez que as foliações do gnaisse eram mais proeminentes do que as microfraturas do granito, foram o motivo dessa diferença.

Conclui-se então, que a textura, a composição mineralógica e as dimensões dos corpos de prova, são todos fatores que afetam grandemente os módulos de ruptura e elasticidade e o modo de ruptura das rochas.

## ABSTRACT

Uniaxial compression tests were performed on cylindrical samples of granite and gneiss which had the same size, with the goal of carrying out a comparative evaluation between these rocks, with the reporting of behavioural differences between them, which have a similar mineralogical composition but textural differences, when submitted to compressive loads. A comparison was also made among the results attained for the different samples of a same rock type. Furthermore, complementary tests were executed, which measured the propagation of longitudinal ultrasonic waves and determined physical properties, as well as a macro and

microscopic petrographic characterization, with the aim of acquiring further data which would aid in the explanation of the results that were obtained in the major tests.

Both rocks had potential fracture planes with different and multiple orientation directions, which could be seen in a same sample. The granite had microfractures that were full, and the gneiss had foliations. Nevertheless, there was a propensity for the samples, from both rocks, to fail in planes that were around  $20^\circ$  in relation to the cylinder's axial axis. This was in contradiction to the expected  $45^\circ$ , which, according to theoretic models, is the angle of maximum shearing force. Around  $20^\circ$ , though, tended to be planes which cut from one to the other intersection between the bases and side of the cylinder, in a plane that tended to contain the diagonal an imaginary cylindric section. Thus, the conclusion was that the expression of the mode of rupture is as dependent on the sample's dimensions as it is on the textural aspects.

Additionally, the modulus of rupture for the granite was greater than that for the gneiss. The conclusion was that the presence of planes of weakness that were better defined and more pronounced, since the foliations of the gneiss were more prominent than the microfractures of the granite, were the reason for this difference.

In short, it can be reckoned that the mineralogical composition, the size of the samples and the textural variations are all factor that greatly affect the moludulus of rupture and elasticity and the mode of rupture.

## Índice

• I. INTRODUÇÃO .....	1
• II. METAS E OBJETIVOS .....	3
• III. FUNDAMENTAÇÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
• III.1 Ensaio de propagação de ondas ultrassônicas .....	4
• III.1.1 Conceitos técnicos.....	4
• III. 1.2 Equipamento e modo de realização do teste .....	5
• III.2 Ensaios para a determinação da porosidade aparente e da densidade aparente.....	6
• III.2.1 Preparação das amostras .....	6
• III. 2.2 Equipamento.....	6
• III.2.3 Realização do ensaio.....	6
• III.2.4 Fórmulas e parâmetros .....	7
• III.3 Ensaio de compressão uniaxial.....	7
• III.3.1 Preparação das amostras .....	7
• III.3.2 Equipamento.....	8
• III.3.3 Realização do teste .....	9
• III. 3.4 Fórmulas e parâmetros.....	9
• IV. MATERIAIS E MÉTODOS .....	14
• IV.1 Obtenção das amostras .....	14
• IV.2 Preparação dos corpos de prova .....	14
• IV.3 Medição de dimensões.....	15
• IV.3.1 Comprimento.....	15
• IV.3.2 Diâmetro.....	15
• IV.4 Determinação da densidade e da porosidade .....	16
• IV.4.1 Determinação da massa seca .....	16
• IV.4.2 Determinação das massas submersa e saturada .....	16
• IV.5 Ensaio de ultrassom .....	17

• IV.6 Descrição macroscópica e microscópica das rochas .....	18
• IV.6.1 Granito .....	18
• IV.6.2 Gnaiss .....	23
• IV.7 Ensaio de compressão uniaxial.....	27
• V. RESULTADOS OBTIDOS .....	29
• V.1 Módulo de ruptura .....	29
• V.2 Módulo de elasticidade (Young) .....	30
• V.3 Modo de ruptura.....	32
• VI. INTERPRETAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....	34
• VI.1 Comparação entre as duas rochas .....	34
• VI. 1.1 Módulo de ruptura .....	34
• VI. 1.2 Módulo de elasticidade .....	36
• VI.3 Modo de ruptura observado.....	38
• VI.4 Ensaios não destrutivos.....	39
• VII. CONCLUSÕES.....	41
• VIII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	42

## I. INTRODUÇÃO

Materiais sintéticos, produzidos pelo homem, analisados no ramo da mecânica de materiais, como o aço e o concreto, tendem a ser homogêneos (mesma composição por todo o corpo) e isotrópicos (mesma propriedade direcional por todo o corpo). Entretanto, rochas são heterogêneas e anisotrópicas. É comum então a simplificação e generalização de métodos analíticos através da consideração da rocha como sendo homogênea e isotrópica (Rahn, 1986).

Essa simplificação significa que dados laboratoriais para rochas não são tão confiáveis como aqueles obtidos para materiais na engenharia civil. Entretanto, é fundamental que se tenha uma compreensão dos testes laboratoriais, uma vez que eles dão origem a modelos e fórmulas (Rahn, 1986).

É importante que engenheiros saibam como rochas e maciços rochosos se deformam quando sujeitos a diversas cargas relacionadas, por exemplo, a estruturas, como túneis, pedreiras, fundações em geral, etc (Amadei s.d.; Rahn, 1986). Essa deformação pode ser na forma de recalque, subsidência da superfície ou o fechamento de paredes em aberturas subterrâneas. A estabilidade de represas, por exemplo, está ligada à deformação da rocha da fundação quando submetida à carga gerada pelo peso da estrutura. Essa deformação pode ser instantânea ou levar um longo tempo e é função da deformabilidade, que depende do tipo de rocha, e do efeito de descontinuidades (Amadei s.d.).

Rochas cristalinas (ígneas e metamórficas) compõem 95% da crosta continental e 25% das rochas expostas (Andrade et al., 2009). Granitos e basaltos são as rochas ígneas mais comuns da crosta (Szabó et al., 2009), com o granito sendo a mais abundante da crosta continental, especialmente da parte superior da mesma (Ernesto et al., 2009), que é onde a grande maioria dos projetos de engenharia se encontram. Gnaisses são rochas que também ocorrem em grande abundância na crosta continental, apesar de geralmente estarem em maiores profundidades do que granitos em regiões cratônicas (regiões que permaneceram geologicamente estáveis por longos períodos até atualmente) com granitos ocorrendo principalmente nos níveis superiores, mas também intermediários da crosta, e gnaisses ocorrendo geralmente nos níveis intermediário e inferior da crosta continental de regiões cratônicas (Ernesto et al., 2009).

Um exemplo de um local onde essas rochas são encontradas é a região metropolitana de São Paulo, que possui grande parte de seu embasamento, que aflora com grande frequência, como é possível ver na Fig. 1(a), composto por granitos, esses ocorrendo na forma de batólitos a stocks de granitoides intrusivos, e gnaisses, sendo esses ortognaisses,

moderadamente migmatizados, do Complexo Embu em sua maioria, mas também presentes no Complexo Costeiro e na Nappe Socorro-Guaxupé (Fig. 1(a)). Isso é de grande relevância, por exemplo, para as obras do metrô de São Paulo, onde gnaisses do Complexo Embu ocorrem nas obras da linha 17-Ouro e granitoides ocorrem em grande parte das obras das linhas 5-Lilás e 6-Laranja (Fig. 1(b)).

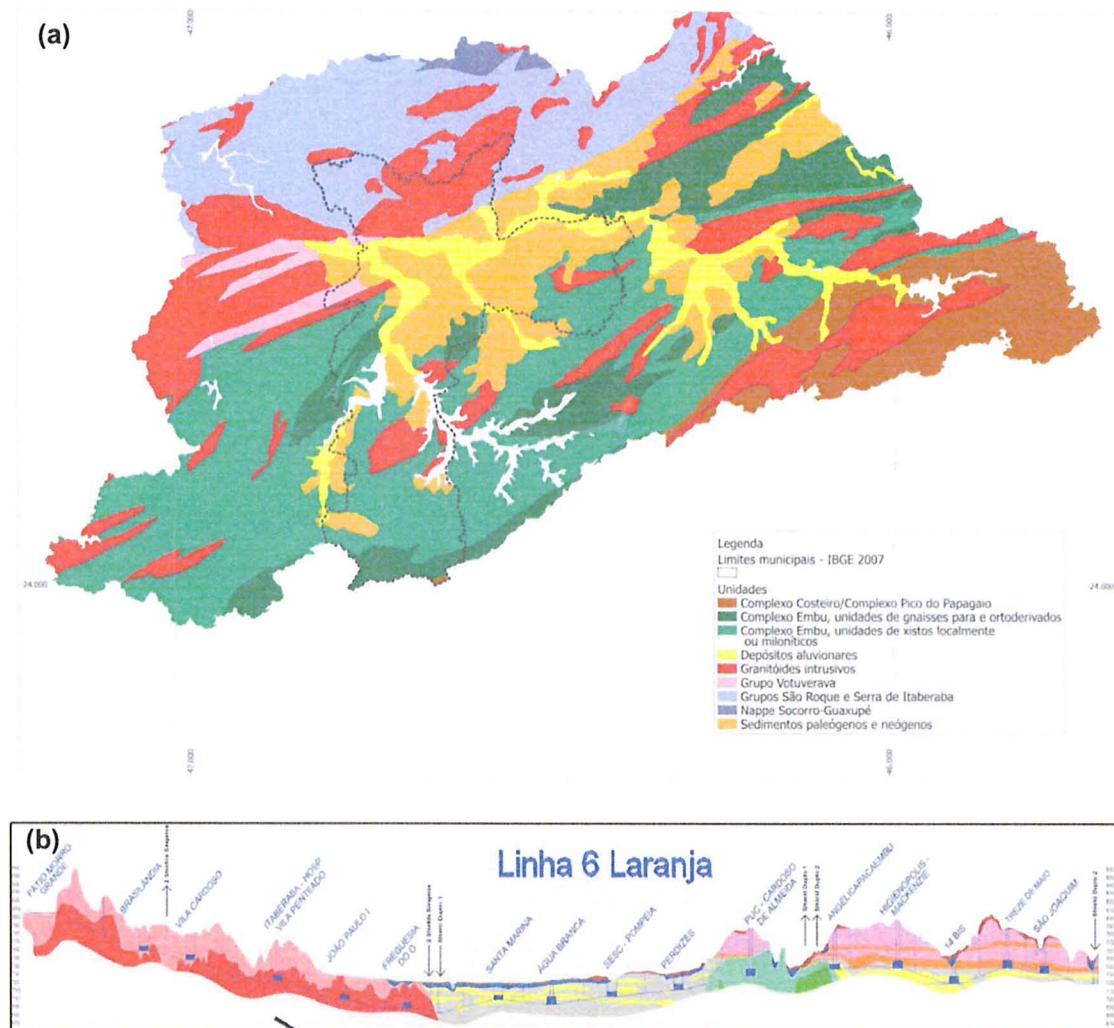


Fig. 1- (a) Mapa geológico da região metropolitana de São Paulo. (b) Seção Geológica da Linha 6- Laranja do metrô. Granitoides em vermelho (à esquerda da seção) (Monteiro *et al.*, 2012).

Por esses motivos, neste trabalho foram efetuados ensaios em granito e gnaissse. Além disso, essas rochas foram selecionadas por terem composições similares, mas diferentes texturas, ou seja, um diferente arranjo dos minerais, com o granito sendo menos anisotrópico, com textura fanerítica, e o gnaissse sendo mais anisotrópico, possuindo orientação dos minerais em uma textura lepido-granoblástica. Isso permitiu a análise da influência dessa diferença sobre os valores a serem obtidos pelo ensaio de compressão uniaxial, ensaio no

qual foram obtidos os módulos de elasticidade e de ruptura, assim como na propagação de ondas ultrassônicas para cada rocha.

O ensaio de compressão uniaxial que foi efetuado permitiu a análise do comportamento dos dois tipos de rocha quando submetidos a um incremento de carga, com a determinação dos módulos de elasticidade (Young) e de ruptura (que mede a resistência, ou seja, o quanto de tensão essas rochas são capazes de suportarem antes que elas se rompam e haja um colapso) e também a observação e o registro das formas de ruptura das amostras. Previamente a este ensaio foram ainda realizados testes para determinar os índices físicos, sendo esses a porosidade aparente e a densidade aparente dos corpos de prova de granito e gnaisse.

As propriedades físicas obtidas e a velocidade das ondas ultrassônicas foram correlacionadas com os valores obtidos para os módulos das amostras de cada tipo de rocha, procurando-se então encontrar a relação de como essas propriedades influenciam os valores dos módulos, uma vez que propriedades como a porosidade (primária, secundária e terciária) e a composição mineralógica influenciam no comportamento de rochas quando essas são submetidas a esforços. Dessa forma, a realização de testes que mediram a porosidade aparente, a densidade aparente e a capacidade de propagação de ondas ultrassônicas dos corpos de prova analisados nesse trabalho ajudou a explicar os resultados que foram obtidos no ensaio de compressão uniaxial, verificando qual é a influência das propriedades físicas analisadas no comportamento da rocha sob compressão (módulo de elasticidade), na resistência (módulo de ruptura) à compressão e no modo de ruptura da rocha comprimida. Também foi de interesse a descrição das rochas com o auxílio do microscópio petrográfico, que permitiu a melhor caracterização das mesmas, como, por exemplo, a observação da proporção entre os minerais constituintes e a textura, o que foi de auxílio na interpretação dos dados obtidos nos ensaios práticos.

## II. METAS E OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho foi o de efetuar uma avaliação comparativa entre os litotipos em estudo, granito e gnaisse, embasada nos resultados e comportamentos, os módulos de elasticidade e ruptura e o modo de ruptura, obtidos no ensaio de compressão uniaxial. Essa comparação visou a compreender como duas rochas com composições similares, mas diferentes texturas, se comportam sob compressão uniaxial.

Secundariamente, esse mesmo procedimento comparou os diferentes corpos de prova do mesmo tipo de rocha. Essa comparação visou a compreender como variações de composição e textura de uma rocha de um mesmo tipo e local influenciam nos dados adquiridos. Isso foi

de interesse especial para o gnaisse, que tinha mais diferenças de um corpo de prova para o outro, devido a diferentes cimentos do mergulho das camadas, do que o granito.

Ainda como objetivo secundário, foi abordada a correlação da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas em amostras secas e saturadas, da densidade aparente e da porosidade aparente com o módulo de ruptura e o módulo de elasticidade. Mesmo que sutis, esperava-se que variações naqueles dados poderiam ajudar a explicar diferenças nos valores dos destes, como por exemplo, a presença de mais fraturas em um corpo de prova do que em outro pode explicar o fato deste ter um menor módulo de ruptura.

### III. FUNDAMENTAÇÃO BIBLIOGRÁFICA

#### III.1 Ensaio de propagação de ondas ultrassônicas

##### III.1.1 Conceitos técnicos

Esse teste consiste na transmissão de ondas sonoras de alta frequência por um meio. Geralmente, a frequência está entre 0,5 a 20 MHz, valores muito acima do que humanos podem escutar (entre 20 Hz e 20 kHz) (IAEA, 1999).

Ondas sonoras são ondas mecânicas, ou seja, elas necessitam de um meio para se propagarem, em oposição a ondas eletromagnéticas, que não precisam de um meio para se propagarem (Serway e Jewett, 2004, apud Gimenez, 2012). Elas são classificadas com base no modo de vibração em relação à direção de propagação do meio em longitudinais, transversas, de superfície e Lamb (IAEA, 1999).

As longitudinais (as de interesse para o trabalho) são aquelas que vibram paralelamente à direção de propagação através de alternância de zonas de compressão e rarefação. Esse tipo de onda é de fácil geração e detecção, se propaga em sólidos, líquidos e gases, e é o mais usado em testes ultrassônicos (IAEA, 1999).

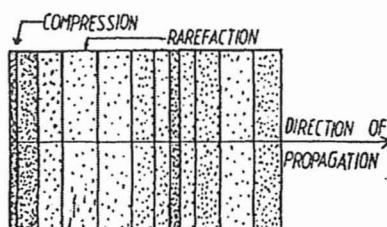


Fig. 2- Onda longitudinal, que consiste na alternância de compressões (*compression*) e rarefações (*rarefaction*) ao longo de uma direção de propagação (*direction of propagation*) (IAEA, 1999).

A utilidade do método é a avaliação indireta do grau de alteração e de coesão dos minerais (Frascá, 2003), uma vez que o ar não é um bom condutor, logo, fissuras são detectadas através da variação da velocidade (Gimenez, 2012), com a diminuição da velocidade conforme o aumento do grau de fraturamento (Kahraman, 2012). Além disso, é um ensaio não destrutivo, ou seja, que examina os componentes e a constituição do material para detectar se há presença de defeitos em sua estrutura sem comprometer o uso do mesmo no futuro (IAEA, 1999, Frascá, 2003).

Calcula-se a velocidade tanto para ondas compressivas/longitudinais (e também para transversas) através da fórmula  $V = l/t$ , onde  $l$  é a distância percorrida pela onda (comprimento do corpo de prova) em metros e  $t$  o tempo de trânsito em segundos (Frascá, 2003; Lama e Vutukuri, 1978; Siggins, 1993):

### *III. 1.2 Equipamento e modo de realização do teste*

A intensidade das ondas transmitidas pelo material pode ser medida após ter sofrido reflexão em interfaces (sendo medida no mesmo local de transmissão) ou no outro lado da amostra (com um transdutor transmissor em uma das bases e um receptor em outra), como indicado na Fig. 3 (IAEA, 1999) (esse último sendo o método de interesse para o presente trabalho).

O equipamento deve ser capaz de emitir um pulso em um terminal emissor, que é acoplado a uma base do corpo de prova, e de receber o mesmo após ele ter atravessado a amostra em outro terminal, acoplado à outra base do corpo de prova (Gimenez, 2012, Siggins, 1993). Esses terminais são denominados de transdutores (aparelhos que convertem uma forma de energia em outra) (IAEA, 1999), e são feitos de material piezoeletrico (material capaz de converter energia elétrica em energia mecânica, no caso do presente trabalho em energia ultrassônica, e vice-versa) (Siggins, 1993; IAEA, 1999). O ideal é que os transdutores tenham o mesmo diâmetro do corpo de prova (Siggins, 1993). O aparelho informa então o tempo de trânsito entre o terminal emissor e o terminal receptor (Gimenez, 2012).

Conhecendo-se a distância de ponto a ponto de posicionamento dos transdutores na amostra no momento do ensaio é possível calcular a velocidade de propagação de onda ultrassônica ( $V$ ) (Gimenez, 2012).

Recomenda-se ainda a utilização de um acoplante, sendo esse um material viscoso que auxilie no contato entre o transdutor e a superfície base do corpo de prova, podendo isso ser um gel, graxa, glicerina, etc (Gimenez, 2012).

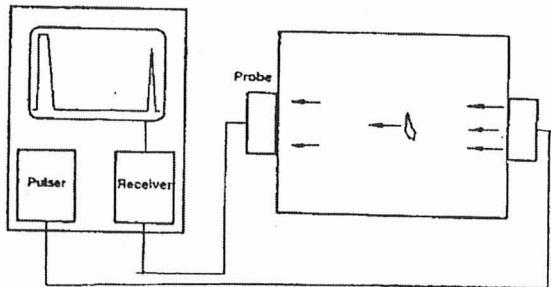


Fig. 3- Ilustração do esquema de aparelhagem a ser utilizado para o teste ultrassônico, com a onda sendo transmitida de um lado para o outro do corpo de prova, a partir de um transdutor pulsante (*pulser*) para um transdutor receptor (*Receiver*) (IAEA, 1999).

### **III.2 Ensaios para a determinação da porosidade aparente e da densidade aparente**

#### *III.2.1 Preparação das amostras*

O recomendado pela ABNT (2010) é de que os corpos de prova tenham dimensões entre 5 e 7 cm com relação base:altura 1:1 (esses podem ser quadrados ou cilíndricos). Orienta-se ainda que se prepare um mínimo de 10 corpos de prova.

#### *III.2.2 Equipamento*

A ABNT (2010) determina que os seguintes aparelhos são necessários: (a) estufa ventilada; (b) balança com resolução de 0,01 g que permita pesagens hidrostáticas; (c) equipamentos para serragem; (d) bandejas de material não oxidável, com dimensões adequadas para a acomodação dos corpos de prova; (e) recipiente de dimensões adequadas para acondicionamento de água para a pesagem dos corpos de prova na condição submersa; (f) recipiente adequado para ser submetido ao vácuo, que seja capaz de suportar pressão de 2 ( $\pm 7$ ) KPa ou 15 ( $\pm 5$ ) mmHg (este equipamento é opcional); (g) dessecador e substância desidratante.

#### *III.2.3 Realização do ensaio*

Inicialmente, deve-se lavar os corpos de prova em água corrente e escová-los com escovas de cerdas macias. Em seguida, os mesmos são colocados em uma estufa ventilada à temperatura de 70 ( $\pm 5$ ) °C até que a massa fique constante. Nesse momento os corpos são retirados da estufa e colocados no dessecador com o intuito de resfriá-los (ABNT, 2010).

Após terem sido resfriados e retirados do dessecador, os corpos de prova são pesados individualmente ao ar livre para determinar-se a massa seca ( $M_{sec}$ ). Os corpos são então colocados na bandeja, onde água deionizada ou destilada é colocada até 1/3 da altura dos corpos de prova, e após 4 horas até 2/3. Após mais 4 horas, completa-se a submersão dos corpos de prova. Deixa-se então os corpos de prova em tal condição por 40 horas ou, opcionalmente, por 2 horas sob vácuo (ABNT, 2010).

O próximo passo é a pesagem individual dos corpos na condição submersa, por meio do dispositivo da balança para pesagem hidrostática e com o auxílio de um fio de massa desprezível para determinar-se a massa submersa ( $M_{sub}$ ). Finalmente, retira-se os corpos de prova da água, estes são enxugados superficialmente e pesados ao ar para determinar-se a massa saturada ( $M_{sat}$ ) (ABNT, 2010).

### III.2.4 Fórmulas e parâmetros

Para o cálculo da densidade aparente ( $\rho_a$ ) utiliza-se a fórmula  $\rho_a = \frac{M_{sec}}{M_{sat} - M_{sub}} \times 1000$ , onde  $M_{sat}$  é a massa do corpo saturada,  $M_{sec}$  a massa seca e  $M_{sub}$  a massa adquirida por pesagem hidrostática. (1000Kg/m<sup>3</sup> é o valor assumido para a densidade aparente da água) (ABNT, 2010).

Para o cálculo da porosidade aparente ( $n_a$ ) utiliza-se a fórmula  $n_a = \frac{M_{sat} - M_{sec}}{M_{sat} - M_{sub}} \times 100$  (ABNT, 2010).

## III.3 Ensaio de compressão uniaxial

### III.3.1 Preparação das amostras

A ASTM (2001) recomenda um diâmetro mínimo de 1 7/8 polegadas (47mm) enquanto a razão comprimento:diâmetro recomendada é de 2,0 a 2,5:1. Bieniawski e Bernede (1979) recomendam uma razão 2,5 a 3:1, com a amostra tendo um diâmetro mínimo de tamanho de testemunho NX (54mm). Pells (1993) recomenda uma razão entre 2 e 3:1. Já a ABNT (2010), recomenda uma relação de 1:1 para corpos de prova cilíndricos, entretanto, essa associação também especifica de que os corpos de prova tenham de ter entre 70 ( $\pm 2$ ) a 75 ( $\pm 2$ )mm de diâmetro.

As faces da amostra (base) devem ser polidas com ao menos 0,02 mm de precisão para rochas resistentes, 0,05 mm para rochas de resistência intermediária e 0,1mm para rochas de baixa resistência e as laterais retas, com um desvio de não mais que 0,3 mm (1,5 mm para rochas fracas, 1,0 mm para médias e 0,5 mm para resistentes). Para verificar se o corpo de prova se enquadra nesse requisito, a recomendação dada é a de que o mesmo seja rolado em uma superfície plana e lisa e que o maior espaço entre ambos não exceda o valor de 0,02 polegadas (0,5 mm). Outra possibilidade ainda é de colocar a amostra em um bloco em V, no qual os lados do mesmo estejam a 90° um do outro, posicionar um micrometro sobre a amostra e mover a mesma de um lado para o outro do bloco, sem rotacioná-la, observando-se as alterações máximas e mínimas medidas. Rotacionar a amostra para 120° e depois para 240°, repetindo o processo de medição para cada caso. Verificar se a maior diferença entre os valores não passa de 0,5 mm (ASTM, 2001; Pells, 1993).

Quanto ao ângulo formado entre a base e a geratriz do corpo de prova cilíndrico, o recomendado é de que a variação não ultrapasse  $\pm 0,5^\circ$  de  $90^\circ$  (ABNT, 2010).

O número de amostras deve ser considerado por razões práticas, entretanto um número de pelo menos cinco (para cada tipo de rocha) é preferível, pelo menos para rochas isotrópicas (ABNT, 2010; Bieniawski e Bernede, 1979).

Já em rochas que tenham camadas, como estruturas gnáissica, acamadada, foliada, xistosa etc., orienta-se que 5 corpos de prova sejam preparados na direção paralela e 5 na direção perpendicular às camadas (ABNT, 2010).

### III.3.2 Equipamento

Para efetuar o teste recomenda-se um disco cilíndrico (prensa), de espessura entre 15 e 20 mm, de cada lado da amostra, de dureza mínima HRC58 na escala Rockwell (Pells, 1993, indica uma dureza mínima de 30 na escala Rockwell), sendo esses feitos normalmente de aço inox. Idealmente os discos devem ter no mínimo o mesmo diâmetro que o corpo de prova e no máximo 1,5 a 2 mm a mais que o diâmetro do corpo de prova. A placa da base é fixa e a do topo é rosqueada a um cano compressor que aplica a carga. Recomenda-se que haja uma esfera no topo do disco superior que tenha a capacidade de se movimentar livremente e de ser travada no local o que permite pleno contato com as faces do corpo de prova. (ABNT, 2010; ASTM, 2002, Pells, 1993).

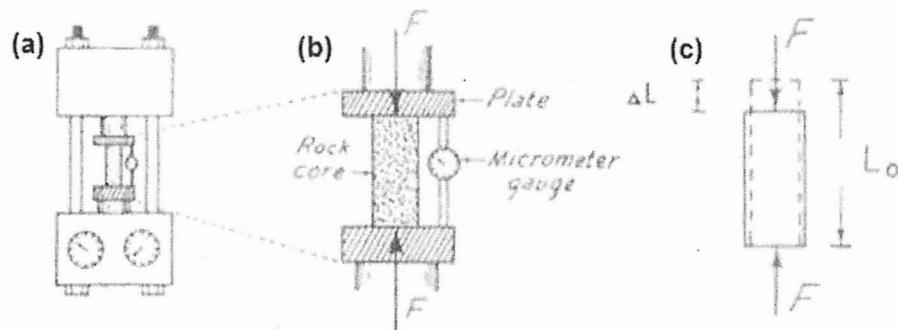


Fig. 4- (a) Máquina de compressão (presa). (b) Medidor micrometro/extensômetro (*MicrometerGauge*) para medir a deformação. (c) Esquema de deformação de corpo de prova (Johnson, 1970, apud Rahn, 1986).

O equipamento deve ser capaz de aplicar a carga de modo controlável e contínuo, mecanicamente ou eletronicamente. O equipamento deve ter uma precisão de 1% na medição da tensão (ABNT, 2010; Bieniawski e Bernede, 1979). É necessário que a prensa tenha uma capacidade mínima de 1000 kN, com resolução mínima de 2 kN (ABNT, 2010).

Para medir a tensão é necessário um medidor micrométrico/ extensômetro. Para medir a deformação axial os medidores são colocados por volta do corpo de prova a meia altura igualmente espaçados (ASTM, 2002). Não se recomenda que o extensômetro seja ligado ao

disco de prensa, ou seja, deve se medir a deformação diretamente do corpo de prova (o extensômetro deve ser colocado diretamente no corpo de prova) e não pela descendência da prensa. Esses podem ser de três tipos, mecânico, elétrico ou ótico. Recomenda-se o uso de um extensômetro com precisão mínima de 1 $\mu$ m (Lama e Vutukuri, 1978).

### *III.3.3 Realização do teste*

Lama e Vutukuri (1978) sugerem a aplicação de uma carga de 0,5-1,0 MPa/s, de modo que a ruptura ocorra entre 5 a 15 minutos. A ABNT (2010) recomenda que a taxa de carga aplicada seja menor que 0,7 MPa/s ou 1,3 mm/s. Por sua vez, Pells (1993) diz que a carga deve ser aplicada de modo que ruptura ocorra de 10 a 20 min. Já Bieniawski e Bernede (1979) orientam que a ruptura ocorra entre 5 a 10 minutos. A tensão máxima deve ser registrada em newtons, com precisão de 1%. Feito isso, para determinar-se o valor do módulo de ruptura, divide-se este valor pela área da seção do corpo, transformando-se assim o valor para Pascal (1 N/m<sup>2</sup>= 1 Pa) (Bieniawski e Bernede, 1979).

Deve-se tomar um mínimo de 20 a 50 medidas no extensômetro desde o início do teste até a ruptura, para construir-se um gráfico aceitável (Lama e Vutukuri, 1978).

Erros podem ser causados associados a superfície não plana, o que tem um efeito significante levando a uma ruptura prematura; superfícies não paralelas tendo um leve efeito conduzindo a uma ruptura prematura; razão comprimento: diâmetro muito pequena tendo um leve efeito no aumento do módulo; laterais da amostra não sendo lisas, tendo um leve efeito conduzindo à uma ruptura prematura; placas não sendo do mesmo tamanho que o corpo tem efeito mínimo para rochas fracas (<50 MPa), mas o módulo fica muito alto para rochas resistentes. Tempo de carga também contribui, com um aumento no módulo de elasticidade se o tempo de carga é menor que 30 s, e uma diminuição para um tempo maior que 15 min (Pells, 1993).

A velocidade com que se aplica a carga afeta o valor de  $E$ , quanto mais rápido se aplica a carga maior o valor. Por exemplo, esse aumento chega até a 30% em arenitos (Jaeger, 1979).

### *III. 3.4 Fórmulas e parâmetros*

Tensão ( $\sigma$ ) é força ( $F$ ) por unidade de área ( $A$ ) aplicada em um plano específico do material. Apesar de não poder ser medida diretamente, pode ser calculada assumindo-se que ela está uniformemente distribuída no material. O cálculo é realizado através da fórmula  $\sigma = \frac{F}{A}$ . A unidade de tensão é N/m<sup>2</sup> (1 N/m<sup>2</sup> = 1 Pa), sendo que Newton é a unidade definida como a força necessária para acelerar 1 Kg à 1 m/s<sup>2</sup> (ABNT, 2010; ASTM, 2002; Bieniawski e Bernede, 1979; Lama e Vutukuri, 1978; Rahn, 1986).

A medição da deformação de um material em resposta a uma carga aplicada  $\epsilon$ , é efetuada pelo uso da fórmula  $\epsilon = \frac{L-L_0}{L_0}$ , onde  $L$  é a deformação axial e  $L_0$  o comprimento inicial.  $\epsilon$  é adimensional, uma vez que ele consiste na divisão de comprimento por comprimento (ASTM, 2002; Bieniawski e Bernede, 1979; Lama e Vutukuri, 1978; Rahn, 1986).

A fórmula  $E = \frac{\sigma}{\epsilon}$  é utilizada para o cálculo do módulo de Young, que tem como unidade N/m<sup>2</sup>. Experimentalmente, o módulo ( $E$ ) pode ser obtido através da curva de tensão-deformação (ASTM, 2002; Rahn, 1986).

O módulo de Young mede a rigidez de um material, o que é a força necessária para deformar um material (para causar uma mudança de comprimento/ relacionado à deformação elástica), e não resistência que é a força necessária para causar ruptura (o que é dado pelo módulo de ruptura/ relacionado à deformação plástica) (Pells, 1993).

O módulo de Young é calculado para rochas através do módulo da secante ou tangente. Normalmente, usa-se a tensão a 50% do módulo de ruptura (ASTM, 2002; Bieniawski e Bernede, 1979; Pells, 1993) (Fig. 5(a) e Fig. 5(c)). Outro método para o cálculo do módulo de elasticidade se dá pela utilização da média da parte mais ou menos linear da curva tensão-deformação (Fig. 5(b)) (ASTM, 2002; Bieniawski e Bernede, 1979).

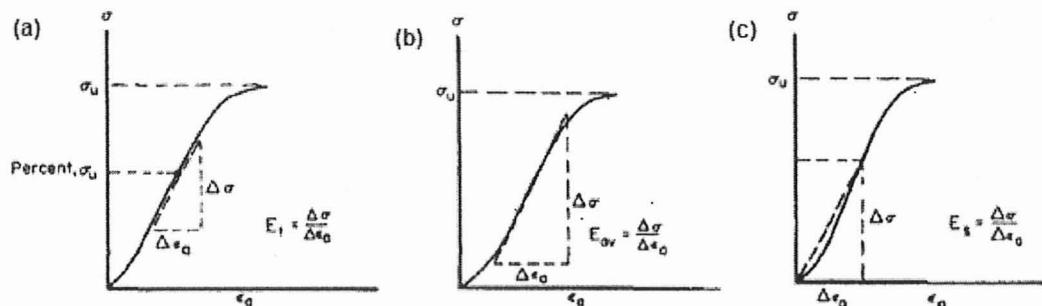


Fig. 5- (a) Módulo de elasticidade calculado graficamente pela tangente medida a uma porcentagem fixa do módulo de ruptura (normalmente utilizando-se 50% da tensão de ruptura). (b) Módulo de elasticidade calculado graficamente pela média da parte linear da curva tensão-deformação. (c) Módulo de elasticidade calculado graficamente pela secante que se estende da origem até uma porcentagem fixa do módulo de ruptura (normalmente utilizando-se 50% da tensão de ruptura) (ASTM, 2002; Bieniawski e Bernede, 1979).

Nota-se o fato de que o valor do módulo de Young no início do teste é pequeno (na parte não linear da curva), ou seja, uma carga causa uma deformação muito grande. Postula-se que a causa de tal fenômeno é a presença de fraturas e poros, o processo de fechamento dos quais durante estágios iniciais do ensaio resulta em uma maior deformação e consequentemente um menor módulo de elasticidade (Jaeger, 1979).

	Granite	Basalt	Gneiss	Schist	Quartzite	Marble	Limestone	Sandstone	Shale
Av. E	59.3	62.6	58.6	42.4	70.9	46.3	50.4	15.3	13.7
Max. E	75.5	100.6	81.0	76.9	100.0	72.4	91.6	39.2	21.9
Min. E	26.2	34.9	16.8	5.9	42.4	23.2	7.7	1.9	7.5
Range	49.3	65.7	64.2	71.0	57.6	49.2	83.9	37.3	14.4
No. of samples	24	16	17	18	10	16	29	18	9

Tabela 1- Valores típicos do módulo de Young (em GPa) para nove tipos comuns de rocha (Johnson e Degraff, 1988, apud Amadei s.d.).

O módulo de ruptura é um reflexo da resistência do corpo de prova, sendo esse basicamente a tensão registrada quando a rocha colapsa/ se rompe. Materiais rochosos fracos são aqueles com o módulo de ruptura menor que 15 MPa, intermediários de 15 a 50 MPa e resistentes aqueles acima de 50 MPa (Pells, 1993). O módulo de ruptura é usualmente medido em quilo por centímetro quadrado ou libra por polegada quadrada nos EUA ( $1 \text{ kg/cm}^2 = 14.2 \text{ lb/in}^2$ ) (Jaeger, 1979).

É importante ressaltar que não só o litotipo, mas também o grau de fraturamento, o grau de intemperismo e a porosidade influenciam o valor de ruptura (Pells, 1993; Lama e Vutukuri, 1978). A tabela 1 indica como o valor do módulo de ruptura para um determinado tipo de rocha possui grande variação, logo o conhecimento apenas do tipo de rocha não é o suficiente para fazer previsões sobre o seu valor. Apenas quando se há uma base de dados já existente para o local de origem da amostra, como grau de intemperismo e uma descrição litológica, fatores de grande influência no módulo de ruptura, esses dados podem ser compilados e considerados para se fazer uma previsão razoável (Pells, 1993).

Material	Number of different materials	Unconfined compressive strength Mean (MPa)	Range (MPa)
Andesite	10	140	77–304
Basalt	34	156	42–355
Chert	4	244	202–360
Conglomerate	12	106	18–226
Diabase	15	238	115–320
Diorite	14	192	64–333
Dolerite	3	294	211–410
Dolomite	16	123	33–420
Gabbro	6	218	126–311
Gneiss	39	154	26–340
Granite	76	183	58–300
Greywacke	12	81	30–221
Limestone	149	105	12–294
Phyllite	9	97	7–314
Quartzite	47	232	77–629
Salt	19	46	21–157
Sandstone	116	98	10–318
Schist	21	96	24–245
Shale	53	106	4–504
Tuff	19	57	4–290

Tabela 1- Módulo de ruptura para diferentes tipos de rocha (Compilado por Pells, 1993, a partir de Lama e Vutukuri, 1978).

Rock type	Uniaxial compressive strength (MPa)		
	Min.	Max.	Mean
Chalk	1.1	1.8	1.5
Rocksalt	15	29	22.0
Coal	13	41	31.6
Siltstone	25	38	32.0
Schist	31	70	43.1
Slate	33	150	70.0
Shale	36	172	95.6
Sandstone	40	179	95.9
Mudstone	52	152	99.3
Marble	60	140	112.5
Limestone	69	180	121.8
Dolomite	83	165	127.3
Andesite	127	138	128.5
Granite	153	233	188.4
Gneiss	159	256	195.0
Basalt	168	359	252.7
Quartzite	200	304	252.0
Dolerite	227	319	280.3
Gabbro	290	326	298.0
Banded ironstone	425	475	450.0
Chert	587	683	635.0

Tabela 2- Módulo de ruptura para rochas intactas (Bieniawski, 1973, apud Jaeger, 1979).

Os modos de ruptura que podem ocorrer em ensaios de compressão uniaxial são ilustrados na Fig. 6. O fraturamento pode ser de modo tensional (criação de uma fratura paralela ao eixo de aplicação de carga), ruptura ou ainda de modo cisalhante por um plano de fraqueza pré-existente na rocha (Jaeger, 1979).

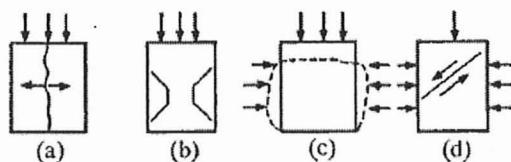


Fig. 6- Tipos de rompimento de material rochoso (a) tensional; (b) rompimento cisalhante; (c) deformação viscoplastica; (d) cisalhamento ao longo de fratura (Jaeger, 1979).

Cargas axiais podem gerar tensões em planos orientados a um ângulo em relação ao plano axial e ruptura pode ocorrer nesses planos, como ilustrado na Fig. 6(b). O colapso compressivo verdadeiro da rocha ocorre apenas através da compressão de poros, seguida pelo fraturamento de grãos e movimento ao longo do contato de grãos ou cristais. Entretanto, o módulo de ruptura de uma rocha é tipicamente uma reflexão do esforço cortante. De fato, a tensão de cisalhamento em rochas testadas em laboratório é em torno de 20% da verdadeira resistência a compressão (Rahn, 1986).

A tensão de cisalhamento ( $\tau$ ), é dada pela fórmula  $\tau = \frac{\sigma \operatorname{sen} \theta}{A_0 \operatorname{cos} \theta} = \frac{\sigma}{A_0} \operatorname{sen} \theta \operatorname{cos} \theta = \frac{\sigma}{2A_0} \operatorname{sen} 2\theta$ , onde  $A_0$  é a área da seção longitudinal do cilindro (seção basal).  $\theta$  representa o ângulo entre o plano ortogonal ao eixo axial (eixo x-x' na Fig. 7) e um plano de ruptura (eixo a-a' na Fig. 7). (Rahn, 1986).

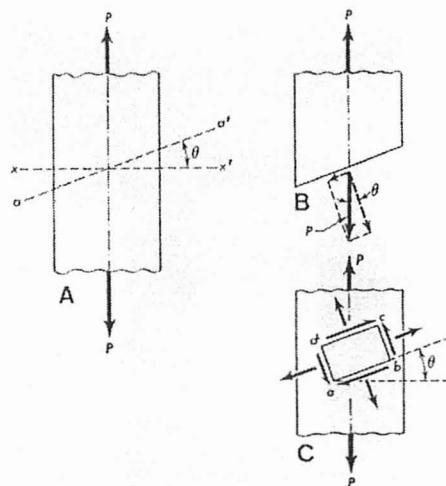


Fig. 7- Esquema de forças internas em um membro sob tensão (Marin e Sauer, 1954, apud Rahn, 1986).

Através dessa equação é possível ver que a tensão máxima de cisalhamento está no plano  $\theta = 45^\circ$ , e que apenas os planos  $\theta=0^\circ$  e  $\theta=90^\circ$  não estão sujeitos à tensão de cisalhamento. Como esperado, considerando-se os dados acima, experimentos em rochas isotrópicas e homogêneas submetidas a cargas compressivas relatam ruptura em torno de  $45^\circ$ . Já em rochas heterogêneas a tendência de ocorrer fraturamento em um plano de fraqueza depende da inclinação do mesmo com o eixo de principal stress. Por exemplo, no folhelho Martinsburg há foliações orientadas a diversos ângulos do eixo axial de carga, mas as rochas mais fracas se rompiam a  $30^\circ$  (Rahn, 1986).

Há ainda vezes em que o fraturamento ocorre paralelamente ao eixo de carga (verticalmente) em fraturas tensionais (Rahn, 1986).

Na maioria das rochas o módulo de ruptura diminui com o aumento da razão comprimento/diâmetro (L/D). Isso tende a ser insignificante em rochas de granulometria fina, mas é algo bem significante em rochas de granulometria grossa ou em materiais fissurados como lamitos e carvão (Pells, 1993).

## **IV. MATERIAIS E MÉTODOS**

### **IV.1 Obtenção das amostras**

Copos de prova retificados, de granito e gnaisse, foram cedidos pelo Laboratório de Mecânica de Rochas (LMR) do Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo (PMI) da Escola Politécnica (POLI) da USP. Foram cedidos 12 corpos de prova de granito e 8 de gnaisse. A proveniência do granito era incerta. Esse tinha grande semelhança com os granitos Cinza Mauá e Prata Interlagos, entretanto, foi necessária uma descrição microscópica petrográfica para confirmar o tipo proveniente da rocha. Quanto ao gnaisse, esse é proveniente de testemunhos de sondagem de uma pedreira de Embu das Artes, pertencente à companhia Embu S.A. Engenharia e Comércio.

Com o intuito de se obterem mais corpos de prova, foram coletados blocos de gnaisse nessa mesma pedreira. A partir desses blocos foram confeccionados corpos de prova. Esse gnaisse foi denominado de gnaisse II, enquanto o gnaisse cedido pelo (PMI) foi denominado de gnaisse I, para que houvesse um controle sobre potenciais diferenças que poderiam vir a surgir nos resultados dos testes para cada um deles.

### **IV.2 Preparação dos corpos de prova**

Os blocos de rocha foram levados ao Laboratório de Mecânica de Rochas do Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo da Escola Politécnica da USP, onde tarugos foram extraídos dos mesmos através de uma serra copo (Fig. 8(a)). A intenção inicial era de se extrair corpos de prova com foliações paralelas e perpendiculares ao eixo axial. A primeira complexidade de se fazer isso foi devido a dificuldades de manuseio dos blocos, que muitas vezes já possuíam uma base com a foliação mergulhando de certa forma, que não era paralela nem perpendicular ao eixo. De fato, devido ao difícil manuseio dos blocos, em consequência do peso e irregularidades das laterais dos mesmos, não foi possível apoia-los corretamente no suporte da serra copo (observa-se na Fig. 8(a) que duas tabuas de madeira foram utilizadas como suporte), e por isso poucos blocos foram extraídos com uma das foliações sendo sub-paralela ou sub-vertical. Esse problema foi ainda maior em razão da presença de múltiplas foliações (ver seção V.6.2), que acabaram por tornar inútil a tentativa de extraer blocos que estavam orientados paralelamente ou perpendicularmente ao eixo axial, uma vez que não era simples de se identificar qual das foliações era a mais proeminente no bloco de rocha, com o fato de a rocha ter uma granulação fina tornando a visualização muito difícil.

Após a extração, os tarugos foram serrados até ficarem com um tamanho não menos do que o mínimo estipulado (12,5cm). Em seguida, os corpos foram colocados na retífica (Fig. 8(b)), que funciona como uma espécie de lixa, que deixa as bases planas e paralelas.

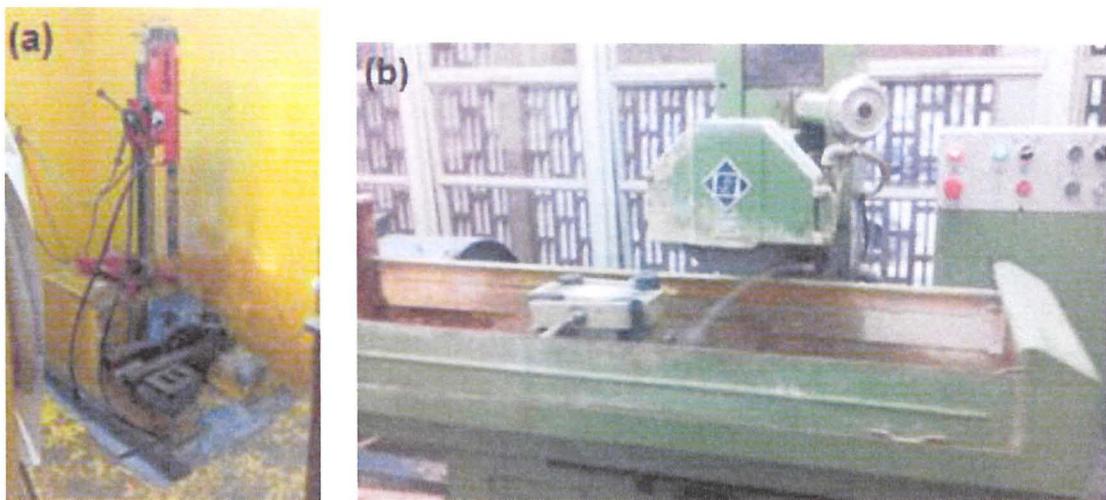


Fig. 8– (a) Serra copo e bloco de rocha de onde um tarugo foi extraído. (b) Retífica no ato de polimento de corpos de prova.

### IV.3 Medição de dimensões

#### IV.3.1 Comprimento

Para cada corpo de prova tomaram-se três medidas de comprimento, de  $120^\circ$  em  $120^\circ$  com a rotação do corpo de prova ao longo do eixo axial (Anexo I - medidas de comprimento 1, 2 e 3). Calculou-se a média dessas para determinar o comprimento médio do corpo de prova (Anexo I - com. médio). As medidas foram efetuadas com um paquímetro analógico com precisão de 0,05 mm (Fig. 9).

#### IV.3.2 Diâmetro

Foram efetuadas medidas em três circunferências do corpo de prova, uma na metade do corpo e as outras duas a um quarto do comprimento a partir de cada uma das bases. Em cada circunferência tomaram-se três medidas, de  $120^\circ$  em  $120^\circ$  com a rotação do corpo de prova ao longo do eixo axial. Portanto, houve um total de nove medidas tomadas para cada corpo de prova (Anexo III). As medidas foram efetuadas com dois paquímetros, um analógico com precisão de 0,05 mm (Fig. 9), com o qual se mediu os diâmetros dos corpos de prova do granito e dos corpos 1 a 3 do gnaisse II, e um de leitura digital com precisão de 0,01 mm (Fig. 9), com qual se mediu o diâmetro dos corpos do gnaisse I e dos corpos 4 a 13 do gnaisse II.



Fig. 9- Paquímetro analógico (parte superior da figura) e paquímetro digital (parte inferior).

#### IV.4 Determinação da densidade e da porosidade

##### IV.4.1 Determinação da massa seca

Após uma lavagem superficial com esponja, os corpos de prova foram colocados dentro de uma estufa (Fig. 10(a)), a uma temperatura de 70°C. Após 48 horas eles foram retirados e colocados em um dessecador, onde eles permaneceram por 24 horas para se resfriarem. Eles foram então pesados em uma balança digital (Fig. 10(b)), onde se determinou a  $M_{sec}$ .



Fig. 10- (a) Estufa. (b) Balança digital.

##### IV.4.2 Determinação das massas submersa e saturada

Os corpos de prova foram colocados em uma bacia. Inicialmente, encheu-se parte desta com água destilada, de modo que apenas 1/3 de cada corpo de prova ficasse submerso. Após 4 horas, adicionou-se mais água destilada de modo que apenas 2/3 de cada corpo ficasse submerso (Fig. 11(a)). Depois de mais 4 horas, adicionou-se mais água destilada de modo que os corpos ficassem totalmente submersos. Esses foram deixados nesse estado por 40 horas. Passado esse tempo os corpos foram pesados, imediatamente ao serem retirados da água, para a determinação da  $M_{sat}$  (Anexo II), com a pesagem dos mesmos na balança digital (Fig. 10(b)).

Para a determinação da  $M_{sub}$  (Anexo II), os corpos foram colocados em um cesto dentro de um balde cheio de água (Fig. 11(b)). Esse cesto estava ligado à balança por um fio estendido.



Fig. 11- (a) Corpos de prova submersos, até 2/3 do comprimento, em água destilada. (b) Balde cheio de água com cesto ligado à balança por um fio.

Após a anotação destas medidas, as mesmas foram utilizadas para o cálculo da densidade e da porosidade aparentes (Anexo II), respectivamente através das fórmulas  $\rho_a = \frac{M_{sec}}{M_{sat}-M_{sub}} \times 1000$  e  $n_a = \frac{M_{sat}-M_{sec}}{M_{sat}-M_{sub}} \times 100$ .

#### IV.5 Ensaio de ultrassom

Foram utilizados dois pares de transdutores planos para este ensaio, um par de 54kHz (Fig. 12(a)) e um par de 150kHz (Fig.12(b)). Foram tomadas quatro medidas para cada corpo de prova, uma medida com a amostra seca e outra com a amostra saturada para cada transdutor.

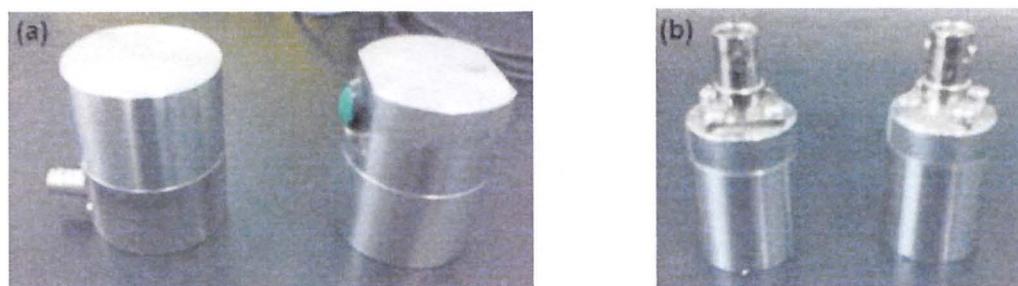


Fig. 12- (a) Transdutor de 54 kHz, com 5cm de diâmetro. (b) Transdutor de 150 kHz, com 2,2cm de diâmetro.

Para preparar a realização do ensaio, acoplava-se cada transdutor a um fio. Ligava-se estes fios a terminais no equipamento de ultrassom, de forma que um dos conjuntos fio-transdutor fosse ligado a um terminal transmissor (Fig. 13(I)), e o outro a um terminal receptor (Fig. 13(II)).

O teste era iniciado com o acoplamento de cada transdutor a uma base do corpo de prova, com o uso de um gel de ultrassom (Fig. 13(III)) para melhor propiciar o contato entre o transdutor e o corpo de prova. Pressionava-se então um botão no aparelho de ultrassom (Fig. 13(IV)) que fazia com que pulsos fossem emitidos pelo terminal transmissor. O tempo que a onda levava para percorrer a amostra e atingir o terminal receptor (Anexo I) era então exibido na tela do aparelho.



Fig. 13- (I) Fio ligado no terminal transmissor. (II) Fio ligado no terminal receptor. (III) Gel de ultrassom. (IV) Aparelho de ultrassom V - Meter III da James Instruments Inc.

#### IV.6 Descrição macroscópica e microscópica das rochas

##### IV.6.1 Granito

De coloração cinza clara, tinha o índice de máficos em torno de 6 a 7%. A rocha tinha textura porfirítica. Fenocristais eram escassos, constituindo cerca de 1 a 2% do volume dos corpos de prova, sendo estes de tamanho de 20 a 40 mm e tendo coloração rósea (fenocristais de feldspato), apesar de haver alguns cristais, pouco abundantes (menos de 1% do volume da rocha), que possuíam entre 10 a 20 mm (esses não possuíam um habito tão definido como o tabular observado nos fenocristais). A matriz tinha granulação média-grossa, com grãos variando de 1 a 10 mm, mas com predominância no intervalo de 2 a 4 mm e textura inequigranular seriada. As amostras estavam bem preservadas no geral, com uma fraca alteração verde-alaranjada, sericítica em seu aspecto, ocorrendo, mas apenas localmente, ou seja, com baixa frequência.

A descrição macroscópica detalhada de cada amostra se encontra no anexo IV (a). Como minerais presentes identificou-se quartzo, feldspato potássico, plagioclásio e biotita, com as proporções de quartzo e biotita no anexo, sendo que resto da rocha seria principalmente feldspato (não se estimou a proporção entre feldspato potássico e plagioclásio macroscopicamente).

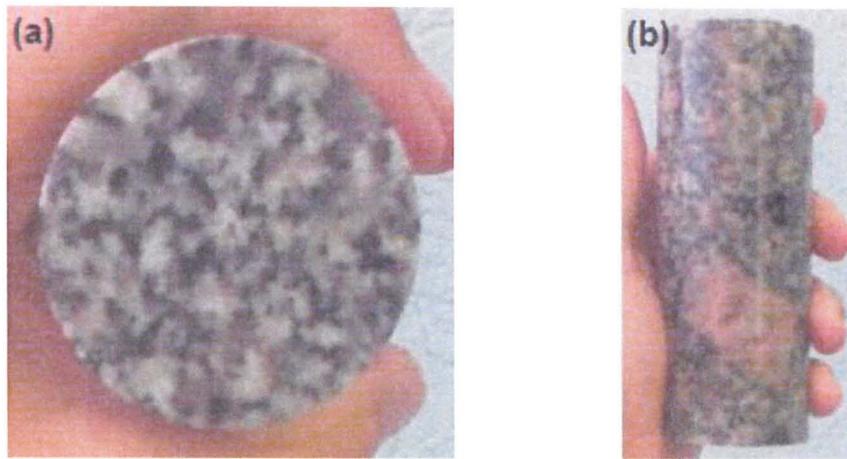


Fig. 14- (a) Base de corpo de prova de granito. (b) Perfil corpo de prova de granito, com fenocristal (de 40mm) bem visível.

Com a descrição microscópica observou-se que a matriz da rocha tinha uma textura inequigranular seriada holocrystalina. A granulação desta matriz era média-fina, com grãos variando de 0,1 a 5 mm. A tabela a seguir lista os minerais identificados em cada lâmina, bem como a proporção, em porcentagem, em que esses minerais estavam presentes na rocha. Além disso, foi feita a média das proporções encontradas em todas as lâminas:

Lâmina	Minerais presentes e porcentagem
1	Plagioclásio (oligoclásio) (35%); quartzo (30%); microclínio pertítico (25%); biotita (8%); minerais opacos (2%)
2	Plagioclásio (oligoclásio) (35%); quartzo (30%); microclínio pertítico (25%); biotita (8%); minerais opacos (2%)
3	Plagioclásio (oligoclásio) (37%); quartzo (33%); microclínio pertítico (22%); biotita (7%); minerais opacos (1%)
Média	Plagioclásio (oligoclásio) (35-36%); quartzo (31%); microclínio pertítico (24%); biotita (7-8%); minerais opacos (1-2%)

Tabela 3- Principais minerais presentes nas lâminas e as respectivas proporções em que eles ocorrem.

Nota-se que além dos minerais citados na tabela, foram identificados apatita, titanita e muscovita como minerais acessórios.

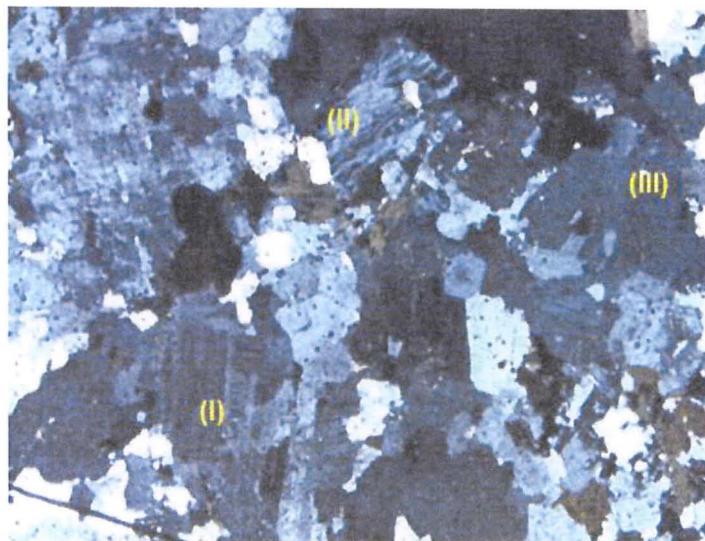
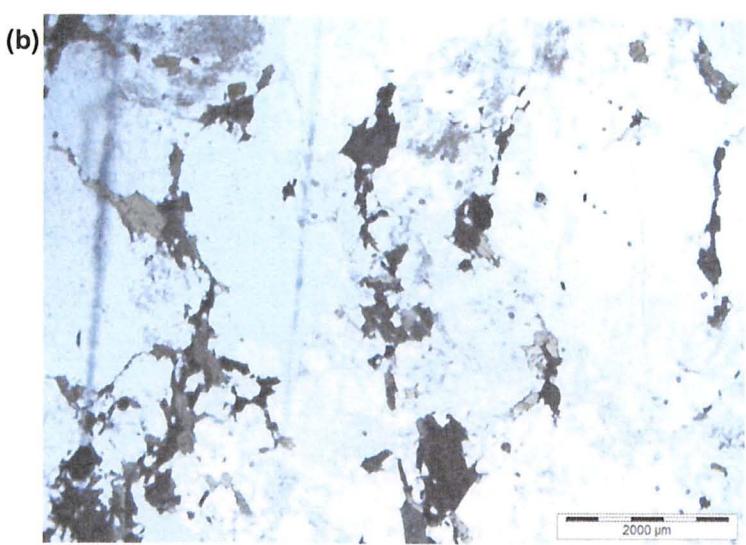
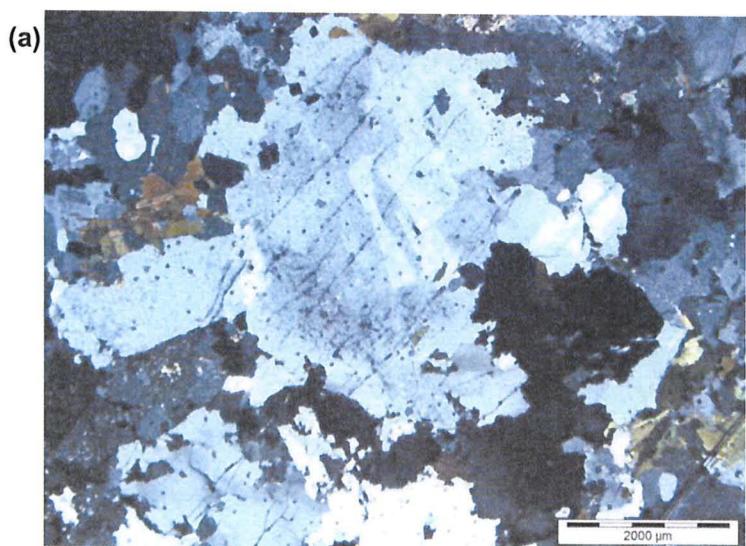


Fig. 15- Foto da lâmina 3, com o analisador. (I) Cristal de plagioclásio. (II) Cristal de microclínio. (III) Cristal de quartzo.

Em termos de alteração, oberservou-se que argilominerais e sericita estavam presentes como alteração do microclínio e do plagioclásio, sendo que esse estava mais alterado do que aquele. A alteração não era uniforme por todos os grãos, ou seja, alguns grãos de plagioclásio, por exemplo, tinham um grau bem baixo de alteração, enquanto outros tinham um moderado a alto grau de alteração. No geral os grãos de microclínio possuíam baixo grau de alteração e os de plagioclásio de moderado a baixo grau de alteração.

Feições observadas que são de grande interesse para o trabalho, uma vez que elas podem afetar o valor dos módulos obtidos no ensaio estático, são microfraturas. Essas, apesar de serem mais visíveis em cristais de quartzo (Fig. 16 (a)), também cortavam outros minerais, como o microclínio, sendo que por vezes uma mesma microfratura cortava diferentes grãos de diferentes minerais. Essas microfraturas possuíam uma direção preferencial de orientação, sendo que em uma das lâminas (lâmina 1) foram observadas duas direções de orientação nas quais as microfraturas estavam alinhadas, embora, uma dessas direções era pouco proeminente, com muitas poucas fraturas alinhadas com tal tendência. Ressalta-se que na maioria das vezes essas microfraturas estavam preenchidas por minerais opacos ou muscovita.



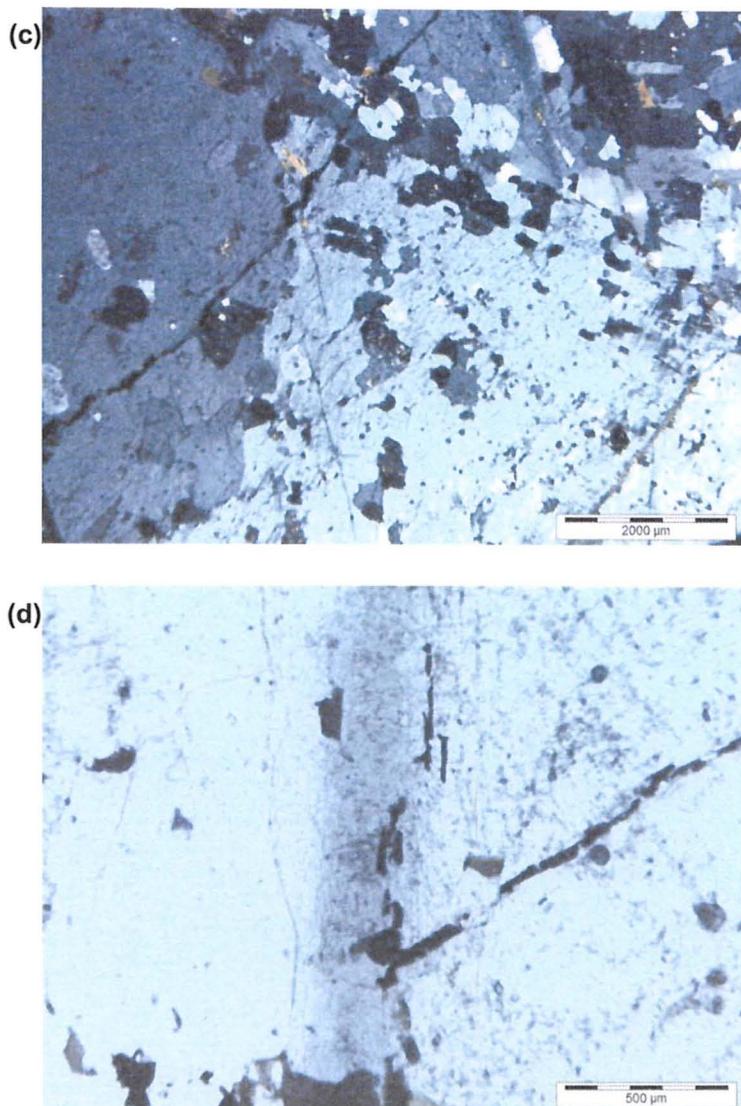


Fig. 16- (a) Microfraturas orientadas (na direção nordeste-sudoeste da foto) e preenchidas por muscovita. Foto com analisador da lâmina 1. (b) Biotita, minerais opacos e microfraturas orientados (na direção norte-sul da foto). Foto sem o analisador da lâmina 1. (c) Microfraturas orientadas (na direção nordeste-sudoeste da foto) que cortam fenocristais e que são preenchidas por opacos e muscovita orientados. Foto com o analisador da lâmina 1. (d) Detalhe da parte de cima da foto anterior, com a microfratura preenchida por opacos orientada na direção sudoeste-nordeste da lâmina e opacos, biotita e microfraturas orientados na direção norte-sul (esses sendo aqueles que estavam orientados a sudoeste-nordeste na lâmina anterior. Foto sem analisador da lâmina 1.

Com base nas proporções indicadas na Tabela 3, confere-se a rocha a denominação biotita monzo-granito.

Havia dúvidas quanto o local de origem do granito, nominalmente, se este era um granito Cinza Mauá ou Prata Interlagos. Uma comparação macroscópica com uma amostra de granito Mauá, indica que há uma pronunciada diferença, em termos de abundância de fenocristais, uma vez que o granito Mauá possui uma grande densidade de fenocristais enquanto o granito estudado possuía uma baixa densidade de fenocristais. Além disso, foram observadas através do microscópio duas lâminas de granito Mauá. O granito Mauá observado possuía microclínio

como o mineral mais abundante (cerca de 36% da rocha), seguido por quartzo (cerca de 29% da rocha) e plagioclásio (oligoclásio) (cerca de 27% da rocha). O Catálogo das Rochas Ornamentais do Estado de São Paulo (1990), cita a composição do Granito Cinza Mauá como, microclínio pertítico (35%), plagioclásio (oligoclásio-albita) (30%), quartzo (25%) e biotita (5-10%). O Rochas Ornamentais e de Revestimento do Estado de São Paulo (IPT, 2000), cita a composição do Granito Prata Interlagos como, plagioclásio (oligoclásio) (30%), quartzo (30%), microclínio (20-25%), biotita (15%) e muscovita (<5%). Esses dados mostram que o granito estudado se assemelha mais em sua composição ao Prata Interlagos, uma vez que ele possui mais plagioclásio do que microclínio, e não o contrário, o que ocorre no Cinza Mauá. Conclui-se, então, que o granito estudado era provavelmente o Prata Interlagos.

#### IV.6.2 Gnaissse

Ambos os gnaisses I e II tinham características semelhantes, por eles serem do mesmo local (Embu das Artes), ou seja, é a mesma rocha, como ressaltou-se na seção V.1. A divisão foi feita apenas para manter um controle dos gnaisses que foram coletados em dois momentos diferentes.

De cor cinza médio-escuro, tinha índice de máficos em torno de 12%. Nota-se a exceção dos corpos 6 e 7 do gnaisse I, que tinham valores discrepantes, sendo o índice de máficos de 30% para estes corpos de prova.

Essa rocha tinha foliação fina, que ia de milimétrica a submilimétrica. A granulação também era fina. O fato de a foliação e a granulação serem finas, fez com que houvesse uma dificuldade para que se observasse o mergulho da foliação, especialmente nos corpos que tinham um maior índice de máficos. Apesar disso, foi possível observar a presença de até 3 foliações com mergulhos distintos em algumas amostras.

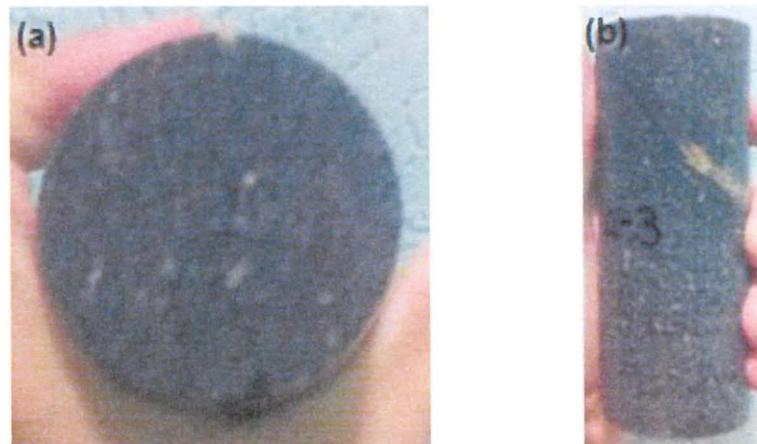


Fig. 17- (a) Base do corpo de prova do gnaisse. (b) Perfil do corpo de prova do gnaisse. O corpo de prova corresponde ao gnaisse I.

Com a descrição microscópica observou-se que a rocha tinha uma textura lepidogranoblástica, com a parte lepidoblástica definida por biotita e muscovita e a parte granoblástica definida por microclínio e quartzo, e inequigranular seriada quanto a variação do tamanho dos grãos. A granulação variava de muito fina a média, <0,1 a 3 mm, entretanto a maioria dos grãos eram finos, com tamanho entre 0,1-1 mm. A tabela a seguir lista os minerais identificados em cada lâmina, bem como a proporção, em porcentagem, em que esses minerais estavam presentes na rocha. Além disso, foi feita a média das proporções encontradas em todas as lâminas:

Lâmina	Minerais presentes e porcentagem
1	Quartzo (42%); microclínio pertítico (41%); plagioclásio (2%); biotita (6%); muscovita (3%); opacos (2%); apatita (2%); titanita (2%)
2	Quartzo (40%); microclínio pertítico (41%); plagioclásio (2%); biotita (8%); muscovita (3%); opacos (2%); apatita (3%); titanita (1%)
3	Quartzo (44%); microclínio pertítico (37%); plagioclásio (2%); biotita (7%); muscovita (4%); opacos (3%); apatita (1%); titanita (2%)
4	Quartzo (42%); microclínio pertítico (39%); plagioclásio (2%); biotita (7%); muscovita (3%); opacos (4%); apatita (1%); titanita (2%)
5	Quartzo (44%); microclínio pertítico (39%); plagioclásio (2%); biotita (6%); muscovita (4%); opacos (3%); apatita (1%); titanita (1%)
6	Quartzo (40%); microclínio pertítico (46%); plagioclásio (3%); biotita (4%); muscovita (3%); opacos (3%); apatita (1%); titanita (0%)
Média	Quartzo (42%); microclínio pertítico (41%); plagioclásio (2%); biotita (6%); muscovita (3%); opacos (3%); apatita (2%); titanita (1%)

Tabela 4- Principais minerais presentes nas lâminas e as respectivas proporções em que eles ocorrem. As lâminas 1 e 2 correspondem ao gnaisse II e de 3 a 6 ao gnaisse I.

Além dos minerais citados na tabela, também havia sericita e argilominerais, produto de alteração de microclínio. O grau de alteração dos grãos de microclínio varia desde não perceptível até moderado. Ressalta-se ainda que zircão foi identificado como mineral acessório.

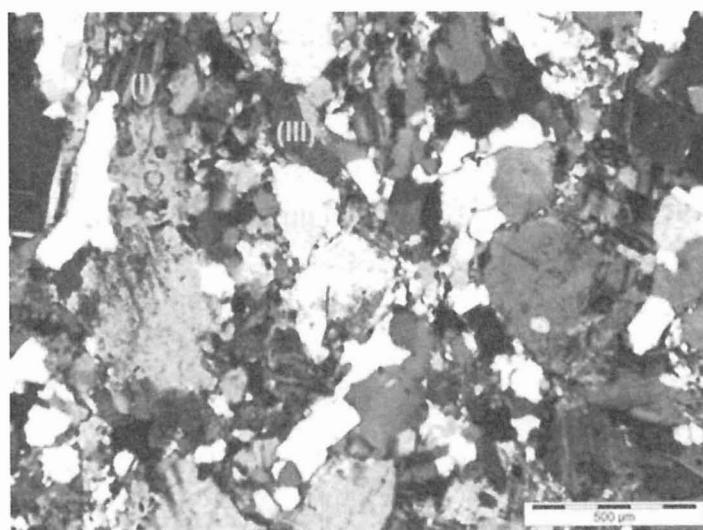
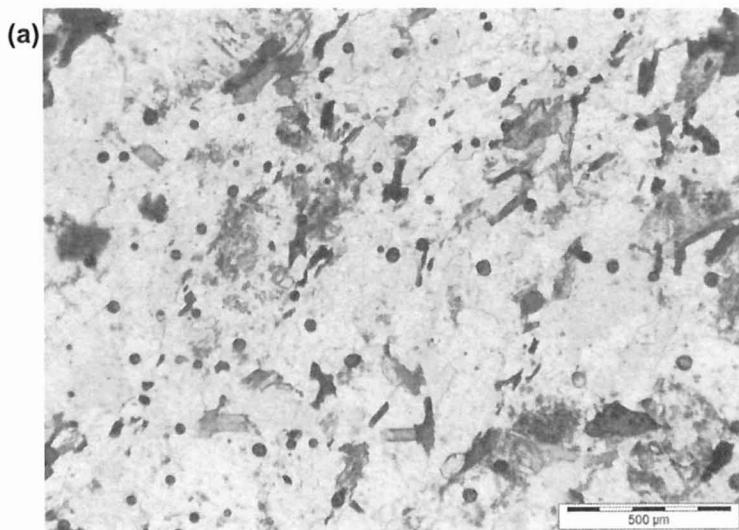


Fig. 18 — Foto da lâmina 5, com o analisador. (I) Cristal de microclínio. (II) Cristal de quartzo. (III) Cristal de biotita.

Nas lâminas 3 e 5, observou-se que os minerais estavam orientados em uma direção preferencial. Na lâmina 2, havia uma forte direção em que a grande maioria dos minerais se orientava, com uma outra direção de orientação sendo apenas observada em alguns grãos de biotita (<5% dos grãos de biotita estavam orientados nessa segunda). A diferença entre essas duas direções era de 30°. Já a lâmina 4 possuía duas direções de orientação, espaçadas a 65° uma da outra. Nota-se o fato que muitos minerais possuíam uma orientação que estava dentro do intervalo de 65° entre essas duas direções, mas sem que esses estivessem alinhados entre si. Na lâmina 6, observou-se uma fraca direção preferencial de orientação, entretanto, a maioria dos minerais se encontravam orientados a um baixo ângulo, entre aproximadamente 0 e 40° para ambos os lados, dessa direção, ou seja, há uma zona de aproximadamente 80° em que os minerais tendiam a estar orientados. Na lâmina 1, observou-se pelo menos 3 direções em que haviam minerais orientados (Fig. 19 (c)).



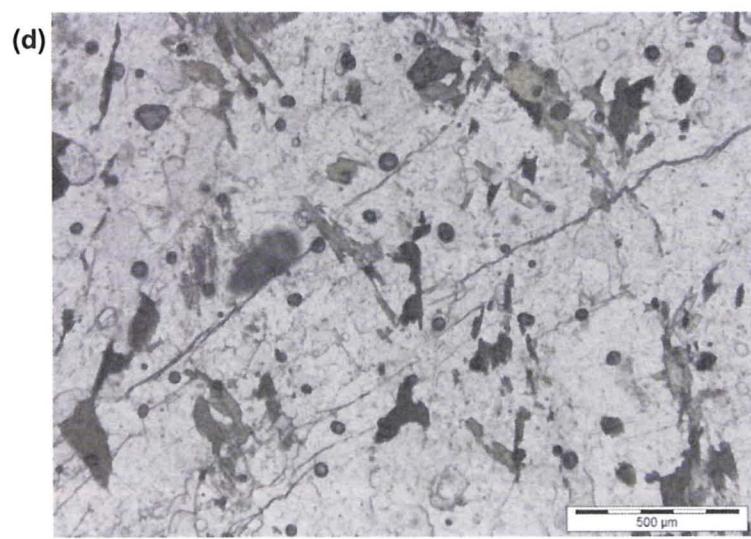
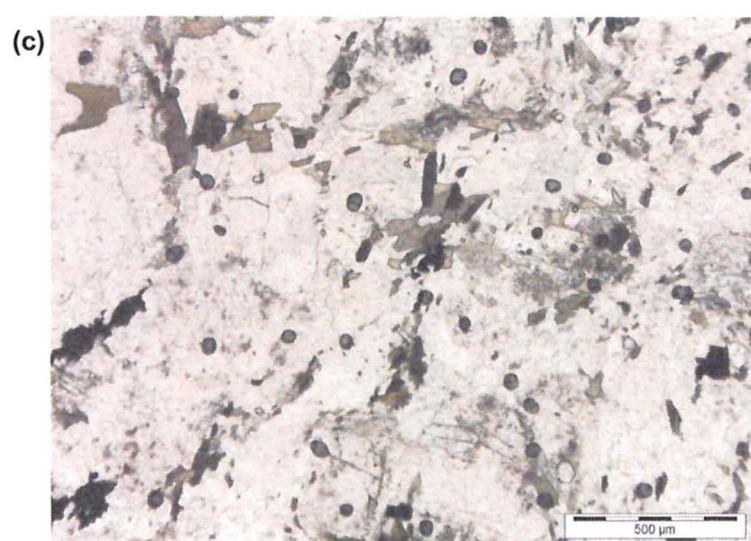
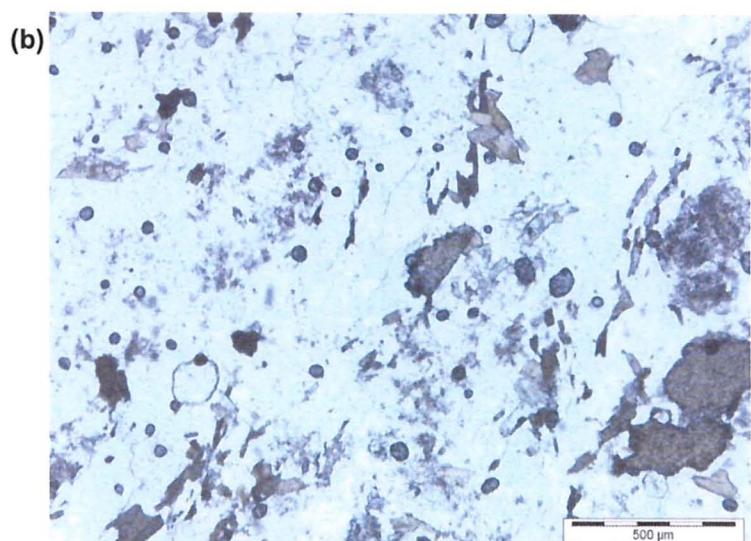


Fig. 19- (a) Minerais opacos e grãos de biotita com duas direções de orientação, uma norte-sul (vertical na foto) e outra nordeste-sudoeste em relação à foto. Alguns cristais também estão alinhados, mas na direção leste-oeste. Foto sem o analisador da lâmina 1. (b) Minerais opacos e grãos de biotita com duas direções de orientação, uma norte-sul (vertical na foto) e outra nordeste-sudoeste da foto. Foto sem o analisador da lâmina 1. (c) Minerais opacos e grãos de biotita com três direções de orientação, uma norte-sul (vertical na foto), outra leste-oeste (horizontal na foto) e ainda outra nordeste-sudoeste. Foto sem o analisador da lâmina 1. (d) Minerais opacos e grãos de biotita com duas direções de orientação, uma a norte-sul (vertical na foto) e outra a noroeste-sudeste. Observa-se também microfraturas orientadas na direção nordeste-sudoeste Foto sem o analisador da lâmina 2.

Essas observações microscópicas quanto a orientação dos minerais, confirmam a presença de múltiplas direções de orientação, assim como havia sido visto macroscopicamente. Elas também mostram como o grau e o modo de orientação dos minerais variam de lâmina para lâmina, sendo que por vezes a foliação aparece bem clara, com todos ou uma grande maioria dos grãos alinhados em uma direção, como nas lâminas 2 e 5, mas outras vezes é de difícil visualização e não está muito bem definida, com apenas uma minoria dos minerais alinhados em uma direção, com os outros orientados a baixos ângulos, de forma caótica, em torno dessa orientação, como na lâmina 6.

Nota-se que na lâmina 2, observou-se a presença de microfraturas orientadas em uma direção (Fig. 19 (d)).

Com base nas proporções indicadas na Tabela 4, confere-se a rocha a denominação biotita gnaisse.

#### IV.7 Ensaio de compressão uniaxial

Os ensaios foram realizados em uma prensa modelo MTS 815, com 2700kN de capacidade, que se encontra no Laboratório de Mecânica das Rochas do Departamento de Geotecnia da Escola de Engenharia da USP, localizado no campus da USP de São Carlos. É um sistema rígido servo-controlado, ou seja, que permite o controle do incremento de carga. Uma esfera móvel é ligada ao prato superior, assim como recomendado pela literatura. Apesar dos pratos da prensa terem um diâmetro bem maior que os corpos de prova, discos menores de 54 mm de diâmetro foram colocados nas bases dos corpos de prova (Fig. 20) de modo a propiciar um melhor contato com os mesmos e ajustar o comprimento da amostra ao espaço entre os pratos da prensa (o espaço mínimo do vão entre os pratos era maior que o comprimento dos corpos de prova). A operação do equipamento foi realizada pelo técnico do laboratório, Benedito Osvaldo Souza.

Para medir a deformação axial foram colocados dois extensômetros em lados opostos a meia altura da amostra. Esses eram ligados a um computador que automaticamente calculava a média da deformação medida por cada extensômetro e registrava o resultado encontrado (que está no anexo em CD).

Cada extensômetro tinha 6 cm de comprimento, logo, a deformação medida não era a de toda a amostra, mas apenas a dos 6 cm centrais da amostra (a seção da amostra a qual os medidores estavam conectados). Acoplou-se os extensômetros à amostra com elásticos de látex.

Com o intuito de se preservar os extensômetros, uma vez que esses poderiam quebrar caso eles estivessem acoplados às amostras no momento de ruptura, o ensaio para medir a deformação axial foi feito separadamente e anteriormente ao ensaio destrutivo para medir o módulo de ruptura, ou seja, primeiramente o extensômetro era acoplado ao corpo de prova, e submetia-se esse até uma carga por volta de 70% do valor estimado para o módulo de ruptura (valor referência). Em seguida, retirava-se os da amostra e então efetuava-se o ensaio onde carga era incrementada até o momento de ruptura.

Para estimar o valor de carga do módulo de ruptura das amostras, o qual 70% era utilizado como o valor referência, inicialmente foram feitos diretamente ensaios de ruptura em algumas amostras (amostras 2 e 7 do granito e 7 e 11 do gnaisse II). Foi então calculada uma média dos módulos de ruptura para cada litotipo, 70% do valor da qual foi tomado como o valor base ao qual as amostras seriam submetidas no ensaio de medição da deformação, considerando-se que 70% foi considerado o valor mais sensato para diminuir a chance de que a amostra se rompesse com o extensômetro ainda preso a ela, mas ao mesmo tempo alcançando 50% do valor do módulo de ruptura da amostra, uma vez que 50% do módulo de ruptura é o valor com o qual se calcula o módulo de elasticidade (através do método da tangente).

Quanto a taxa de carregamento, procurou-se deixar a mesma em torno de 0,4 MPa/s, sendo esse valor um pouco abaixo do mínimo de 0,5 MPa recomendado pela literatura, mas considerado por garantir que os corpos não se romperiam muito rapidamente, abaixo do tempo mínimo de 5 minutos recomendado para a duração de cada teste. A variação de diâmetro de um corpo de prova para outro, bem como a dificuldade de calibração da máquina, fez com que houvesse uma certa variação dos valores em torno de 0,4 MPa/s, com valores de taxa de carregamento variando de 0,418 (corpo 3 do granito) a 0,351 MPa/s (corpo 6 do gnaisse I) (anexo V (a)). Já o tempo de execução do ensaio variou entre 416 s (6 minutos e 56 segundos) e 853 s ( 14 minutos e 13 segundos) (ANEXO V (a)).

A prensa registrava a força/carga aplicada em kN e a deformação sofrida pela amostra (essa última apenas nos ensaios com o micrômetro acoplado às amostras, apesar do fato de que a deformação do prato também foi medida, mas não foi utilizada no presente trabalho) de segundo a segundo. Esses dados foram utilizados posteriormente para calcular os módulos de elasticidade e ruptura dos corpos de prova.



Fig. 20- (a) Prensa e painel de controle da prensa (b) Corpo de prova com extensômetro.

## V. RESULTADOS OBTIDOS

Os cálculos feitos com os dados obtidos em todos os ensaios para se chegar nos resultados que serão mostrados a seguir foram todos feitos no programa Microsoft Office Excel Professional Plus 2013. As tabelas completas com os dados e os resultados encontrados estão em anexo ao trabalho. A seguir, seguem-se as explicações de como os cálculos foram realizados e a apresentação dos resultados obtidos, para os resultados do ensaio de compressão uniaxial, que são o foco principal do trabalho. Os resultados das medidas de porosidade, densidade e velocidade não serão expostos a seguir, estando nos anexos 1 e 2 para consulta.

### V.1 Módulo de ruptura

Para o cálculo do módulo (anexo V (a)), utilizou-se a fórmula  $\sigma = \frac{F}{A}$  (onde a carga/força é aquela registrada no segundo durante o qual o corpo de prova havia se rompido), onde  $A$  foi calculada através da fórmula  $A = \pi r^2$ , onde  $r$  é o raio (em metros). Dividiu-se o resultado por 1000, transformando-se a notação de  $\text{kN/m}^2$  para  $\text{MN/m}^2$ , ou  $\text{MPa}$ , para melhor apresentar os resultados e também adequá-los a literatura (que geralmente apresenta os resultados em  $\text{MPa}$ ). Seguem-se os resultados obtidos:

	<b>Módulo de ruptura (MPa)</b>
--	--------------------------------

<b>Corpo de Prova</b>	<b>Granito</b>	<b>Gnaisse I</b>	<b>Gnaisse II</b>
1	340,37	210,99	171,69
2	273,30	316,14	203,50
3	331,63	192,06	192,88
4	249,22	239,03	196,37
5	277,37	237,30	161,73
6	269,61	173,87	205,34
7	202,56	176,09	191,13
8	227,18	-	159,27
9	260,81	-	177,88
10	226,71	-	206,90
11	208,33	-	194,96
12	199,88	-	153,26
13	-	-	239,34
<b>Média</b>	<b>255,58</b>	<b>220,78</b>	<b>188,79</b>

Tabela 5- Módulo de ruptura de cada corpo de prova de cada tipo de rocha e média dos valores dos corpos de prova de um mesmo tipo de rocha.

Ressalta-se que o corpo de prova número 8 do gnaisse I foi perdido durante uma tentativa falha de calibração da prensa, onde uma carga repentina foi aplicada ao corpo e ele se rompeu.

Quanto a diferença nos valores entre os gnaisses I e o II, ressalta-se que enquanto o I foi extraído de testemunhos de sondagem, o II foi extraído de blocos, e alguns dos blocos que foram coletados para a extração do gnaisse II haviam passado por uma máquina que quebrava blocos grandes em menores, através do choque entre diferentes blocos, que eram depois jogados em uma pilha ao saírem da máquina em uma esteira. Esse processo pode ter afetado um pouco a integridade do gnaisse II, o que explicaria a diferença de valores nos módulos.

## V.2 Módulo de elasticidade (Young)

Para o cálculo do módulo (anexo em CD), utilizou-se a fórmula  $\sigma = \frac{F}{A}$ , calculando-se a tensão medida a cada segundo. Para medir a deformação, utilizou-se a fórmula  $\epsilon = \frac{L - L_0}{L_0}$ , onde  $L_0$  é 0,06 m (o comprimento do extensômetro) e  $L$  a deformação medida pelo extensômetro (que foi medida pelo computador em milímetros, mas transformada posteriormente para metros para efetuar os cálculos seguindo-se o padrão de unidades das normas). Subtraiu-se o número um pelo resultado, apenas para apresentar os valores de forma crescente a partir de zero e não decrescente a partir de um, o que é melhor para uma representação gráfica. Finalmente criou-se um gráfico de dispersão, onde a abscissa contém a deformação, em metros, e a ordenada corresponde à tensão, em MPa, sendo que os dados correspondentes são aqueles que foram tomados em um mesmo instante de tempo (no mesmo segundo).

Para o cálculo do módulo a partir do gráfico, inicialmente, buscou-se calcular o módulo pelo método da tangente. Para isso, determinou-se a curva que poderia ser representada por uma equação polinomial que mais se assemelha à curva tensão-deformação gerada no gráfico de disperção, através da criação de uma linha de tendência polinomial e selecionando-se a exibição da equação desta linha, bem como o grau de correlação entre esta linha gerada e a curva (representado por  $R^2$ ). Em seguida, calculou-se o valor correspondente a 50% do módulo de ruptura. Utilizou-se a ferramenta *solver*, para descobrir a deformação correspondente a esse valor de carga, ou seja, para descobrir o valor da deformação na abscissa (valor de  $y$  na equação) correspondente ao valor de 50% do módulo de ruptura na ordenada (valor de  $x$  na equação). Com o resultado encontrado, calculou-se então a tangente, ou seja, o módulo de Young ( $\epsilon$ ), substituindo-se esse valor (o valor de  $x$ ) na derivada da equação.

Entretanto, observou-se que o valor da deformação (de  $x$ ) calculado não correspondia a um valor coerente com base nos dados medidos de segundo em segundo. Por exemplo, no corpo 2 do granito, o valor correspondente a 50% do módulo de ruptura é de 136,6508 MPa. Observando-se os dados tomados de segundo a segundo, este valor se encontra no intervalo de 136,4958 a 136,8863 MPa, correspondentes, respectivamente, aos momentos de 337 e 338 segundos. Ambos segundos registraram uma deformação de 0,002683 metros. De fato, o valor de 0,002654 metros da deformação, que foi o valor encontrado através do uso da ferramenta *solver*, está entre os intervalos de 0,00266667 a 0,00265 metros, correspondentes aos momentos de 332 e 333 segundos. Porém, as cargas nesses instantes são de 134,0654 e 134,4733 MPa, respectivamente. O fato do valor da deformação, de valor igual a 0,002654 m, não estar no intervalo esperado, de 136,4958 a 136,8863 MPa, ocorre pela circunstância de que a equação polinomial não é exatamente igual a curva tensão-deformação, mas apenas a conversão mais fidedigna possível da mesma em uma equação polinomial, no caso de segundo grau. Isso gera uma imprecisão, que é de grande relevância quando um dado pontual, no caso o ponto correspondente ao valor de 50% do módulo de ruptura, é analisado, uma vez que esse ponto pode estar distante da reta de tendência. Apesar do exemplo acima ser de uma linha de tendência polinomial de segundo grau, os cálculos com equações de maiores graus não melhoraram os resultados, como é possível se constatar nos cálculos pertinentes ao mesmo corpo de prova (o granito 2), onde o cálculo através de uma linha de tendência polinomial do terceiro grau com uma correspondente equação do terceiro grau resultou em um valor para a deformação de 0,002765 m, um valor ainda mais distante do valor de 0,002683 metros correspondente ao intervalo de 136,4958 a 136,8863 MPa.

Devido a este problema, decidiu-se calcular o módulo pelo método da parte linear da curva, estipulando-se que esta análise estaria menos sujeita a ser imprecisa. Para isso, criou-se um

gráfico de dispersão apenas com os dados da parte linear da curva, gerou-se uma linha de tendência linear, ou seja, a linha de tendência que melhor representa a parte que tende a ser linear da curva tensão-deformação como uma reta perfeita. Selecionou-se então a opção para a exibição da equação da reta, o coeficiente angular da qual representa o módulo de elasticidade (considerando-se que em uma reta genérica representada pela equação  $y = ax + b$ , o  $a$  é o coeficiente angular e  $a = \frac{\Delta y}{\Delta x}$ , sendo que na reta calculada  $\Delta y$  equivale a  $\Delta\sigma$  e  $\Delta x$  equivale a  $\Delta\epsilon$ , logo  $E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon}$ ).

Geralmente, a parte reta da curva era aquela considerada a partir do valor 0,0015m de deformação, uma vez que todas as curvas pareciam já serem lineares nesse ponto. Para testar se havia uma grande variabilidade no valor do resultado e se o critério de escolha da parte linear da curva gerava um resultado sensato, em algumas amostras além de se calcular um módulo com a parte linear a partir de 0,0015 m, também calculou-se o módulo com a parte de 0,0015 até 0,00225 m excluída, ou seja, uma seção mais restrita da parte linear da curva. Os resultados mostraram que não havia grande variação ou que o módulo era constantemente maior em uma das seções para diferentes amostras, ou seja, resultados calculados a partir de 0,0015 oferecem um resultado que é coerente e por isso esse ponto foi escolhido como referência para selecionar a parte linear da curva para o cálculo dos módulos em todos os corpos de prova. Granito 1 de 59,59 para 61,56 GPa.

Módulo de elasticidade/Young (GPa)			
Corpo de Prova	Granito	Gnaisse I	Gnaisse II
1	59,49	49,44	49,89
2	59,13	53,25	*
3	60,75	54,06	56,66
4	60,01	52,88	56,77
5	59,42	52,26	47,21
6	57,21	54,05	56,68
7	*	50,00	*
8	56,27	-	49,96
9	58,38	-	48,49
10	57,90	-	56,01
11	*	-	55,01
12	55,90	-	54,35
13	-	-	58,31
<b>Média</b>	<b>58,45</b>	<b>52,28</b>	<b>53,58</b>

\* indica que apenas o ensaio de ruptura foi feito na amostra

Tabela 6- Módulo de elasticidade de cada corpo de prova de cada tipo de rocha e média dos valores dos corpos de prova de um mesmo tipo de rocha.

### V.3 Modo de ruptura

Procurou-se determinar como cada corpo de prova se rompeu. Apesar de se romperem em vários fragmentos, na maioria dos casos restavam um, dois ou até três fragmentos que

eram grandes o suficiente para permitir uma estimativa, através do uso de um transferidor, do ângulo de ruptura. Não só os corpos de prova do gnaisse, os quais uma ruptura de modo cisalhante já era esperada, mas também os corpos do granito se romperam de forma cisalhante, ou seja, planos de ruptura foram observados na maioria dos corpos de prova tanto do granito como do gnaisse, apesar do fato dos planos serem mais evidentes nesse do que naquele, como era esperado considerando-se o fato dos planos de fraqueza, no caso as foliações, do gnaisse serem mais evidentes do que aqueles do granito, que são as microfraturas preenchidas. De fato, ao se fazer a análise macroscópica inicial dos corpos de prova do granito, não havia se notado o que eram microfraturas com minerais máficos muito finas, que tem o aspecto de finos fios pretos. Essas foram notadas apenas após a análise microscópica e uma posterior nova observação dos corpos, quando se notou que os planos de ruptura coincidiam com a orientação dessa microfratura (que foram descritas na seção VI.6.1). Em alguns corpos de prova observou-se macroscopicamente mais de uma direção de orientação de microfraturas, mas apesar disso, os corpos tenderam a se romper nas microfraturas com o ângulo em torno de 20° em relação ao eixo axial.

Um padrão foi identificado, e esse é o de que os corpos de prova, de ambas as rochas, se romperam com baixas angulações em relação ao eixo axial, geralmente em ângulos variando de 10 a 25°, com alguns ângulos entre 0 e 10°.

A tabela abaixo contém o ângulo de ruptura para cada corpo de prova:

Ângulo de ruptura					
Corpo de Prova	Granito	Gnaisse I		Gnaisse II	
	Ângulo (°)	Ângulo (°)	Foliação de ruptura	Ângulo (°)	Foliação de ruptura
1	+	15	Principal	7	principal
2	18-25	10	Principal	10-15	não identificada
3	15	25	não identificada	10	não identificada
4	20	20*	não identificada	15*	secundária
5	13-15	20	Principal	20*	terciária
6	25	15*	não identificada	25	não identificada
7	25	15/10*	Principal	20*	não identificada
8	25	-	-	15-20	terciária
9	25	-	-	20-25	terciária
10	15	-	-	+	+
11	15	-	-	15	não identificada
12	+	-	-	20*	terciária
13	-	-	-	15-20	não identificada

+ não foi possível identificar o ângulo no qual corpos se romperam

\* indica que a foliação tem mergulho oposto ao da foliação principal da rocha (identificada no anexo IV (b))

Tabela 7- Ângulo principal no qual os corpos se romperam. Ao lado dos corpos dos gnaisses está expresso qual a foliação que o ângulo de ruptura acompanha.

Na tabela acima, além dos ângulos de ruptura, indicou-se a foliação de ruptura, isto é, em qual das foliações em que o cisalhamento ocorreu (em relação aquelas que haviam sido identificadas no anexo IV (b)). Na tabela, 'principal' indica que a rocha se rompeu na foliação principal que havia sido identificada (no anexo IV (b)), 'secundária' que a rocha se rompeu na foliação secundária, 'terciária' na foliação terciária e 'não identificada' indica que a rocha se rompeu em uma foliação que não havia sido descrita no anexo IV (b), por não ter sido detectada, mas que foi observada após ela ter ficado evidente como sendo o plano de fratura.

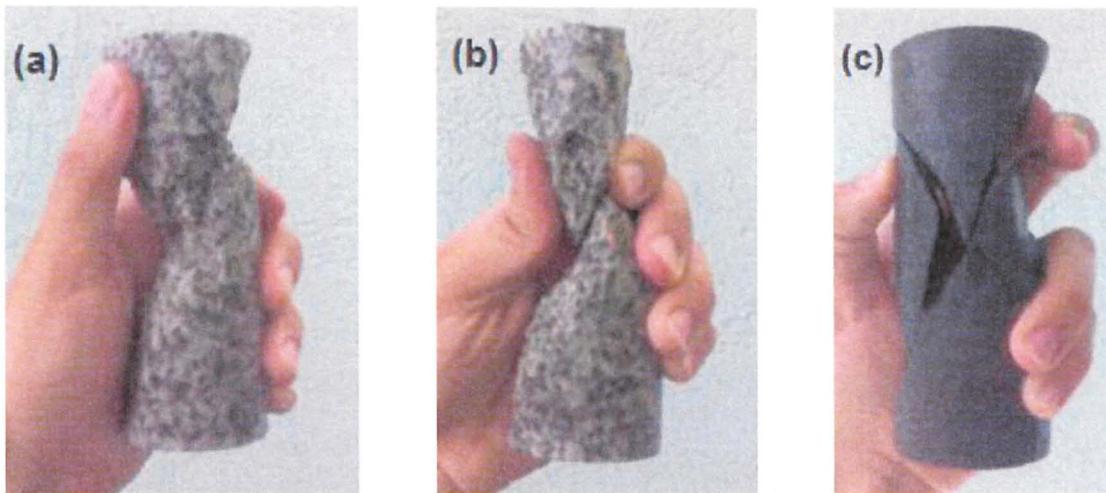


Fig. 21– Corpos de prova rompidos. (a) Corpo de prova 2 do granito. (b) Corpo de prova 10 do granito. (c) Corpo de prova 7 do gnaisse I.

Ressalta-se, que muitas das medidas dos ângulos de ruptura na tabela acima coincidem exatamente com as medidas do anexo IV (b), por exemplo, o corpo 5 do gnaisse tem a medida no anexo da foliação principal como sendo em torno de  $18^\circ$ , enquanto na tabela acima registra-se que o ângulo é de  $15^\circ$ . Apesar de poder ser em certa parte explicada devido a imprecisões do método de medição (que foi feita manualmente com um transferidor), essa diferença é principalmente devida a própria irregularidade das foliações e dos planos de ruptura, podendo em casos chegar a ser de cinco ou mais graus.

## VI. INTERPRETAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### VI.1 Comparação entre as duas rochas

#### VI. 1.1 Módulo de ruptura

Ambas as rochas têm um módulo de ruptura condizente com o esperado pela literatura (tabelas 1 e 2). O valor médio para o granito é de 255,58 MPa, o que está no intervalo de 58 a 300 MPa da tabela 1, apesar de não estar no valor mais restrito do intervalo de 153 a 233 MPa da tabela 2. O gnaisse tem o valor médio (considerando-se o valor de todos os corpos

de prova dos gnaisses I e II) de 204,79 MPa, o que também condiz com os valores da literatura de 26 a 340 MPa da tabela 1 e 159 a 256 MPa da tabela 2.

Como esperado, em média, o granito tem um maior módulo de ruptura do que o gnaisse (apesar de alguns corpos do gnaisse terem maior módulo do que alguns do granito). Uma vez que se foi ressaltado na fundamentação bibliográfica que o esforço cortante é na maioria das vezes o principal determinante do módulo de ruptura da rocha, pois a forma de ruptura mais comum é a cisalhante, o resultado observado foi coerente com o que era esperado, pois o gnaisse tinha planos de fraqueza (com minerais micáceos/placóides alinhados), no caso as foliações, mais evidentes do que o granito, cujas microfraturas nem haviam sido detectadas em um primeiro momento, durante a análise macroscópica, sendo identificadas apenas posteriormente durante a análise microscópica. Uma vez que o gnaisse possuía múltiplas foliações e o granito múltiplos planos de fratura, a maior quantidade de planos de planos de fraqueza não pode ser considerada como o que levou a diferença nos valores dos módulos, uma vez que ambas as rochas igualmente tinham vários potenciais planos de fraqueza. Logo, conclui-se que a diferença nos módulos se deu pela maior definição dos planos do granito do que do gnaisse.

Em relação à orientação dos planos de fraqueza, essa também pode ser excluída como um fator que gerou a diferença nos valores dos módulos, uma vez que já se citou que em ambas as rochas os planos de ruptura tenderam a ficar em torno de 20°, apesar da presença de microfraturas e foliações com diversos ângulos em relação ao módulo de ruptura.

Há ainda a questão da composição mineralógica e como ela pode afetar o módulo. O gnaisse possui mais quartzo do que o granito (42 e 31% respectivamente), enquanto o granito tem mais feldspato. Ambas as rochas tem proporção similar de minerais micáceos. Como o quartzo é o mineral principal mais duro e mais resistente a alteração, considerando-se o fato de que os feldspatos tinham um certo grau de alteração, de ambas as rochas, com valor 7 na escala de Mohs, isso é um fator que potencialmente faria com que o módulo do gnaisse aumentasse e o do granito diminuisse ao se comparar uma rocha com a outra. Entretanto, essa diferença de composição mineralógica das rochas, caso ela tenha tido um efeito, acabou por não ser mais importante do que a diferença na textura da rocha, até porque o modo cisalhante de ruptura, como visto na literatura, não ocorre relacionado ao falhamento interno dos grãos, mas sim através de planos de fraqueza.

Em termos de quantificações, a média dos módulos do granito é 1,248 vezes maior dos gnaisses, 1,158 vezes maior do que a média dos módulos do gnaisse I e 1,354 do que a média do gnaisse II. O módulo do gnaisse I é 1,169 vezes maior que o do gnaisse II. Isso significa que a diferença de valores entre a média observada no granito daquela observada no gnaisse

I é quase a mesma daquela observada entre os gnaisses I e II. Como já dito anteriormente, haviam dúvidas se o gnaisse II foi danificado ao passar por uma máquina. Os resultados expressos nesse parágrafo tendem a corroborar que esse dano de fato ocorreu.

Alguns fatores poderiam ter causado pequenos erros nos resultados. Um deles é que a taxa de carregamento, por questões de dificuldade prática, dos corpos do granito acabou sendo um pouco mais alta do que a dos gnaisses. Isso significa que a diferença de valor da média dos granitos com aquela dos gnaisses pode ter sofrido uma diminuição, uma vez que quanto mais rápido o carregamento menor o módulo. Outro fator seria as diferenças nas dimensões entre corpos de prova, uma vez que corpos com uma maior razão L/D tendem a se romper em um menor módulo. Com base nesses conhecimentos, construíram-se gráficos de módulo de ruptura-taxa de carregamento e módulo de ruptura-L/D, que se encontram no anexo em CD. Observando-se os gráficos e o valor de  $R^2$  (coeficiente de correlação) é possível notar que não há uma correlação entre o módulo de ruptura e a taxa de carregamento, de fato, o granito tem uma relação inversa do esperado, com o aumento do módulo conforme há o aumento da taxa de carregamento. O mesmo acontece quando considerada a variação do módulo de ruptura com o aumento da razão L/D, sendo que nos gnaisses não há uma correlação significante entre as variáveis, e no granito uma relação inversa do esperado é novamente observada. Isso, por fim, garante que a comparação entre os resultados, onde a visualização das diferenças entre os tipos de rocha, dependente das propriedades intrínsecas das mesmas e não de fatores variáveis como o tamanho dos corpos de prova e da taxa de carregamento, eram o principal objetivo, não foi afetada.

#### *VI. 1.2 Módulo de elasticidade*

Igualmente como os valores dos módulos de ruptura, os valores dos módulos de elasticidade encontrados também foram coerentes com aqueles dados pela literatura. A tabela 1 indica que os valores de  $E$  para granito estão entre 26,2 e 75,5 GPa, e a média dos módulos dos corpos de prova testados para essa rocha foi 58,45 GPa. O valor de  $E$  para gnaisse está entre 16,8 e 81,0 GPa, segundo a literatura, e os valores encontrados para os gnaisses I e II foram respectivamente 52,28 e 53,58 GPa foram os valores encontrados.

Assim como dito pela literatura, é possível ver que a rocha com o maior módulo de ruptura, tem o maior módulo de Young. Isso, apesar de o gnaisse ser mais rico em quartzo, um mineral mais duro, como já se foi citado, e por isso mais difícil de deformar, o que deveria fazer com que o módulo dessa rocha fosse maior (a deformação e o módulo são inversamente proporcionais). Por esse motivo, caso o módulo de elasticidade fosse principalmente dependente da deformação dos minerais constituintes das rochas, o gnaisse teria um maior módulo de elasticidade.

Segundo a literatura (seção V.3.4), poros e fraturas das rochas se fecham no início do ensaio (durante a parte linear da curva). Logo, o maior módulo de elasticidade do granito não pode ser devido ao fato dessa rocha ter uma menor porosidade (Anexo II).

Postula-se, então, que o gnaisse tem um menor módulo do que o granito, pois aquele sofre cisalhamento mais rápido, ou seja, o gnaisse tende a se movimentar ao longo desses planos de fraqueza (foliação), com uma maior facilidade. Dessa forma, o cisalhamento ocorreria em estágios, até atingir um ponto onde não há mais atrito entre os dois lados do plano de fraqueza e a rocha se rompe.

## VI.2 Comparação entre diferentes corpos de prova de uma mesma rocha

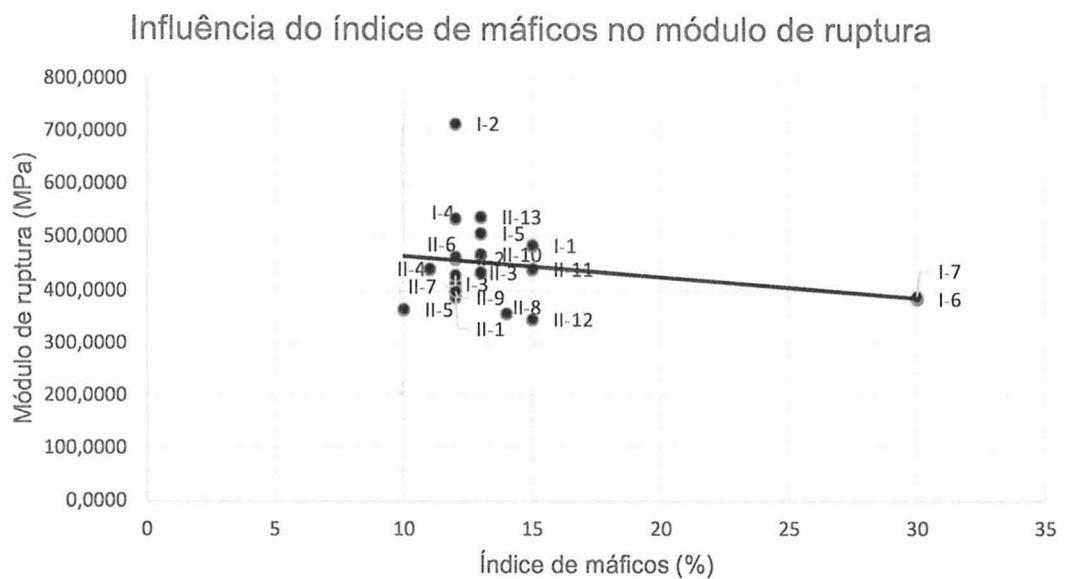


Fig. 22: Gráfico índice de máficos por módulo de ruptura. Números das amostras estão indicados com o respectivo lote do granito (I e II).

Esperava-se que corpos de prova com mais altos índices de máficos teriam um menor módulo de ruptura, isso porque o mineral mafico predominante no gnaisse era a biotita, e minerais placóides tendem a formar planos de fraqueza quando foliados. Entretanto, o gráfico acima mostra que essa relação não foi obtida, de fato, a linha de tendência mostra que o módulo de ruptura caiu um pouco com o aumento do índice. Pela lógica de quanto mais minerais placóides menor o módulo, o estimado era que os corpos 6 e 7, que tinham um índice muito maior do que os outros corpos com muita biotita, que esfarelava na mão ao manipular-se o corpo de prova, teriam um módulo menor do que os outros corpos de prova. Entretanto, aqueles não tiveram um módulo de ruptura menor do que esses.

### VI.3 Modo de ruptura observado

Dos 20 corpos de prova do gnaisse que foram rompidos (uma vez que haviam 21 corpos mas o teste com o corpo 8 falhou), os corpos 4, 5, 6, 8, 9, 10 e 12 do gnaisse II tem a foliação acima de 45°, de fato, as foliações primárias destes corpos estão entre 63 a 70°. Entretanto, em nenhum deles o plano de ruptura principal coincidiu com a foliação primária, ou seja, apesar de 35% dos corpos de prova terem uma foliação primária acima de 45° nenhum deles se rompeu com um ângulo maior do que 45° e em apenas um, no corpo 4, observou-se um plano de ruptura secundário coincidindo com a foliação primária. De fato, esse foi o único plano de ruptura acima de 45° identificado, apesar de que além das foliações primárias acima de 45° já mencionadas, detectaram-se foliações secundárias acima de 45° nas amostras 2, 3, 4 do gnaisse I e 2, 5 a 11 do gnaisse II e foliações terciárias acima de 45° nas amostras 7 e 13 do gnaisse II.

Considerando-se esses dados e aqueles da tabela 7 e do anexo IV, é possível ver não só que há uma tendência dos corpos de prova se romperem a ângulos menores do que 45°, mas em ângulos entre 0 e 25°, principalmente entre 15 e 25°, sendo que nenhum ângulo de ruptura, seja esse primário ou secundário, estava entre 25 e 45°.

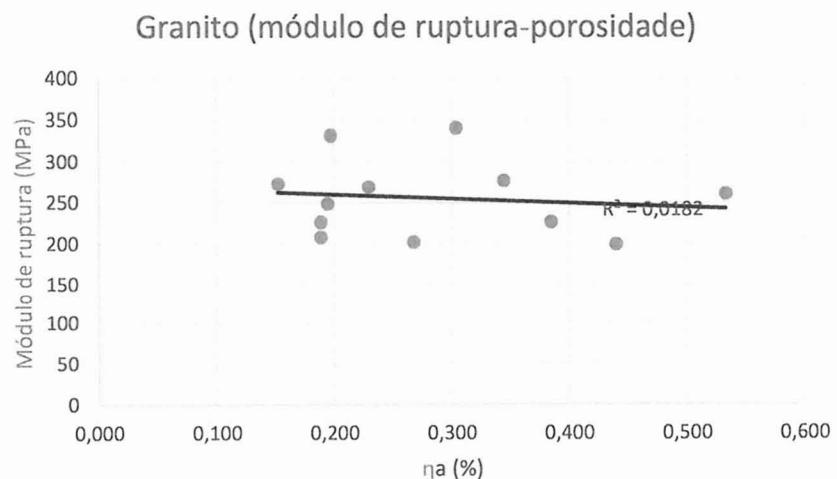
Como ressaltado na seção IV.3.4,  $\theta = 45^\circ$  é o ângulo onde há a maior intensidade da tensão de cisalhamento. Entretanto, isso se contradiz com os dados observados no presente trabalho. Além disso, os resultados não são coerentes caso a equação  $\tau = \frac{\sigma}{2A_0} \sin 2\theta$  seja analisada para comparar os ângulos obtidos com aqueles que haviam sido identificados no anexo IV (b). Por exemplo, considerando-se os ângulos de 15° ( $\theta = 75^\circ$ ) e 25° ( $\theta = 65^\circ$ ), que foram os ângulos no intervalo dos valores dos quais a maioria dos valores dos planos de ruptura principais do gnaisse se encontravam, os valores de  $\sin 2\theta$  são respectivamente 0,5 e 0,766. Já para 70° ( $\theta = 20^\circ$ ) e 63° ( $\theta = 27^\circ$ ),  $\sin 2\theta$  é respectivamente 0,643 e 0,809. Com isso, é possível visualizar que as tensões cisalhantes nos planos (foliações) de 63° a 70° não eram menores do que nos planos de 15° a 25°. De fato, haviam corpos com foliação primária com uma tensão cisalhante ainda maior, como o corpo 3 do gnaisse I, com ângulo da foliação de 39° e valor de  $\sin 2\theta$ , igual a 0,978, e o corpo 13 do gnaisse II, com ângulo da foliação de 37° e valor de  $\sin 2\theta$  igual a 0,961, entretanto, eles não se romperam nesses ângulos.

Ressalta-se que apesar das amostras do gnaisse I terem sido extraídas por sondagem, as do gnaisse II foram extraídas a partir de diferentes blocos, que foram cortados a partir de diferentes direções. Logo, o fato de não terem sido constatados ângulos maiores de 25° não pode ser explicado na premissa de que uma das várias foliações da rocha era especialmente mais suscetível a se romper do que as outras.

É possível que a explicação do fato pode ser encontrada, porém, com base nas dimensões e forma do corpo de prova. Isso fica mais evidente, quando os dados dos ângulos de ruptura do granito também são considerados em conjunto com aqueles do gnaisse, uma vez que todos os corpos de prova do granito se romperam com um ângulo entre 15 e 25°. Observou-se, tanto no granito como no gnaisse, que os ângulos de ruptura tendiam a começar aonde a base intercepta o lado do cilindro, ou seja, o plano passava por uma diagonal (imaginária) que ligava as arestas de uma seção meridiana (essa também sendo algo conceitual, e não demarcada fisicamente) do cilindro do corpo de prova. Por exemplo, em um corpo de 0,053 m de diâmetro e 0,13 m de comprimento, dimensões próximas daquelas dos corpos de prova utilizados no presente trabalho, o ângulo entre a diagonal do retângulo da seção meridiana e o eixo axial é de 22°. Isso de fato coincide com os ângulos observados, que estão ao redor de 20°.

#### VI.4 Ensaios não destrutivos

Como uma maior ou menor porosidade pode indicar a presença de mais ou menos microfraturas, variações de porosidade podem afetar o valor do módulo de ruptura, uma vez que uma rocha mais porosa pode ter mais microfraturas, tendo assim mais planos de fraqueza. Mesmo que esse valor seja baixo, considerando-se que as rochas estudadas eram cristalinas, pequenas variações podem indicar a presença de mais microfraturas que podem afetar o módulo. Foram feitos, então, gráficos correlacionando os módulos de ruptura de cada corpo de prova com essa variável. Segue-se gráficos módulo de ruptura-porosidade para ambas as rochas:



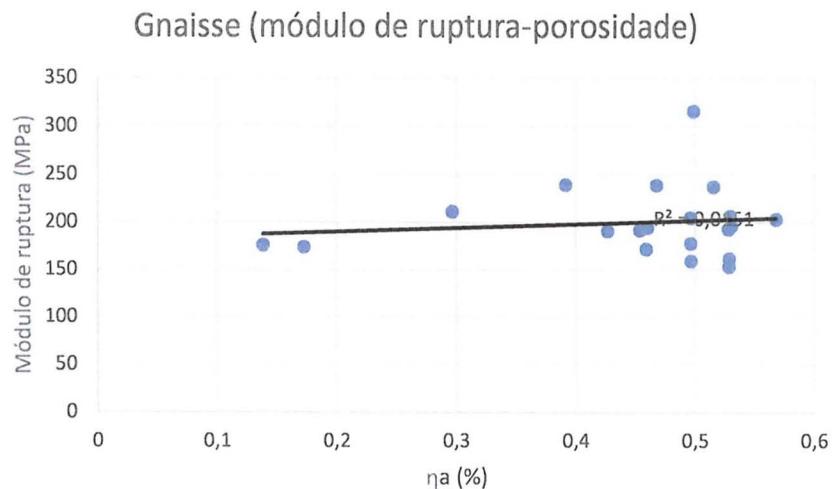


Fig. 22- (a) Gráfico módulo de ruptura-porosidade para o granito. (b) Gráfico módulo de ruptura-porosidade para o gnaisse (ambos os gnaisses).

Segundo as Fig.

em conjunto com a porosidade, que é 0,386% para o gnaisse I e 0,496% para o gnaisse II e o fato, já citado anteriormente, de que o gnaisse II passou por uma máquina que possa ter comprometido sua integridade, não se pode chegar a um resultado conclusivo. O fato da diferença de velocidade dos gnaisses diminuir muito quando eles estão saturados, tenderia a indicar que eles eram mais porosos, possuindo microfraturas, assim como ocorre de fato, com o gnaisse II sendo mais poroso. Entretanto, como visto, a porosidade não tem nenhuma correlação com o módulo de ruptura. Por isso, não se pode dizer em definitivo, o que realmente faz com que o gnaisse II tenha um menor módulo de ruptura.

## VII. CONCLUSÕES

É possível concluir, com base na comparação dos valores dos módulos de ruptura do granito e gnaisse, que a variação da textura foi o fator principal que fez com que o granito tivesse um módulo de ruptura maior do que o gnaisse. Isso ocorre apesar do fato de que o granito também possui planos de fraqueza (microfraturas), no entanto esses não são tão bem definidos e visíveis como aqueles. O motivo disso, é que a maioria das rochas tendem a se romperem através de cisalhamento e não pelo verdadeiro colapso dos grãos. Dessa forma, a presença de planos de fraqueza, no caso, a foliação do gnaisse, é bem mais importante do que pequenas variações de composição mineralógica, no presente trabalho isso sendo o fato de que o gnaisse tem mais quartzo, o mineral mais duro identificado em ambas as rochas, do que o granito.

Quanto ao modo de ruptura, considerando-se que em ambas as rochas ele foi cisalhante, conclui-se que não só a textura da rocha tem grande influência nesse, mas que as dimensões do corpo de prova também são de suma importância. Isso se constatou através do fato de que os ângulos de ruptura das rochas, tanto para o granito como o gnaisse, tenderam não só a estarem entre um definido intervalo de 15 a 25°, mas também a cortarem desde a intersecção de uma base com um lado do cilindro até a intersecção da outra base com o lado, como se a reta diagonal de uma seção meridiana imaginária do cilindro estivesse contida nesse plano. O que parece acontecer, é que a rocha tende a se romper no plano de fraqueza mais próximo possível ao plano que coincide com essa diagonal, e como essa diagonal tende a ter um ângulo em torno de 20° (em relação ao eixo axial) para os corpos de prova analisados, os planos de ruptura dos corpos de prova tendem a estar por volta de 20°, e por esse motivo, não se observou nenhuma rocha que se rompeu a um ângulo com mais de 25° em relação ao eixo axial. Logo, conclui-se que isso é devido as dimensões e a forma do corpo serem fatores primordiais que influenciam o modo de ruptura da rocha, tão quanto, ou até mais que, os aspectos texturais.

Finalmente, averiguou-se que a variação na porosidade das amostras não se correlacionou com uma variação no módulo de ruptura. No granito, determinou-se que isso é porque as microfraturas, que são os planos de fraqueza nos quais a rocha se rompeu, estão preenchidas por minerais opacos e muscovita. Já no gnaisse, não foi possível chegar a nenhuma conclusão que explicaria as diferenças vistas entre os módulos de ruptura do gnaisse I e do II, uma vez que apesar deste ser mais poroso do que aquele, não foi observada uma correlação dos valores de porosidade com aqueles dos módulos de ruptura.

Conclui-se então, que a textura, a composição mineralógica e as dimensões dos corpos de prova, são todos fatores que afetam grandemente os módulos de ruptura e elasticidade e o modo de ruptura das rochas.

## VIII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (2010). *NBR 15845:2010: Rochas para revestimento – Métodos de ensaio*. Rio de Janeiro. p. 6-8 e 16-18.

Amadei, B. (s.d.) *Deformability Properties of rocks and rock masses*. p. 2. Disponível em: <<https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:3qjQbxv0mosJ:https://www.researchgate.net/file.PostFileLoader.html%3Fid%3D57ac83513d7f4bfd89504196%26assetKey%3DAS%253A393896287850501%25401470923601181+&cd=2&hl=en&ct=clnk&gl=br>>. Acesso em: 28 de Março de 2017.

Andrade, F. R. D. D.; McReath, I.; Madureira F°, J. B; Atencio, D. (2009). A Terra sólida: minerais e rochas. In: Taioli, F.; Fairchild, T. R.; Teixeira, W.; Toledo, M. C. M. D.. *Decifrando a Terra* (2<sup>a</sup> ed.). São Paulo: Companhia Editora Nacional. p. 150.

ASTM - American Society for Testing and Materials (2001). *D 4543–01: Standard Practices for Preparing Rock Core Specimens and Determining Dimensional and Shape Tolerances*. West Conshohocken. p. 2.

ASTM - American Society for Testing and Materials (2002). *D3148-02: Standard Test Method for Elastic Moduli of Intact Rock Core Specimens in Uniaxial Compression*. West Conshohocken. p.2-4.

Bieniawski, Z.T.; Bernede, M. J. (1979). Suggested methods for determining the Uniaxial Compressive Strength and Deformability of Rock Materials. In: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics*, v. 16(2), p. 137-140.

Ernesto, M.; Marques, L. S.; McReath, I.; Ussami, N.; Pacca, I. I. G. (2009). O interior da Terra. In: Taioli, F.; Fairchild, T. R.; Teixeira, W.; Toledo, M. C. M. D. *Decifrando a Terra* (2<sup>a</sup> ed.). São Paulo: Companhia Editora Nacional. p. 72.

Frascá, M. H. B. O. (2003). *Estudos Experimentais de Alteração Acelerada em Rochas Graníticas para Revestimento*, SP. Tese (Doutorado). São Paulo: Instituto de Geociências - USP. 77p.

Gimenez A. M. S. (2012). *Avaliação do Comportamento de Ondas Ultrassônicas no Monumento às Bandeiras*. Dissertação (Mestrado). São Paulo: Instituto de Geociências – USP. p. 21-23 e p.26.

IAEA – International Atomic Energy Agency (1999). Ultrasonic Testing of Materials at Level 2. In: *TECDOC-628, Training Guidelines in Non-destructive Testing Techniques*. IAEA. Viena. p.1, p.15-p.16, p.114-115 e p.129.

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas (1990). *Catálogo das Rochas Ornamentais do Estado de São Paulo*. São Paulo. 45p.

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas (2000). *Rochas Ornamentais e de Revestimento do Estado de São Paulo*. São Paulo.

Jaeger, C. (1979). *Rock Mechanics and Engineering* (2<sup>nd</sup> ed.). Nova Iorque: Cambridge University Press. p.1, 40, 46, 71 e 103-104.

Kahraman, S. (2002). The effects of fracture roughness on P-wave velocity. *Engineering Geology*, v.63. Amsterdã: Elsevier. p.347-350.

Lama, R. D.; Vutukuri, V. S. (1978). *Handbook on Mechanical Properties of Rocks. Testing Techniques and Results*, v.2. Clausthal: Trans Tech Publications. p.3-6, 43, 62, 99, 105 e 218.

Monteiro, M. D.; Gurgueira, M. D. & Rocha, H. C. (2012). *Twin Cities-Geologia da Região Metropolitana de São Paulo*. Seminário. Disponível em: <[http://www.acquacon.com.br/twincities/download/marcelo\\_denser\\_monteiro.pdf](http://www.acquacon.com.br/twincities/download/marcelo_denser_monteiro.pdf)>. Acesso em 18 de Abril de 2017.

Pells, P. J. N. (1993). Uniaxial Strength Testing. In: Hudson, J. A.. *Comprehensive Rock Engineering: Principles, Practice & Projects. Rock Testing and Site Characterization*, v.3. Oxford: Pergamon Press. p. 68-69, 73-75, 77-78 e 81-83.

Rahn, P. H. (1986). *Engineering Geology: An Environmental Approach*. Nova Iorque: Elsevier. p. 67-70.

Siggins, A. F. (1993). Dynamic Elastic Tests for Rock Engineering. In: Hudson, J. A.. *Comprehensive Rock Engineering: Principles, Practice & Projects. Rock Testing and Site Characterization*, v.3. Oxford: Pergamon Press. p.603, 606 e 610.

Szabó, G. A. J.; Babinski, M.; Teixeira, W. (2009). Magma e seus produtos. In: Taioli, F.; Fairchild, T. R.; Teixeira, W.; Toledo, M. C. M. D.. *Decifrando a Terra* (2<sup>nd</sup> ed.). São Paulo: Companhia Editora Nacional. 159p.

## **ANEXOS**

**Anexo I - (a) Velocidade de onda nos corpos secos com transdutor de 54 KHz**

**(b) Velocidade de onda nos corpos secos com transdutor de 150 KHz**

**(c) Velocidade de onda nos corpos saturados com transdutor de 54 KHz**

**(d) Velocidade de onda nos corpos saturados com transdutor de 150 KHz**

**Anexo II - Densidade e porosidade aparentes**

**Anexo III - Diâmetro**

**Anexo IV - (a) Descrição macroscópica dos corpos de prova do granito**

**(b) Descrição macroscópica dos corpos de prova do gnaisse**

**Anexo V – (a) Módulo de ruptura**

**(b) Módulo de elasticidade (Young)**

**Anexo VI – Ângulos de ruptura**

## **ANEXOS EM CD**

**Ensaio de ruptura**

**Ensaio de deformação e cálculo do módulo de Young**

**Correlações módulo de ruptura-taxa de carregamento e módulo de ruptura-L/D**

## Anexo I (a)

Leituras efetuadas usando o transdutor de 54 kHz em temperatura ambiente-amostras secas ao ar								
Identificação		Comprimento (mm)			Com. Médio (mm)	Tempo (μs)	Velocidade (mm/μs)	
Rocha	CP	1	2	3			Velocidade (m/s)	
Granito	1	128,30	128,40	128,30	128,33	23,90	5,37	5369,60
	2	128,85	128,80	128,80	128,82	23,00	5,60	5600,72
	3	127,20	127,20	127,00	127,13	23,80	5,34	5341,74
	4	126,30	126,60	126,60	126,50	23,60	5,36	5360,17
	5	127,30	127,10	127,20	127,20	24,30	5,23	5234,57
	6	126,80	126,90	126,80	126,83	23,40	5,42	5420,23
	7	127,60	127,60	127,90	127,70	22,90	5,58	5576,42
	8	127,90	127,90	127,80	127,87	23,90	5,35	5350,07
	9	127,60	127,50	127,70	127,60	27,00	4,73	4725,93
	10	127,20	127,30	127,30	127,27	22,50	5,66	5656,30
	11	127,30	127,30	127,60	127,40	22,40	5,69	5687,50
	12	129,10	129,00	129,40	129,17	23,70	5,45	5450,07
Média						5,40	5397,78	
Desvio Padrão						0,24	243,71	
Coeficiente de Variação						4,52	4,52	
Gnaisse I	1	132,45	132,20	132,35	132,33	25,70	5,15	5153,70
	2	133,50	133,55	133,40	133,48	29,60	4,51	4510,14
	3	132,40	132,45	132,30	132,38	25,40	5,21	5212,60
	4	133,20	133,35	133,45	133,33	30,40	4,38	4381,58
	5	126,45	126,80	126,50	126,58	27,90	4,53	4532,26
	6	129,90	130,00	129,85	129,92	23,10	5,62	5623,38
	7	129,90	129,90	129,85	129,88	23,00	5,65	5647,83
	8	126,95	126,95	127,00	126,97	28,40	4,47	4470,07
Média						4,94	4941,44	
Desvio Padrão						0,53	496,45	
Coeficiente de Variação						10,74	10,05	
Gnaisse II	1	125,85	125,65	125,70	125,73	30,20	4,17	4167,22
	2	125,00	125,00	125,00	125,00	30,60	4,08	4084,97
	3	125,65	125,70	125,80	125,72	30,40	4,13	4133,22
	4	125,40	125,50	125,50	125,47	30,80	4,07	4071,43
	5	124,60	124,50	124,40	124,50	31,10	4,01	4006,43
	6	124,65	124,70	124,70	124,68	32,30	3,86	3859,13
	7	124,80	124,80	124,90	124,83	25,10	4,97	4972,11
	8	125,00	125,10	125,20	125,10	28,10	4,45	4448,40
	9	125,30	125,40	125,40	125,37	27,80	4,51	4507,19
	10	125,20	125,40	125,30	125,30	28,10	4,46	4455,52
	11	124,90	124,70	125,00	124,87	27,60	4,53	4525,36
	12	125,40	125,55	125,45	125,47	32,70	3,83	3834,86
	13	125,20	125,20	124,80	125,07	25,20	4,97	4968,25
Média						4,31	4310,32	
Desvio Padrão						0,37	359,24	
Coeficiente de Variação						8,67	8,33	

## Anexos I (b)

Leituras efetuadas usando o transdutor de 150 kHz em temperatura ambiente-amostras secas ao ar								
Identificação		Comprimento (mm)			Com. Médio (mm)	Tempo (μs)	Velocidade (mm/μs)	Velocidade (m/s)
Rocha	CP	1	2	3				
Granito	1	128,30	128,40	128,30	128,33	24,00	5,35	5347,22
	2	128,85	128,80	128,80	128,82	22,90	5,63	5625,18
	3	127,20	127,20	127,00	127,13	23,30	5,46	5456,37
	4	126,30	126,60	126,60	126,50	23,30	5,43	5429,18
	5	127,30	127,10	127,20	127,20	24,20	5,26	5256,20
	6	126,80	126,90	126,80	126,83	23,30	5,44	5443,49
	7	127,60	127,60	127,90	127,70	22,60	5,65	5650,44
	8	127,90	127,90	127,80	127,87	23,60	5,42	5418,08
	9	127,60	127,50	127,70	127,60	27,20	4,69	4691,18
	10	127,20	127,30	127,30	127,27	22,20	5,73	5732,73
	11	127,30	127,30	127,60	127,40	21,90	5,82	5817,35
	12	129,10	129,00	129,40	129,17	23,30	5,54	5543,63
Média							5,45	5450,92
Desvio Padrão							0,28	276,88
Coeficiente de Variação							5,08	5,08
Gnaisse I	1	132,45	132,20	132,35	132,33	25,70	5,15	5149,16
	2	133,50	133,55	133,40	133,48	29,40	4,54	4540,25
	3	132,40	132,45	132,30	132,38	25,00	5,30	5295,33
	4	133,20	133,35	133,45	133,33	30,20	4,42	4415,01
	5	126,45	126,80	126,50	126,58	27,80	4,55	4553,36
	6	129,90	130,00	129,85	129,92	22,70	5,72	5723,20
	7	129,90	129,90	129,85	129,88	22,60	5,75	5747,05
	8	126,95	126,95	127,00	126,97	28,20	4,50	4502,36
Média							4,99	4990,72
Desvio Padrão							0,56	523,28
Coeficiente de Variação							11,21	10,49
Gnaisse II	1	125,85	125,65	125,70	125,73	29,60	4,25	4251,69
	2	125,00	125,00	125,00	125,00	30,10	4,15	4152,82
	3	125,65	125,70	125,80	125,72	29,90	4,20	4202,34
	4	125,40	125,50	125,50	125,47	29,90	4,19	4193,98
	5	124,60	124,50	124,40	124,50	30,80	4,05	4045,45
	6	124,65	124,70	124,70	124,68	31,60	3,94	3944,62
	7	124,80	124,80	124,90	124,83	24,70	5,05	5052,63
	8	125,00	125,10	125,20	125,10	27,90	4,48	4480,29
	9	125,30	125,40	125,40	125,37	27,60	4,54	4539,86
	10	125,20	125,40	125,30	125,30	27,90	4,49	4487,46
	11	124,90	124,70	125,00	124,87	27,50	4,54	4541,82
	12	125,40	125,55	125,45	125,47	31,80	3,94	3943,40
	13	125,20	125,20	124,80	125,07	24,90	5,03	5028,11
Média							4,37	4374,19
Desvio Padrão							0,36	347,71
Coeficiente de Variação							8,27	7,95

## Anexo I (c)

Leituras efetuadas usando o transdutor de 54 kHz em temperatura ambiente-amostras saturadas ao ar								
Identificação		Comprimento (mm)			Com. Médio (mm)	Tempo (μs)	Velocidade (mm/μs)	Velocidade (m/s)
Rocha	CP	1	2	3				
Granito	1	128,30	128,40	128,30	128,33	23,60	5,44	5437,85
	2	128,85	128,80	128,80	128,82	22,40	5,75	5750,74
	3	127,20	127,20	127,00	127,13	22,40	5,68	5675,60
	4	126,30	126,60	126,60	126,50	22,50	5,62	5622,22
	5	127,30	127,10	127,20	127,20	23,80	5,34	5344,54
	6	126,80	126,90	126,80	126,83	22,40	5,66	5662,20
	7	127,60	127,60	127,90	127,70	23,00	5,55	5552,17
	8	127,90	127,90	127,80	127,87	23,00	5,56	5559,42
	9	127,60	127,50	127,70	127,60	24,20	5,27	5272,73
	10	127,20	127,30	127,30	127,27	22,50	5,66	5656,30
	11	127,30	127,30	127,60	127,40	22,40	5,69	5687,50
	12	129,10	129,00	129,40	129,17	23,50	5,50	5496,45
Média						5,56	5559,81	
Desvio Padrão						0,14	140,70	
Coeficiente de Variação						2,53	2,53	
Gnaisse I	1	132,45	132,20	132,35	132,33	25,00	5,29	5293,33
	2	133,50	133,55	133,40	133,48	25,90	5,15	5153,80
	3	132,40	132,45	132,30	132,38	24,60	5,38	5381,44
	4	133,20	133,35	133,45	133,33	26,00	5,13	5128,21
	5	126,45	126,80	126,50	126,58	24,90	5,08	5083,67
	6	129,90	130,00	129,85	129,92	23,00	5,65	5648,55
	7	129,90	129,90	129,85	129,88	23,00	5,65	5647,10
	8	126,95	126,95	127,00	126,97	25,30	5,02	5018,45
Média						5,29	5294,32	
Desvio Padrão						0,25	230,58	
Coeficiente de Variação						4,66	4,36	
Gnaisse II	1	125,85	125,65	125,70	125,73	24,30	5,18	5179,01
	2	125,00	125,00	125,00	125,00	24,30	5,14	5144,03
	3	125,65	125,70	125,80	125,72	24,40	5,15	5149,59
	4	125,40	125,50	125,50	125,47	24,30	5,16	5160,49
	5	124,60	124,50	124,40	124,50	24,50	5,09	5085,71
	6	124,65	124,70	124,70	124,68	24,50	5,09	5087,76
	7	124,80	124,80	124,90	124,83	23,20	5,38	5379,31
	8	125,00	125,10	125,20	125,10	23,90	5,23	5230,13
	9	125,30	125,40	125,40	125,37	24,40	5,14	5135,25
	10	125,20	125,40	125,30	125,30	23,90	5,24	5238,49
	11	124,90	124,70	125,00	124,87	23,90	5,23	5225,94
	12	125,40	125,55	125,45	125,47	25,20	4,98	4976,19
	13	125,20	125,20	124,80	125,07	23,30	5,37	5373,39
Média						5,18	5181,95	
Desvio Padrão						0,11	106,94	
Coeficiente de Variação						2,15	2,06	

## Anexo I (d)

Leituras efetuadas usando o transdutor de 150 kHz em temperatura ambiente-amostras saturadas ao ar							
Identificação		Comprimento (mm)			Com. Médio (mm)	Tempo (μs)	Velocidade (mm/μs)
Rocha	CP	1	2	3			Velocidade (m/s)
Granito	1	128,30	128,40	128,30	128,33	23,90	5,37
	2	128,85	128,80	128,80	128,82	22,20	5,80
	3	127,20	127,20	127,00	127,13	22,60	5,63
	4	126,30	126,60	126,60	126,50	22,30	5,66
	5	127,30	127,10	127,20	127,20	24,20	5,26
	6	126,80	126,90	126,80	126,83	21,90	5,79
	7	127,60	127,60	127,90	127,70	22,60	5,65
	8	127,90	127,90	127,80	127,87	22,30	5,74
	9	127,60	127,50	127,70	127,60	24,30	5,25
	10	127,20	127,30	127,30	127,27	22,00	5,78
	11	127,30	127,30	127,60	127,40	22,00	5,79
	12	129,10	129,00	129,40	129,17	22,80	5,66
Média						5,61	5614,79
Desvio Padrão						0,20	196,42
Coeficiente de Variação						3,50	3,50
Gnaisse I	1	132,45	132,20	132,35	132,33	24,90	5,31
	2	133,50	133,55	133,40	133,48	25,50	5,23
	3	132,40	132,45	132,30	132,38	24,30	5,45
	4	133,20	133,35	133,45	133,33	26,00	5,13
	5	126,45	126,80	126,50	126,58	24,60	5,15
	6	129,90	130,00	129,85	129,92	22,50	5,77
	7	129,90	129,90	129,85	129,88	22,50	5,77
	8	126,95	126,95	127,00	126,97	25,30	5,02
Média						5,35	5354,51
Desvio Padrão						0,29	270,02
Coeficiente de Variação						5,39	5,04
Gnaisse II	1	125,85	125,65	125,70	125,73	24,00	5,24
	2	125,00	125,00	125,00	125,00	24,20	5,17
	3	125,65	125,70	125,80	125,72	24,20	5,19
	4	125,40	125,50	125,50	125,47	24,30	5,16
	5	124,60	124,50	124,40	124,50	24,20	5,15
	6	124,65	124,70	124,70	124,68	24,40	5,11
	7	124,80	124,80	124,90	124,83	23,20	5,38
	8	125,00	125,10	125,20	125,10	23,80	5,25
	9	125,30	125,40	125,40	125,37	24,00	5,22
	10	125,20	125,40	125,30	125,30	23,70	5,28
	11	124,90	124,70	125,00	124,87	23,50	5,31
	12	125,40	125,55	125,45	125,47	24,60	5,10
	13	125,20	125,20	124,80	125,07	23,00	5,44
Média						5,23	5231,53
Desvio Padrão						0,10	99,19
Coeficiente de Variação						1,97	1,90

## Anexo II

índices físicos						
Identificação		Massas (grama)				
Rocha	CP	Msec	Msat	Msub	ρa (kg/m³)	ηa (%)
Granito	1	702,6	703,4	440,3	2670,47	0,304
	2	702,8	703,2	440,5	2675,30	0,152
	3	679,6	680,1	426,6	2680,87	0,197
	4	689,4	689,9	432,5	2678,32	0,194
	5	696,6	697,5	436,3	2666,92	0,345
	6	700,1	700,7	439,2	2677,25	0,229
	7	698,4	699,1	437,5	2669,72	0,268
	8	695,8	696,8	436,9	2677,18	0,385
	9	701,7	703,1	440,5	2672,12	0,533
	10	713,4	713,9	448,4	2687,01	0,188
	11	712,5	713	447,6	2684,63	0,188
	12	730,6	731,8	459,0	2678,15	0,440
Média		701,958	702,708	440,442	2676,49	0,285
Desvio Padrão		12,261	12,358	7,924	5,75	0,114
Coeficiente de Variação		1,747	1,759	1,799	0,21	39,838
Gnaisse I	1	812,1	813	509,6	2676,66	0,297
	2	805,1	806,6	506	2678,31	0,499
	3	766,3	767,6	481,3	2676,56	0,454
	4	801,5	802,9	503,8	2679,71	0,468
	5	727,5	728,9	457,3	2678,57	0,515
	6	819,5	820	530,2	2827,81	0,173
	7	818,3	818,7	529,6	2830,51	0,138
	8	734,4	735,9	461,7	2678,34	0,547
	Média		785,6	786,7	497,4	2715,81
Desvio Padrão		35,2	34,9	26,3	65,45	0,151
Coeficiente de Variação		4,5	4,4	5,3	2,41	39,004
Gnaisse II	1	756,6	757,9	475	2674,44	0,460
	2	754,4	756	474,4	2678,98	0,568
	3	758,6	760,1	476	2670,19	0,528
	4	753,3	754,8	472,1	2664,66	0,531
	5	755,5	757	473,3	2663,02	0,529
	6	754,4	755,8	473,8	2675,18	0,496
	7	752	753,2	472,2	2676,16	0,427
	8	754,6	756	474,2	2677,79	0,497
	9	753,6	755	473	2672,34	0,496
	10	758,4	759,9	476,7	2677,97	0,530
	11	756,8	758,1	475,7	2679,89	0,460
	12	758,8	760,3	476,5	2673,71	0,529
	13	750,8	751,9	471,1	2673,79	0,392
Média		755,2	756,6	474,2	2673,70	0,496
Desvio Padrão		2,4	2,5	1,7	4,96	0,047
Coeficiente de Variação		0,3	0,3	0,4	0,19	9,518

### Anexo III

## Anexo IV (a)

		Descrição macroscópica						
Identificação Rocha	CP	Cor	Grau de alteração	IM (%)	Granulação/intervalo de tamanho dos grãos (mm)	Cristais (de 10 a 20 mm)	Fenocristais (de 20 ou mais mm)	Quartzo (%)
Granito	1	cinza claro	muito baixo	8	média (2-3)	0	2	30
	2	cinza claro	não detectado	8	média/grossa (2-6)	0	3	30
	3	cinza claro	muito baixo	7	média/grossa (2-10)	2	1	30
	4	cinza claro	não detectado	7	média grossa (1-10)	3	2	25
	5	cinza claro	baixo	6	média/grossa (2-10)	1	0	25
	6	cinza claro	não detectado	7	média/grossa(2-10)	0	1	25
	7	cinza claro	não detectado	6	média (1-5)	0	2	30
	8	cinza claro	não detectado	7	média/grossa (1-10)	0	2	25
	9	cinza claro	muito baixo	6	média (1-5)	0	2	30
	10	cinza claro	não detectado	6	média/grossa (1-10)	1	0	30
	11	cinza claro	não detectado	6	média/grossa (1-5)	1	2	30
	12	cinza claro	não detectado	5	média/grossa (1-15)	0	0	25

## Anexo IV (b)

Identificação Rocha	CP	Cor	Grau de alteração	IM (%)	Descrição macroscópica				Mergulhos da foliação terciária	Média dos mergulhos da foliação terciária
					Mergulhos da foliação principal	Mergulhos da foliação secundária	Média do mergulho da foliação primária (°)	Média dos mergulhos da foliação secundária (°)		
Gnaisse I	1	cinza escuro	não detectado	15	18°/14°/15°	16	-	-	-	-
	2	cinza escuro	não detectado	12	13°/14°/17°	15	*60°/64°/59°	61	-	-
	3	cinza escuro	não detectado	12	40°/39°/39°	39	*53°/64°/58°	58	-	-
	4	cinza escuro	não detectado	12	28°/28°/28°	28	*65°/58°/59°	61	-	-
	5	cinza escuro	não detectado	13	18°/16°/19°	18	*37°/26°/24°	29	-	-
	6	cinza escuro	não detectado	30	21°/20°/23°	21	-	-	-	-
	7	cinza escuro	não detectado	30	14°/16°/18°	16	-	-	-	-
	8	cinza escuro	não detectado	10	68°/67°/70°	68	21°/21°/19°	20	-	-
	1	cinza escuro	não detectado	12	11°/7°/7°	8	*19°/20°/21°	20	-	-
	2	cinza escuro	não detectado	12	31°/20°/27°	26	68°/71°/68°	69	-	-
	3	cinza escuro	não detectado	13	23°/28°/18°	23	-	-	-	-
	4	cinza escuro	não detectado	11	71°/69°/64°	68	*10°/21°/12°	14	-	-
Gnaisse II	5	cinza escuro	não detectado	10	68°/68°/70°	69	*68°/69°/66°	68	*21°/23°/23°	22
	6	cinza escuro	não detectado	12	64°/63°/63°	63	*68°/73°/61°	67	*21°/15°/13°	16
	7	cinza escuro	não detectado	12	20°/19°/21°	20	62°/69°/68°	66	*70°/68°/69°	69
	8	cinza escuro	não detectado	14	70°/69°/69°	69	*63°/59°/63°	62	*17°/16°/18°	17
	9	cinza escuro	não detectado	12	65°/65°/65°	65	*71°/72°/68°	70	25°/22°/27°	25
	10	cinza escuro	não detectado	13	67°/62°/70°	66	*57°/65°/58°	60	20°/21°/17°	19
	11	cinza escuro	não detectado	15	32°/24°/31°	29	*65°/79°/69°	71	*39°/34°/32°	35
	12	cinza escuro	não detectado	15	70°/69°/70°	70	23°/30°/20°	24	*24°/19°/25°	23
	13	cinza escuro	não detectado	13	36°/40°/36°	37	*11°/6°/8°	8	*75°/80°/79°	78

\* indica que a foliação tem sentido de direção de mergulho oposto ao sentido de mergulho principal  
                 indica que essas foliações têm a mesma intensidade na rocha (ambas são primárias ou ambas são secundárias)

## Anexo V (a)

Ensaio de ruptura						
Identificação		Carga (kN)	Tempo de execução (s)	Raio (m)	Área (m²)	Módulo de Ruptura (MPa)
Rocha	CP					Incremento de Carga (MPa/s)
Granito	1	702,75	839,00	0,0256	0,0021	340,366
	2	564,16	676,00	0,0256	0,0021	273,302
	3	664,98	793,00	0,0253	0,0020	331,633
	4	509,55	610,00	0,0255	0,0020	249,217
	5	571,68	680,00	0,0256	0,0021	277,365
	6	557,26	664,00	0,0257	0,0021	269,608
	7	416,78	504,00	0,0256	0,0021	202,563
	8	464,08	556,00	0,0255	0,0020	227,176
	9	538,72	642,00	0,0256	0,0021	260,808
	10	474,39	569,00	0,0258	0,0021	226,707
	11	435,66	522,00	0,0258	0,0021	208,333
	12	424,12	507,00	0,0260	0,0021	199,877
Média		527,01	630,17	0,0256	0,0021	255,580
Desvio Padrão		87,78	103,45	0,0002	0,0000	44,546
Coef. De Variação		16,66	16,42	0,6722	1,3441	17,429
Gnaisse I	1	485,01	579,00	0,0271	0,0023	210,992
	2	714,38	853,00	0,0268	0,0023	316,140
	3	413,04	490,00	0,0262	0,0022	192,060
	4	534,23	633,00	0,0267	0,0022	239,034
	5	507,08	608,00	0,0261	0,0021	237,297
	6	385,53	496,00	0,0266	0,0022	173,874
	7	389,70	466,00	0,0265	0,0022	176,086
	8	*	*	0,0261	0,0021	*
Média		489,85	589,29	0,0266	0,0022	220,783
Desvio Padrão		106,58	122,87	0,0003	0,0001	46,009
Coef. De Variação		21,76	20,85	1,1968	2,3915	20,839
Gnaisse II	1	388,54	465,00	0,0268	0,0023	171,695
	2	460,22	550,00	0,0268	0,0023	203,496
	3	434,31	520,00	0,0268	0,0023	192,877
	4	441,36	530,00	0,0267	0,0022	196,375
	5	364,79	437,00	0,0268	0,0023	161,728
	6	463,24	554,00	0,0268	0,0023	205,341
	7	428,96	513,00	0,0267	0,0022	191,127
	8	357,48	427,00	0,0267	0,0022	159,272
	9	399,33	479,00	0,0267	0,0022	177,881
	10	468,61	560,00	0,0269	0,0023	206,897
	11	441,17	529,00	0,0268	0,0023	194,960
	12	346,18	416,00	0,0268	0,0023	153,261
	13	537,88	644,00	0,0267	0,0022	239,339
Média		425,54	509,54	0,0268	0,0023	188,789
Desvio Padrão		51,41	61,33	0,0000	0,0000	22,817
Coef. De Variação		12,08	12,04	0,1653	0,3307	12,086
Valores considerando ambos os gnaisses como um só (excluindo a amostra 8 do gnaisse I)						
Média		448,05	537,45	0,0267	0,0022	199,987
Desvio Padrão		81,45	95,79	0,0002	0,0000	36,224
Coef. De Variacão		18,18	0,00	0,8258	1,6402	18,113
						2,227

\*o teste com o corpo de prova falhou

## Anexo V (b)

Ensaios de deformação						
CP	Rocha	$\varepsilon$ (GPa)	Rocha	$\varepsilon$ (GPa)	Rocha	$\varepsilon$ (GPa)
1		59,49		49,44		49,89
2		59,13		53,25		*
3		60,75		54,06		56,66
4		60,01		52,88		56,77
5		59,42		52,26		47,21
6		57,21		54,05		56,68
7	Granito	*	Gnaissé I	50,00	Gnaissé II	*
8		56,27		*		49,96
9		58,38		-		48,49
10		57,90		-		56,01
11		*		-		55,01
12		55,90		-		54,35
13		-		-		58,31
-	Média	58,45	Média	52,28	Média	53,58
-	Desvio Padrão	1,53	Desvio Padrão	1,73	Desvio Padrão	3,74
-	Coef. De Variação	0,03	Coef. De Variação	3,30	Coef. De Variação	6,97

\* O ensaio não foi feito na amostra

## Anexo VI

Identificação Rocha	CP	Ângulo de ruptura principal	Coincide com foliação principal	Coincide com foliação secundária	Coincide com foliação terciária	Coincide com foliação que não havia sido identificada	Ângulo de ruptura secundário	Coincide com foliação principal	Coincide com foliação secundária	Coincide com foliação terciária	Coincide com foliação que não havia sido identificada
Granito	1	#	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2	18-25	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	3	15	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	4	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	5	13-15	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	6	25	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	7	25	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	8	25	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	9	25	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	10	15	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	11	15	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	12	#	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Gnaissé I	1	15	sim	-	-	-	-	-	-	-	-
	2	10	sim	-	-	-	-	-	-	-	-
	3	25	não	não	sim	sim	55	não	sim	-	-
	4	20*	não	não	não	sim	65	não	sim	-	-
	5	20	sim	-	-	-	15*	não	não	sim	-
	6	15*	-	-	-	sim	20-25	sim	-	-	-
	7	15	sim	-	-	-	10*	não	não	não	sim
	8	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//
Gnaissé II	1	7	sim	-	-	-	0	não	não	não	sim
	2	10-15	não	não	não	sim	-	-	-	-	-
	3	10	não	não	não	sim	-	-	-	-	-
	4	15*	não	sim	-	-	10	-	-	-	sim
	5	20*	não	não	não	sim	-	-	-	-	-
	6	25	não	não	não	sim	0	não	não	não	sim
	7	20*	não	não	não	sim	-	-	-	-	-
	8	15-20	não	não	não	sim	-	-	-	-	-
	9	20-25	não	não	não	sim	-	-	-	-	-
	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	11	15	não	não	não	sim	-	-	-	-	-
	12	20*	não	não	não	sim	-	25	não	sim	-
	13	15-20	não	não	não	sim	-	-	-	-	-

//o teste com o corpo de prova falhou

\* indica que ambos os planos de ruptura tem a mesmo grau de proeminência (não há um primário e outro secundário)

# não foi possível identificar nenhum plano de ruptura