

**Adriano Monteiro Morgado**

**VALIDAÇÃO DE UM MÉTODO RÁPIDO  
PARA A DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO  
CISALHAMENTO DAS ROCHAS**

**São Paulo**

**2010**

**Adriano Monteiro Morgado**

**VALIDAÇÃO DE UM MÉTODO RÁPIDO  
PARA A DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO  
CISALHAMENTO DAS ROCHAS**

Trabalho de Formatura em Engenharia de  
Minas do curso de graduação do Departamento  
de Engenharia de Minas e Petróleo da  
Escola Politécnica da Universidade de São  
Paulo

Orientador: Prof. Dr. Eduardo César Sansone

**São Paulo**

**2010**

TF-2010  
M828  
2171540

DEDALUS - Acervo - EPMI



31700008319

### FICHA CATALOGRÁFICA

Morgado, Adriano Monteiro  
Validação de um método rápido para a determinação da resistência ao cisalhamento das rochas / A.M. Morgado. -- São Paulo, 2010.  
38 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo.

1. Mecânica de rochas 2. Ensaios de cisalhamento (Estudo comparativo I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo II. t.

## Dedicatória

Dedico este trabalho a minha família, amigos e professores, e todos que permitiram a conclusão deste trabalho de formatura.

### Agradecimentos

Agradeço ao meu orientador prof. Sansone, e meu colega de laboratório o técnico Jorge Sakamoto que ajudaram a concluir este trabalho.

## RESUMO

A pesquisa realizada tem como objetivo estudar um método rápido baseado no ensaio de cisalhamento Protodiakonov, para a determinação da resistência ao cisalhamento das rochas. O método será uma alternativa ao procedimento normal de ensaio que utiliza uma célula de cisalhamento e exige um procedimento bastante demorado de preparação dos corpos de prova. A proposta permitirá a realização de ensaios com um equipamento leve que poderá inclusive ser levado a campo, possibilitando a realização de ensaios sob diferentes estados de tensão e a obtenção de dados para a determinação de critérios de ruptura como o de Mohr-Coulomb e o de Hoek & Brown. Assim os dois métodos foram comparados analisando todos os resultados obtidos por regressão linear, obtendo um resultado satisfatório, e validando o ensaio.

### Palavras chaves:

Envoltória de ruptura, Cisalhamento, Mohr-Coulomb, Ensaios, Amostragem

## **ABSTRACT**

The research aims to study a rapid method based on the shear test Protodiakonov, to determine the shear strength of rocks . The method is an alternative to a normal test that uses a shear cell and requires a rather lengthy procedure of preparing specimens. The proposal would allow the testing with a light equipment that can even be taken to the field, allowing the tests under different stress states and obtaining data to determine failure criteria such as Mohr-Coulomb and Hoek & Brown. Thus the two methods were compared by analyzing all the results obtained by linear regression, obtaining a satisfactory result, and validating the test with slanted wedges.

### **Key words:**

Envelopment of rupture, shear, Mohr-Coulomb, testing, sampling

**Sumário**

<b>1. Introdução.....</b>	<b>7</b>
1.1 Objetivos .....	7
<b>2. Revisão de Literatura.....</b>	<b>8</b>
2.1 Critérios de ruptura de Mohr-Coulomb e de Hoek-Brown.....	8
2.2. Ensaios Mecânicos.....	11
2.3.Determinação de Critérios de ruptura a partir de ensaios de cisalhamento .....	13
<b>3. Materiais e Métodos .....</b>	<b>14</b>
3.1. Plano de Trabalho e sua execução .....	14
3.2. Equipamentos a serem utilizados:.....	16
3.3. Forma de analise dos resultados .....	18
3.4. Preparação de amostras:.....	19
3.4.1. Amostra para cisalhamento direto:.....	19
3.4.2 Amostra para cunhas inclinadas.....	22
3.5. Criação do dispositivo .....	23
<b>4. Resultados e Discussão .....</b>	<b>24</b>
4.1. Gnaisse.....	24
4.2 Mármore.....	27
4.3. Preto Piracaia .....	30
4.4. Itabirito: .....	33
4.5. Conclusões .....	36
<b>5. Conclusão .....</b>	<b>37</b>
<b>Bibliografia.....</b>	<b>38</b>

## 1. Introdução

O projeto de uma obra em rocha na Mineração, na Engenharia Civil ou na Engenharia de Petróleo, depende fundamentalmente do conhecimento do estado de tensões a que a rocha será submetida, bem como, do seu comportamento mecânico.

O estudo do comportamento das rochas é importante para se estimar seus respectivos valores de ruptura e sustentação, determinar valores físicos de solicitações mecânicas, essa caracterização visa aplicações em problemas de mecânica de rochas.

As rochas podem estar submetidas a diferentes tipos de solicitações mecânicas: compressão, tração, cisalhamento, flexão etc., ou mesmo combinações destas. Se estas tensões forem suficientemente grandes, podem levar à ruptura ou à plastificação da rocha (Goodman, 1990).

Assim, para se caracterizar os estados de tensão que levarão à ruptura são utilizados critérios baseados em diferentes mecanismos de ruptura e/ou plastificação, característicos de cada litologia.

Entre as várias propostas para critérios de ruptura para rochas, destacam-se o Critério de Mohr-Coulomb e o Critério de Hoek & Brown (Brady & Brown, 2004)

Neste projeto se busca validar as informações obtidas com um ensaio simples, com as cunhas inclinadas, Baseado no ensaio de cisalhamento Protodiakonov (Protodiakonov, 1969), se faz a validação deste ensaio modificado. Comparando os resultados obtidos de cisalhamento direto com as do ensaio proposto. (Parry, 1995)

### 1.1 Objetivos

A pesquisa proposta tem como objetivo principal estudar o desenvolvimento de um método rápido para a realização de ensaios de cisalhamento em rocha com a finalidade da determinação de critérios de ruptura.

O método modificado de ensaio será, nesta proposta, chamado de “Ensaio de Cisalhamento com Cunhas Inclinadas”.

Os objetivos específicos do trabalho são:

- Estudar os métodos de ensaio utilizados na Mecânica de Rochas.
- Definir a metodologia a ser utilizada no novo ensaio proposto.
- Construir o dispositivo que será utilizado no novo método de ensaio.
- Preparar, realizar e comparar ensaios de cisalhamento segundo os métodos: convencional e proposto
- .

## 2. Revisão de Literatura.

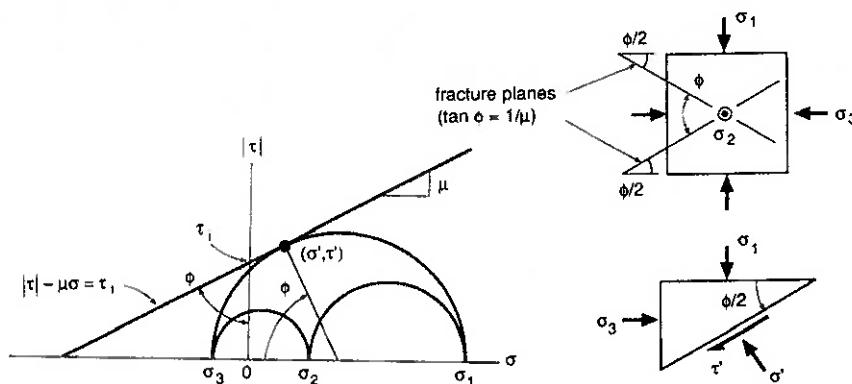
### 2.1 Critérios de ruptura de Mohr-Coulomb e de Hoek-Brown

No Critério de Ruptura de Mohr-Coulomb a ruptura é esperada quando uma combinação linear da tensão normal e da tensão de cisalhamento atuantes sobre um dado plano atingir um valor crítico.

Assim o critério fica definido por:

$$|\tau| - \mu\sigma = \tau_i \Rightarrow |\tau| = \tau_i + \mu\sigma$$

Onde  $\tau$  e  $\mu$  são as tensões atuantes no plano de ruptura e  $\tau_i$  e  $\mu$  são as constantes características do material.



**Figura 01 - Critério de Ruptura de Mohr-Coulomb**

Para um dado estado de tensões  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  e  $\sigma_3$ , ocorrerá a ruptura se o maior dos círculos de Mohr tangenciar a reta definida pelo critério. E quanto maiores as tensões atuante sobre superfície de ruptura, maior será o atrito e maior deverá ser a tensão de cisalhamento que provocará deformações e a ruptura.

Na representação tradicional do critério temos:

$$\tau = c + \sigma_N \operatorname{tg} \varphi$$

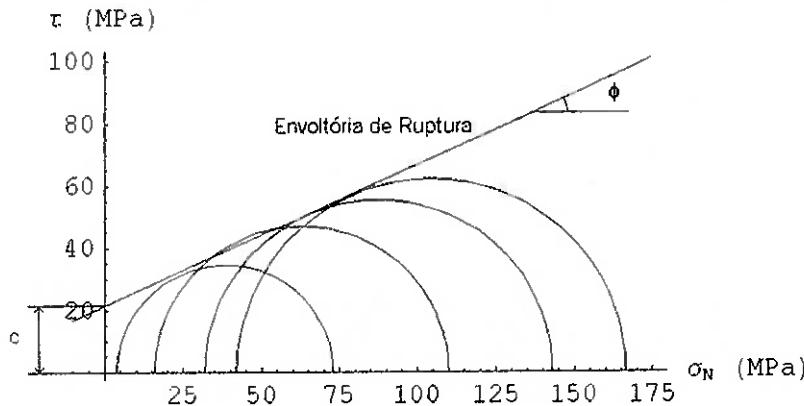
Onde:

$c$  = coesão da rocha

$\varphi$  = ângulo interno de atrito da rocha

Ou em termos das tensões principais:

$$\sigma_1 = \frac{1+\operatorname{sen}\varphi}{1-\operatorname{sen}\varphi} \sigma_3 + c \frac{2\cos\varphi}{1\operatorname{sen}\varphi}$$



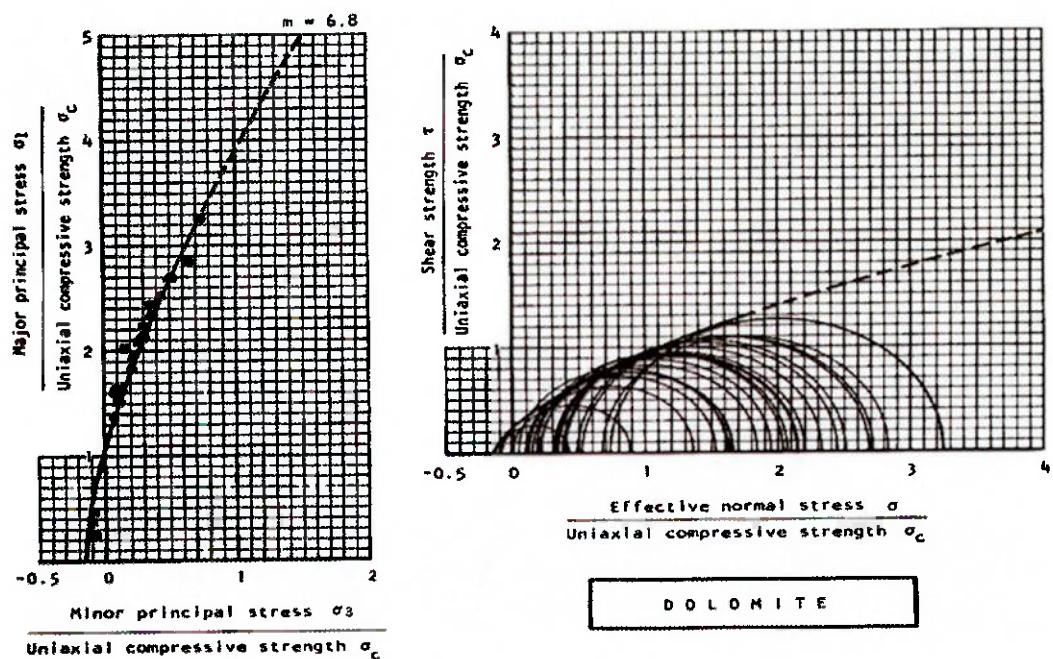
**Figura 02 - Círculos de Mohr e a envoltória de ruptura**

A determinação experimental dos parâmetros característicos de cada litologia,  $c$  e  $\phi$ , pode ser feita através de uma análise de regressão sobre resultados de ensaios mecânicos em rocha sob diferentes condições de confinamento (diferentes estados  $\sigma_3 \times \sigma_1$ ) (Parry, 1995).

Hoek e Brown em 1980 propuseram a utilização de um critério de ruptura empírico, baseado diretamente em resultados de ensaios em rocha (tração, compressão uniaxial e compressão tri axial).

Este critério é mais adequado à representação do comportamento das rochas, pois fornece uma melhor aderência na região de baixas tensões e tração, já que o critério de Mohr-Coulomb tende a superestimar a resistência à tração das rochas (Hoek, 1998).

O desenvolvimento do critério se baseou na realização de um grande número de ensaios sobre vários tipos litológicos.



**Figura 03** - Resultados de ensaios realizados por Hoek e Brown

O critério de ruptura de Hoek & Brown prevê uma envoltória curvilínea para os círculos de Mohr correspondentes aos ensaios realizados, com a relação  $\sigma_3 \times \sigma_1$  assumindo a seguinte expressão:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{m\sigma_c\sigma_3 + S\sigma_c^2}$$

Onde:

$\sigma_1$  = tensão principal maior na ruptura

$\sigma_3$  = tensão principal menor na ruptura

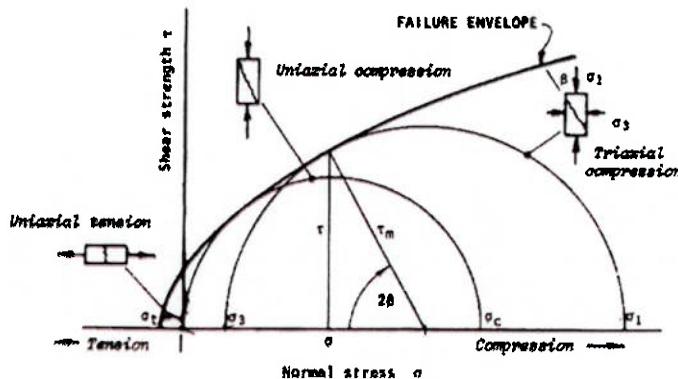
$\sigma_c$  = resistência à compressão uniaxial da rocha intacta

$m$  = constante característica do tipo litológico variando entre 0 e 25

$s$  = constante característica do grau de alteração da rocha variando entre 0 e 1

## 2.2. Ensaios Mecânicos

Para que um Critério de Ruptura seja determinado é necessário que se realize certo número de ensaios mecânicos diferentes sobre amostras da litologia de interesse. Entre estes ensaios temos: tração, compressão uniaxial e compressão triaxial (Amadei & Stephansson, 1997).



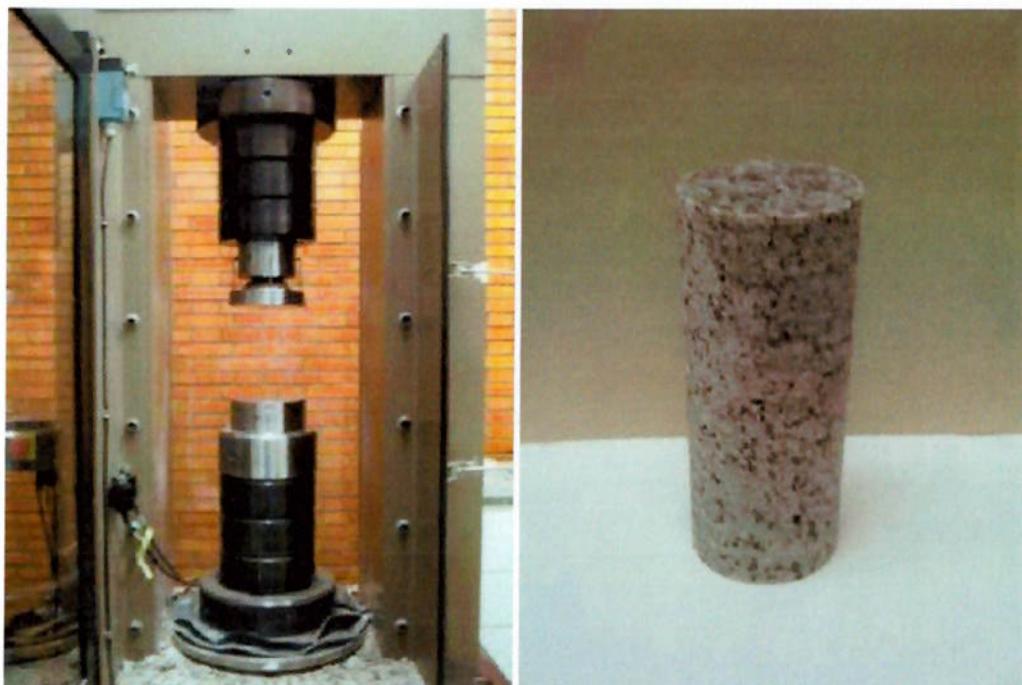
**Figura 04** - Círculos de Mohr para os ensaios de tração, de compressão uniaxial e de compressão triaxial

1. O Ensaio de Tração é realizado utilizando o Método Brasileiro de ensaio, em que se obtém a resistência à tração da rocha de forma indireta. Um dispositivo metálico é utilizado para a aplicação de compressão na direção do diâmetro de uma amostra em forma de disco, provocando o aparecimento de tração na porção central da seção do corpo de prova.



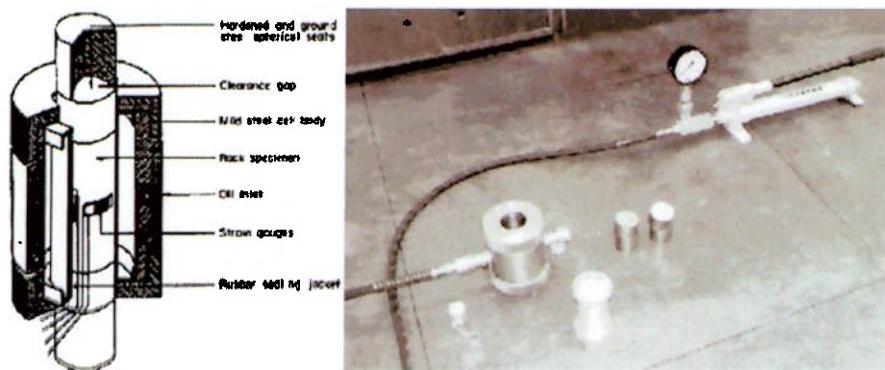
**Figura 05** - Ensaio de tração pelo Método Brasileiro

2. No Ensaio de Compressão Uniaxial, um corpo de prova cilíndrico com suas faces retificadas e alinhadas, é colocado em uma prensa hidráulica e é aplicada carga sobre suas faces segundo uma taxa de aumento constante até que ocorra a sua ruptura. A tensão máxima corresponderá à resistência à compressão uniaxial da rocha.



**Figura 06** - Prensa e corpo de prova para o ensaio de compressão

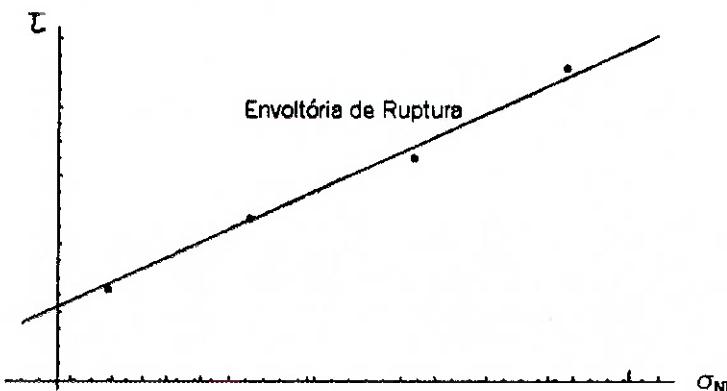
3. No Ensaio de Compressão Triaxial, por meio da tensão aplicada axialmente (proveniente da prensa) e da tensão radial (obtida pela pressão constante em uma célula de confinamento), obtém-se a resistência da rocha à compressão sob confinamento (que retrata com maior fidelidade as condições in situ).



**Figura 07** - Ensaio de compressão triaxial

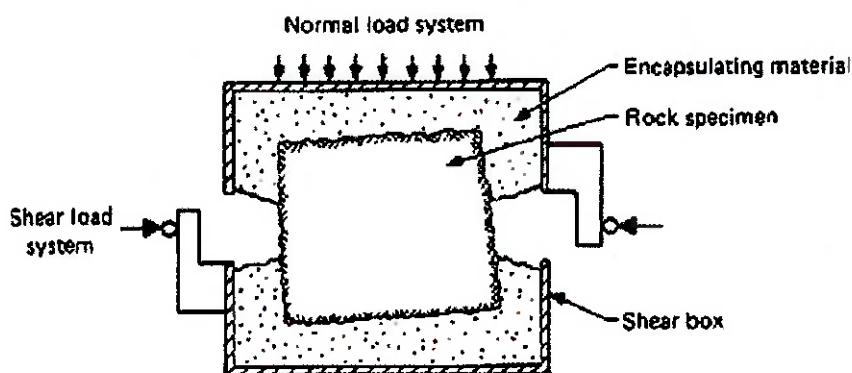
### 2.3.Determinação de Critérios de ruptura a partir de ensaios de cisalhamento

Um Critério de Ruptura também pode ser determinado a partir da realização de ensaios de Cisalhamento Direto sobre amostras de rocha, neste caso para cada ensaio teremos um ponto no espaço  $\sigma_N \times \tau$ , ao invés dos círculos de Mohr característicos do estado de tensões atuante, que representará a tensão normal e a tensão de cisalhamento atuantes no plano de ruptura.

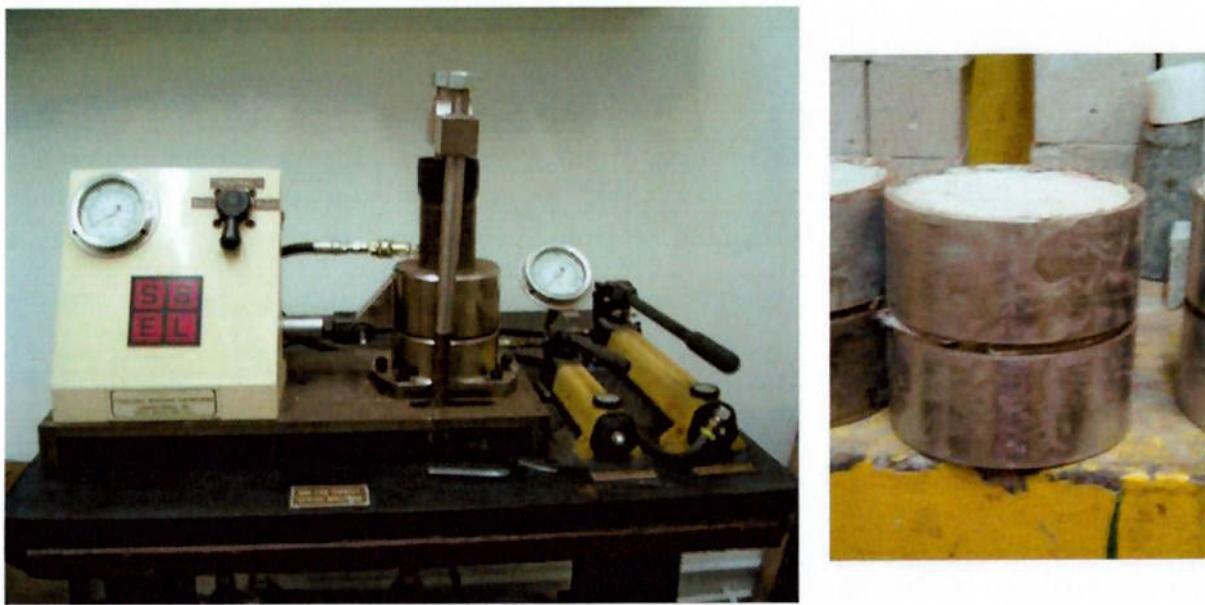


**Figura 08 - Envoltória de ruptura a partir de ensaios de cisalhamento**

O ensaio de cisalhamento Direto utiliza um corpo de prova envolto em material de encapsulamento dentro de uma célula de cisalhamento. Por meio deste arranjo, aplica-se uma tensão normal e uma tensão cisalhante até a ruptura da amostra. Este ensaio permite determinar diretamente pontos sobre a envoltória de ruptura (Indraratna, 2000).



**Figura 09 - Montagem do ensaio de cisalhamento direto**



**Figura 10 -** Equipamento para realização de ensaios de cisalhamento direto e amostra preparada para ensaio

### 3. Materiais e Métodos

Dentre as principais dificuldades encontradas na realização destes vários ensaios estão: a dificuldade na preparação de corpos de prova com formatos diferentes, a necessidade de equipamentos específicos e caros e o procedimento trabalhoso e demorado de preparação e execução dos ensaios, especialmente em relação ao ensaio de compressão triaxial e ao ensaio de cisalhamento direto.

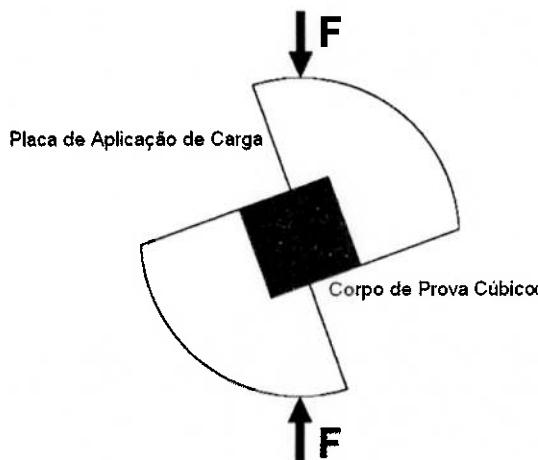
Neste sentido é pertinente o estudo de um método simplificado de ensaio que permita a caracterização do comportamento mecânico das rochas e a determinação de Critérios de Ruptura de uma maneira mais rápida, com a possibilidade, inclusive de sua determinação em campo.

#### 3.1. Plano de Trabalho e sua execução

A pesquisa será realizada segundo as seguintes etapas:

1. Estudo dos procedimentos experimentais dos ensaios de compressão uniaxial, compressão triaxial, tração indireta e cisalhamento direto a fim de reunir subsídios para a proposição da metodologia de realização do ensaio de cisalhamento com cunhas inclinadas.
2. Projeto do dispositivo (placa de aplicação de carga) para realização do ensaio em CAD e corte das peças utilizando a máquina de corte a jato d'água de alta pressão do

Laboratório de Mecânica de Rochas do Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo da Escola Politécnica da USP.



**Figura 11** - Dispositivo para realização do ensaio

3. Preparação de amostras de várias litologias para realização do ensaio de cisalhamento com cunhas inclinadas utilizando a serra de disco adiamantado do Laboratório de Mecânica de Rochas da EPUSP.
4. Execução do ensaio de cisalhamento com cunhas inclinadas utilizando o dispositivo produzido e a máquina para ensaios de compressão pontual do Laboratório de Mecânica de Rochas da EPUSP.
5. Preparação de amostras de várias litologias para realização ensaio de cisalhamento direto convencional
6. Execução do ensaio de cisalhamento direto utilizando o equipamento do laboratório de Mecânica de Rochas da EPUSP.
7. Determinação e comparação dos critérios de ruptura de Mohr-Coulomb para as várias litologias ensaiadas segundo os dois métodos.
8. Definição de uma metodologia padronizada para o ensaio de cisalhamento com cunhas inclinadas.

### 3.2. Equipamentos a serem utilizados:

A pesquisa foi realizada no Laboratório de Mecânica de Rochas do Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo que se dedica ao estudo do comportamento mecânico das rochas, bem como, a caracterização da resposta dos maciços rochosos à execução das obras de engenharia.

Foram utilizados os seguintes equipamentos:

EQUIPAMENTO: Serra com disco adiamantado.

FABRICANTE: Norton S. A.

MODELO: Clipper BW-III.

OPERAÇÃO: Corte dos corpos de prova nas dimensões requeridas para os ensaios



**Figura 12 -** Serra com disco diamantado

EQUIPAMENTO: Retífica plana.

FABRICANTE: Sulmecânica Industrial Ltda.

MODELO: RAPH-640/E.

OPERAÇÃO: Retificação das faces dos corpos de prova de modo a atender especificações de ensaio quanto à planicidade e paralelismo entre as faces.



**Figura 13 - Retifica Plana**

EQUIPAMENTO: Célula para ensaios de cisalhamento direto.

FABRICANTE: Structural Behavior Engineering Laboratories Inc. - SBEL.

MODELO: RM 102 Direct Shear Machine.

OPERAÇÃO: Realização de ensaios de cisalhamento direto sobre amostras de rocha em laboratório.



**Figura 14 - Equipamento para cisalhamento direto e célula para os ensaios**

EQUIPAMENTO: Máquina para ensaios de compressão pontual.

FABRICANTE: ELE International Ltd.

MODELO: EL77-0110.

OPERAÇÃO: Realização de ensaios de compressão pontual sobre amostras de rocha em laboratório. E nesta pesquisa os ensaios de cisalhamento em cunhas inclinadas.



**Figura 15** - Máquina para ensaios de compressão pontual

### 3.3. Forma de analise dos resultados

Os resultados foram analisados segundo o seguinte procedimento:

1. No ensaio de cisalhamento com cunhas inclinadas os corpos de prova são submetidos a uma força  $F$ , segundo ângulos diferentes que são dados pelo giro das placas de aplicação de carga. As tensões normal,  $\sigma_N$ , e de cisalhamento,  $t$ , atuantes sobre o plano de ruptura com área  $A$ , são dadas por:

$$\sigma_N = \frac{F \sin \alpha}{A} \text{ e } \tau = \frac{F \cos \alpha}{A}$$

2. No ensaio de cisalhamento direto convencional os corpos de prova são submetidos a uma força normal  $F_N$  e a uma força tangencial  $F_t$ . As tensões normal,  $\sigma_N$ , e de cisalhamento,  $\tau$ , atuantes sobre o plano de ruptura com área  $A$ , são dadas por:

$$\sigma_N = \frac{F_N}{A} \text{ e } \tau = \frac{F_t}{A}$$

3. O critério de ruptura de Mohr-Coulomb é determinado para os dois métodos de ensaio por regressão linear sobre a curva:

$$\tau = C + \sigma_n \operatorname{tg} \varphi$$

### 3.4. Preparação de amostras:

Antes de analisarmos os resultados discutiremos brevemente o processo de preparação de amostras. Lembrando que as etapas são idênticas e seqüenciais em todos os tipos de rocha

#### 3.4.1. Amostra para cisalhamento direto:

É serrado o bloco em prismas de dimensões aproximadas de base 2,5 cm x 2,5 cm com altura de 12,5 cm



**Figura 16** - Corte do material para preparação de amostras

Depois de cortado prisma, é preparado o material de encapsulamento, neste caso usando groute, mantendo o prisma no centro da capsula e envolvendo ele no groute. E espera-se em torno de 2 dias para que o material seque.



**Figura 17 - Preparação da amostra**

Aplica-se uma camada de argila sobre o groute para evitar contato com a nova camada de groute que será depositada e completar a célula da amostra.



**Figura 18 - Preparação da amostra, com a camada de argila**

Agora se aplica a nova camada de groute sobre a célula, esperando em torno de 2 dias para que essa nova camada seque e possa ser utilizada no ensaio de cisalhamento.



**Figura 19** - Célula já concluída e pronta para o ensaio.

Nota-se que existe um espaço livre de groute, onde está colocada a argila, que será onde a rocha romperá por cisalhamento direto e livre de qualquer interferência externa, assim obtendo apenas a resistência da rocha.

Um ponto notável é o tempo de preparo muito longo, e justamente é objetivo deste trabalho validar o método simplificado através das cunhas inclinadas.

### 3.4.2 Amostra para cunhas inclinadas

Utilizando a serra diamantada corta-se em pequenos cubos com tamanho da ordem de 25,4 mm (1 pol.), para que posteriormente tenham suas faces retificadas a fim de obter uma amostra mais cúbica possível.



**Figura 20** - Mármore sendo retificado

Após a preparação dos cubos, eles são postos nas cunhas e realizado o ensaio de cisalhamento nos ângulos específicos do ensaio.

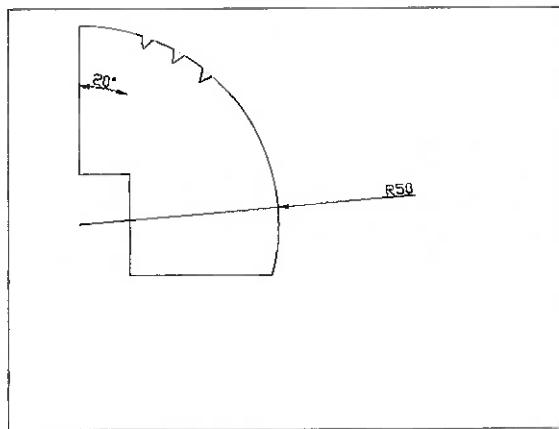


**Figura 21** - Amostra pronta para o ensaio.

Discute-se nesse tipo de preparação a necessidade de retificar os cubos para o ensaio, pois consome muito tempo e perde-se muita da idéia de praticidade do ensaio.

### 3.5. Criação do dispositivo

O molde da cunha foi desenhado em AUTOCAD, e usado aço comercial 1040 com espessura de 1 pol. como base. O aço foi cortado em jato d água no LMR (laboratório de mecânica de rochas). Posteriormente foi temperado em óleo no laboratório de metalurgia do PMT, com cortes em forma de cunha, para fixação na prensa pontual, em 3 ângulos, 20°, 30° e 40°.



**Figura 20** - Desenho em autocad do dispositivo

#### 4. Resultados e Discussão

Comparação entre os Critérios de Ruptura de Mohr-Coulomb determinados através de ensaios de Cisalhamento Direto (curvas e pontos em preto com intervalos de confiança de 99% de certeza) e ensaios de Cisalhamento Protodiakonov Modificado (curvas e pontos em vermelho).

##### 4.1. Gnaisse



**Figura 21** - Mataco de desmonte recolhido da pedreira Embu S.A.

Rocha metamórfica de granulometria média a grosseira, composta predominantemente de feldspato, quartzo e mica biotita, orientados segundo direções preferenciais e formadas em ambiente de pressões e temperaturas elevadas.

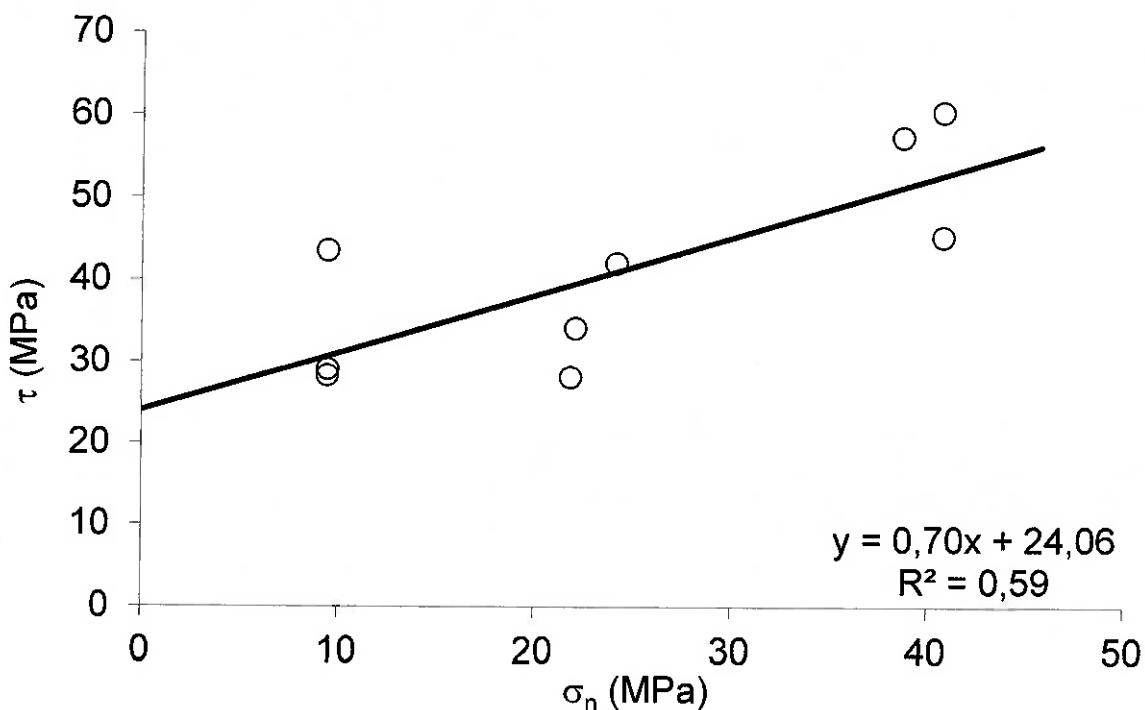
Esta rocha foi coletada da pedreira Embu S.A. pós-desmonte, coletando alguns matacos para diversos ensaios entre eles para este trabalho de formatura.

Vamos primeiro analisar o ensaio de cisalhamento direto, que foi realizado seguindo todas as normas para a execução correta do ensaio.

$\sigma_n$ (MPa)	$\tau$ (MPa)
9,5	28,4
9,5	29,1
9,5	43,6
21,8	28,2
24,2	42,1
22,1	34,2
40,8	45,3
40,8	60,4
38,7	57,4

**Tabela 1** - Resultados do ensaio de Cisalhamento direto em Gnaisse

Obtendo assim a seguinte regressão linear.



**Gráfico 1** - Regressão Linear do cisalhamento direto em Gnaisse

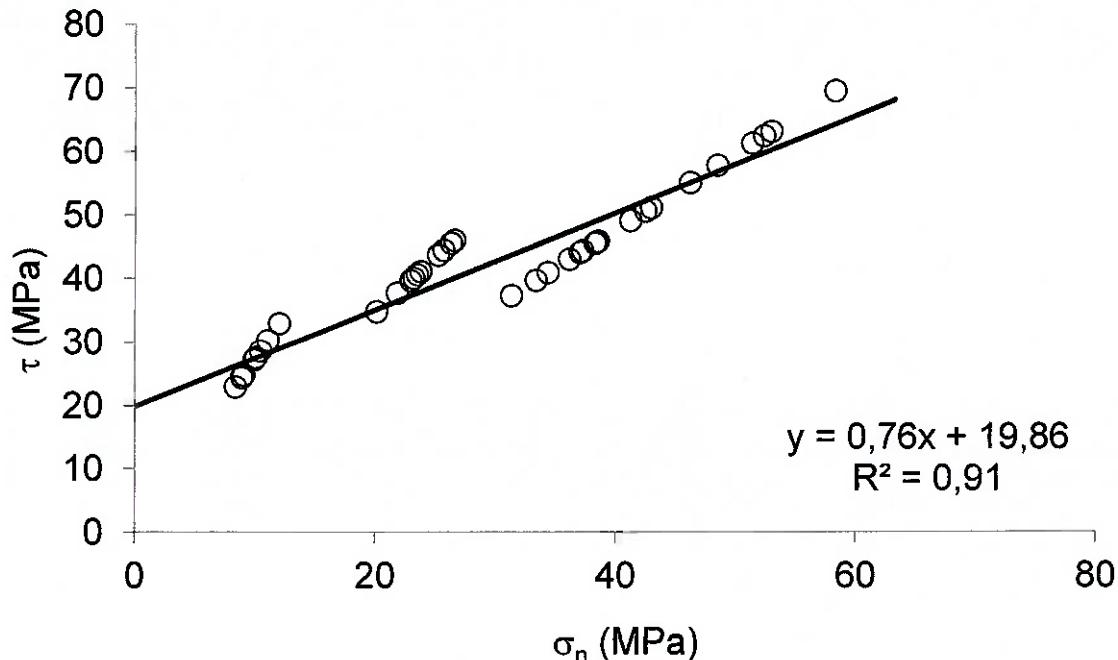
Resultados dos ensaios do método Protodiakonov, "cunhas inclinadas":

$\sigma_n$ (MPa)	$\tau$ (MPa)
10,0	27,6
8,4	23,0
9,9	27,3
10,4	28,7
12,0	33,0
8,4	23,0
8,9	24,4
11,0	30,3
9,0	24,9
23,0	39,8
23,8	41,2
26,6	46,1
25,3	43,8
20,1	34,9
23,5	40,7
23,2	40,2
25,7	44,5
26,4	45,6

$\sigma_n$	$\tau$
21,8	37,8
48,5	57,8
34,4	41,0
58,3	69,5
53,0	63,2
37,1	44,2
41,2	49,2
36,2	43,1
46,2	55,1
42,5	50,7
51,4	61,3
43,0	51,2
38,6	46,0
31,4	37,4
52,4	62,4
33,4	39,8
38,3	45,7
37,3	44,4
38,4	45,8

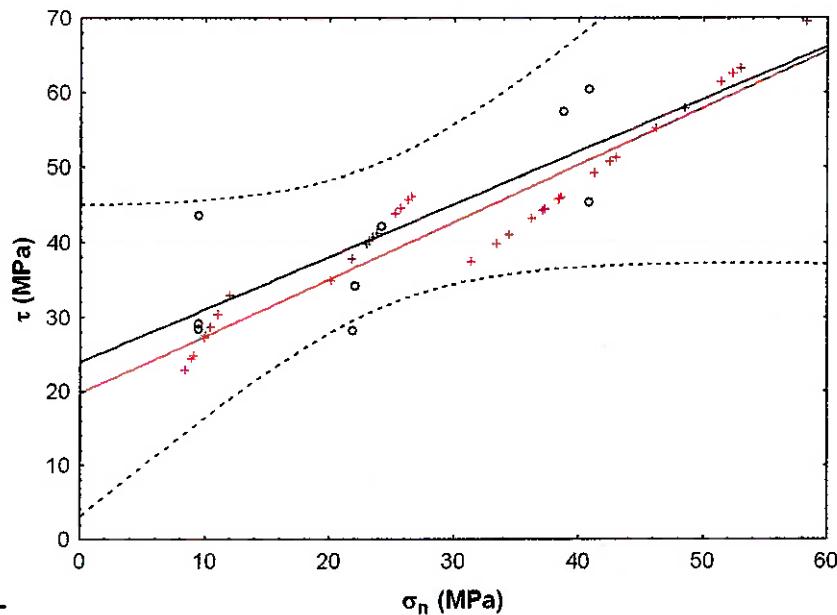
**Tabela 2** - Ensaio Protodiakonov modificado Gnaisse

Com esses valores obtemos o seguinte gráfico:



**Gráfico 2** - Regressão linear do Protodiakonov modificado em Gnaisse

Finalizando comparando as 2 regressões lineares com um intervalo de confiança de 99%, sendo a reta preta o ensaio direto e a reta vermelha o Protodiakonov modificado, cunhas inclinadas.



**Gráfico 3** – Comparaçāo dos mētods em Gnaisse

#### 4.2 Mármore

Mármore é uma rocha metamórfica originada de calcário exposto a altas temperaturas e pressão. Por este motivo as maiores jazidas de mármore são encontradas em regiões de rocha matriz calcária e atividade vulcânica. Era um material que se encontrava no LMR, resultado da sobrede algum outro ensaio, mas com quantidade suficiente para ser feito com segurança todas as etapas deste projeto.

Outro problema encontrado neste material, que era muito friável, pois as etapas como serragem e retificação arrancavam lascas da rocha, e podendo também causar microfraturas de modo que interferisse no seus resultado.



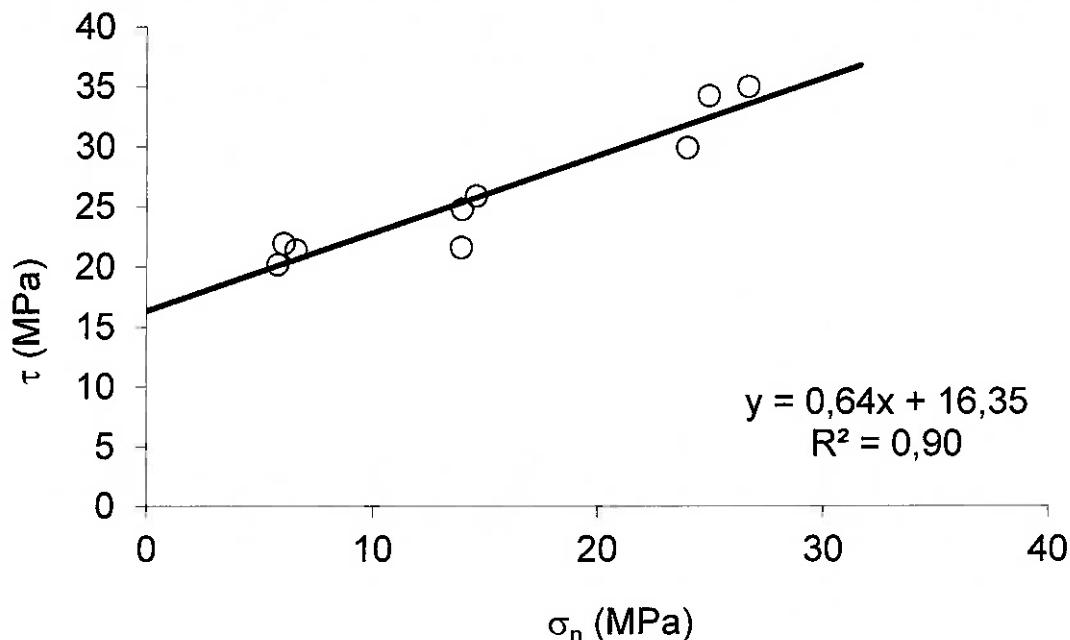
**Figura 22 - Foto da amostra de mármore**

Mostraremos na tabela seguinte os resultados com o cisalhamento em direto:

$\sigma_n$ (MPa)	$\tau$ (MPa)
6,6	21,4
13,9	21,6
23,9	29,9
5,8	20,2
6,1	22,0
14,6	25,9
14,0	24,8
24,9	34,3
26,7	35,0

**Tabela 3 - Ensaio cisalhamento direto mármore**

E obtendo a seguinte regressão linear:



**Gráfico 4** - Regressão linear cisalhamento direto em mármore

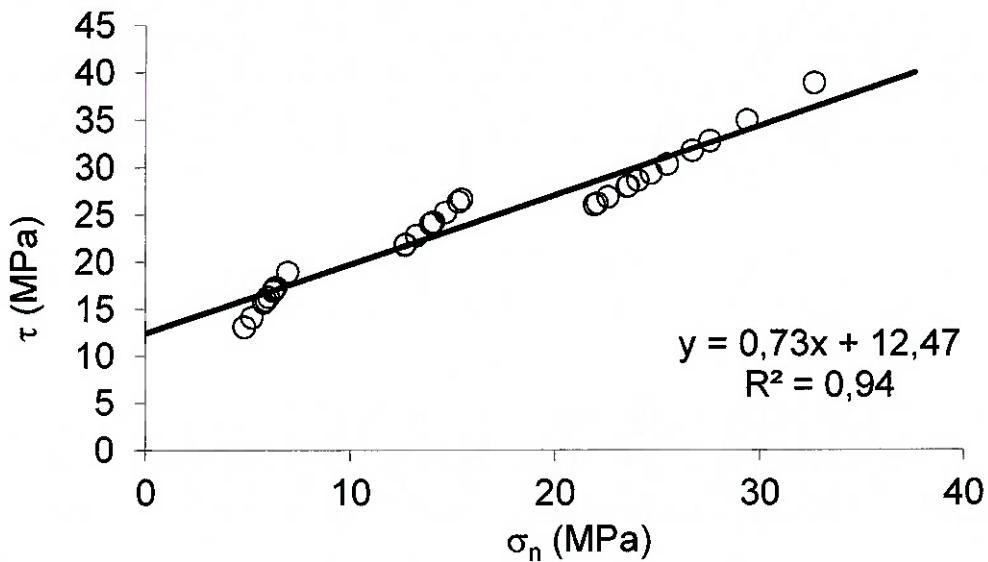
Agora os resultados com o Protodiakonov, "cunhas inclinadas"

$\sigma_n$ (MPa)	$\tau$ (MPa)
6,3	17,4
5,8	16,0
6,2	17,0
4,8	13,1
6,2	17,2
5,7	15,7
5,9	16,3
6,2	17,0
6,9	19,0
5,2	14,2
15,2	26,4
13,9	24,1
13,2	22,8
14,6	25,3
15,4	26,7

$\sigma_n$	$\tau$
13,9	24,0
14,0	24,3
13,9	24,1
12,6	21,8
12,6	21,9
32,6	38,9
23,6	28,1
24,0	28,6
23,5	28,0
24,7	29,4
27,5	32,8
25,5	30,4
22,6	26,9
22,0	26,3
21,9	26,1
26,7	31,8
29,3	35,0

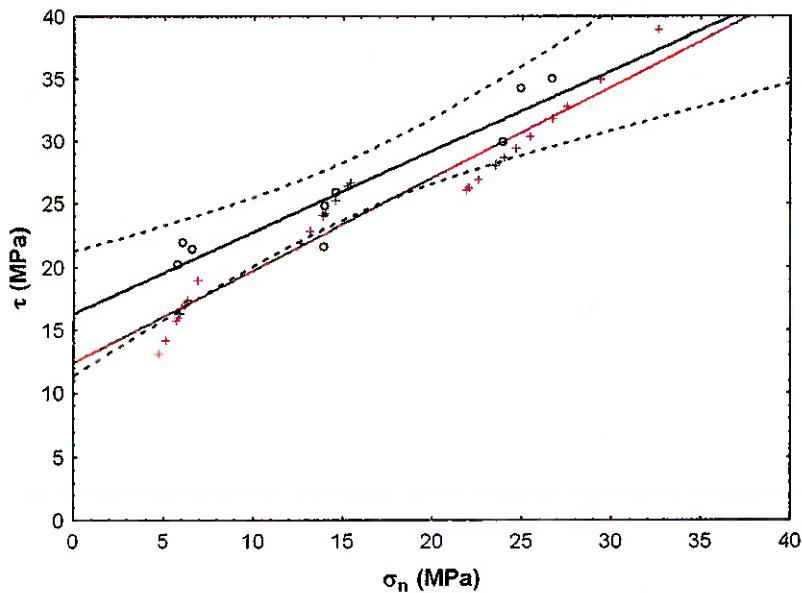
**Tabela 4** - Ensaio Protodiakonov modificado em mármore

Obtendo a seguinte regressão linear:



**Gráfico 5** - Regressão linear do Protodiakonov modificado mármore

Finalizando comparando as 2 regressões lineares com um intervalo de confiança de 99%, sendo a reta preta o ensaio direto e a reta vermelha o Protodiakonov modificado, cunhas inclinadas.



**Gráfico 6** – Comparaçao de ensaios em mármore

#### 4.3. Preto Piracaia

Preto Piracaia é um granito escuro brasileiro, vindo do município de Piracaia, SP.

Material extremamente resistente, tendo diversos problemas para romper, algumas vezes ultrapassando os limites das máquinas, assim invalidando muitas amostras para análise.

Infelizmente não se dispunha de muito material para análise, não podendo refazer o ensaio por causa alguns problemas encontrados.



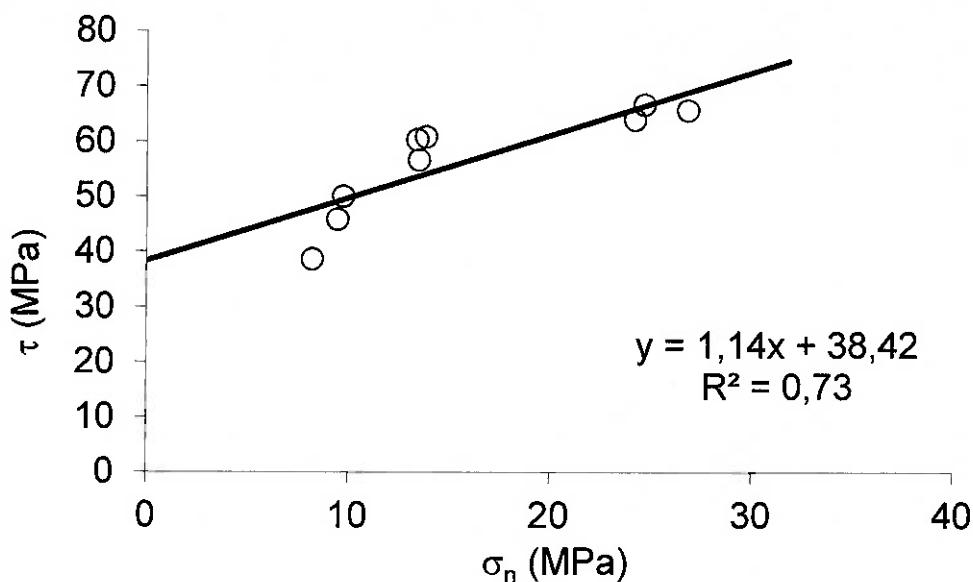
**Figura 23 - Preto Piracaia molhado**

Na tabela seguinte temos os valores do ensaio de cisalhamento direto:

$\sigma_n$ (MPa)	$\tau$ (MPa)
8,2	38,8
9,5	46,0
9,8	50,1
13,8	60,9
13,5	56,8
13,4	60,4
24,7	66,8
24,2	64,1
26,8	65,8

**Tabela 5 - Ensaio de cisalhamento direto em preto piracaia.**

E obtendo a seguinte regressão linear desse valores:



**Gráfico 7** - Regressão linear cisalhamento direto em preto piracaia

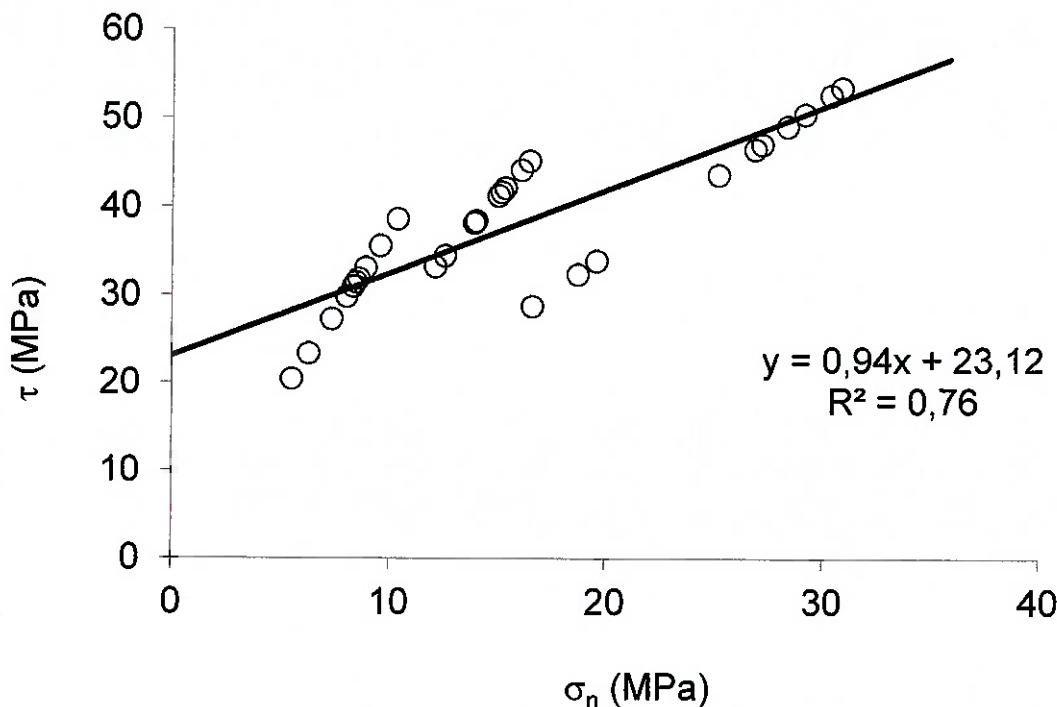
Agora os resultados do Protodiakonov modificado, "cunhas inclinadas"

$\sigma_n$ (MPa)	$\tau$ (MPa)
9,5	35,6
8,4	31,5
10,3	38,6
8,0	29,9
5,5	20,5
8,6	31,9
6,3	23,4
8,3	31,0
8,9	33,1
7,3	27,3
13,9	38,2
16,4	45,2
15,3	42,1
15,0	41,3
12,6	34,5

$\sigma_n$ (MPa)	$\tau$ (MPa)
15,3	42,1
15,2	41,7
12,1	33,3
16,1	44,2
14,0	38,4
30,4	52,6
26,8	46,5
30,4	52,6
25,2	43,6
19,6	33,9
16,6	28,8
18,7	32,4
29,1	50,5
28,3	49,1
30,9	53,5
27,2	47,1

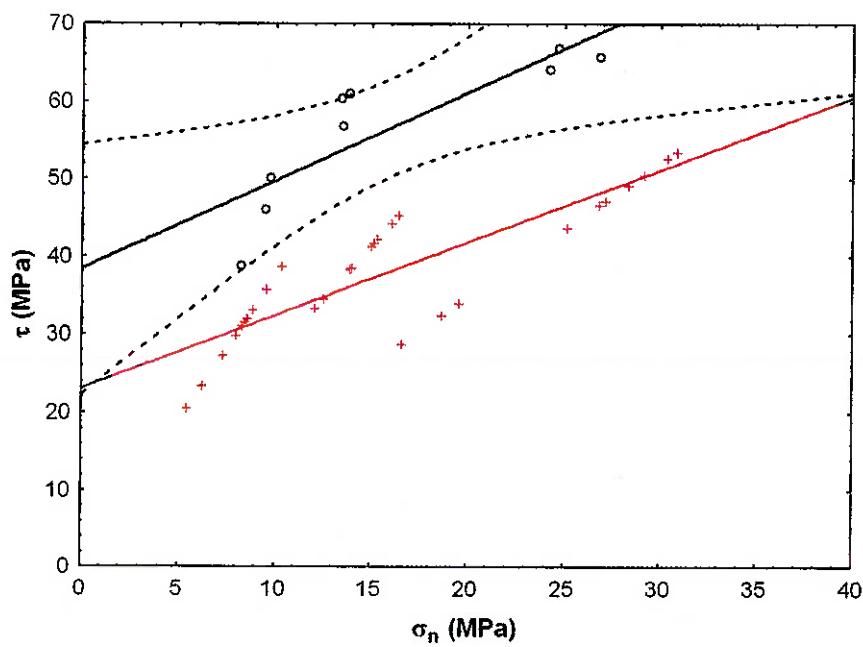
**Tabela 6** - Ensaio Protodiakonov modificado em preto piracaia

Fazendo sua regressão linear obtemos:



**Gráfico 8** - Regressão linear de Protodiakonov modificado em preto piracaia

Finalizando comparando as 2 regressões lineares com um intervalo de confiança de 99%, sendo a reta preta o ensaio direto e a reta vermelha o Protodiakonov modificado, cunhas inclinadas.



**Gráfico 9** – Comparação de ensaios em preto piracaia

#### 4.4. Itabirito:

O itabirito é uma rocha metamórfica química ou vulcanoquímica finamente estratificada que é um importante minério de ferro (tem seu teor de ferro entre 50% e 55%).

É composta quimicamente por sílica e ferro, com uma estrutura bandada alternadamente por silicatos (geralmente quartzo) e óxidos de ferro como a hematita (magnetita).

Era um material disponível, com boa quantidade no LMR, e fácil de trabalhar, de forma geral não se encontrou nenhum problema com essa amostra.



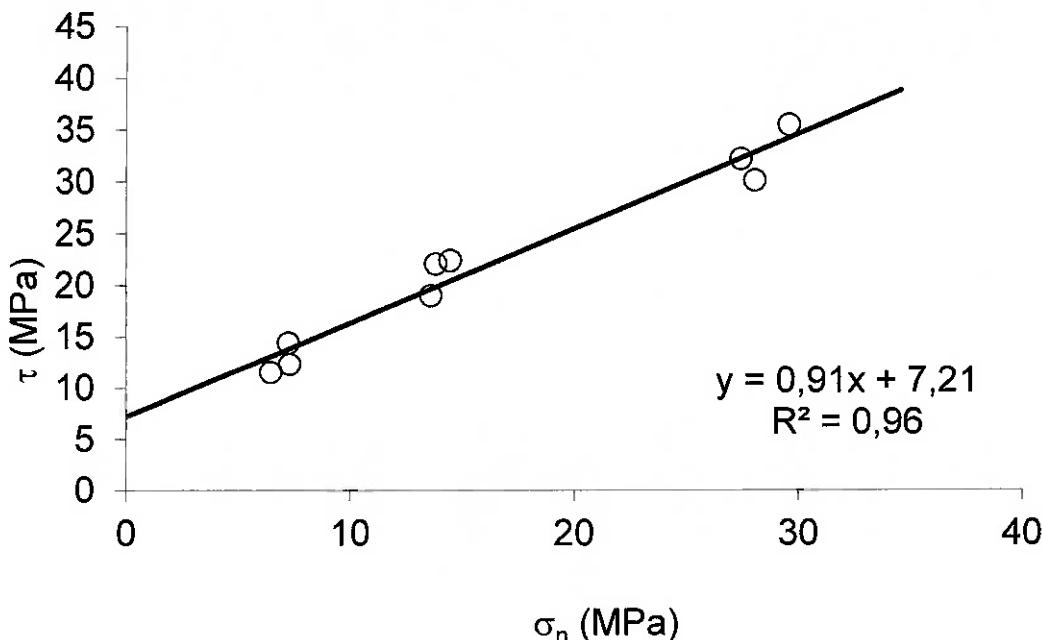
**Figura 24 - Cubo de Itabirito**

Na tabela seguinte os valores do cisalhamento direto.

$\sigma_n$ (MPa)	$\tau$ (MPa)
6,5	11,6
7,2	14,5
7,3	12,4
13,6	19,1
13,8	22,1
14,5	22,4
27,4	32,2
28,1	30,2
29,6	35,5

**Tabela 7 - Ensaio cisalhamento direto em Itabirito**

Obtendo a seguinte regressão linear



Agora os resultados do ensaio Protodiakonov modificado, "cunhas inclinadas"

$\sigma_n$ (MPa)	$\tau$ (MPa)
2,3	6,2
2,3	6,3
8,3	22,7
5,7	15,5
8,4	23,2
3,5	9,7
8,7	23,9
5,8	16,0
5,7	15,7
5,6	15,4
13,7	23,7
21,1	36,5
17,2	29,8
13,4	23,1
27,5	32,5
27,5	30,5
29,5	35,5

$\sigma_n$	$\tau$
10,7	18,6
12,7	22,1
22,8	39,5
12,5	21,7
18,5	32,1
13,4	23,2
38,1	45,4
32,7	38,9
38,7	46,1
55,6	66,3
30,5	36,4
37,2	44,3
29,4	35,0
31,7	37,8
42,4	50,5
39,2	46,7

Tabela 8 - Valores do ensaio Protodiakonov modificado Itabirito

Assim obtemos a seguinte regressão linear

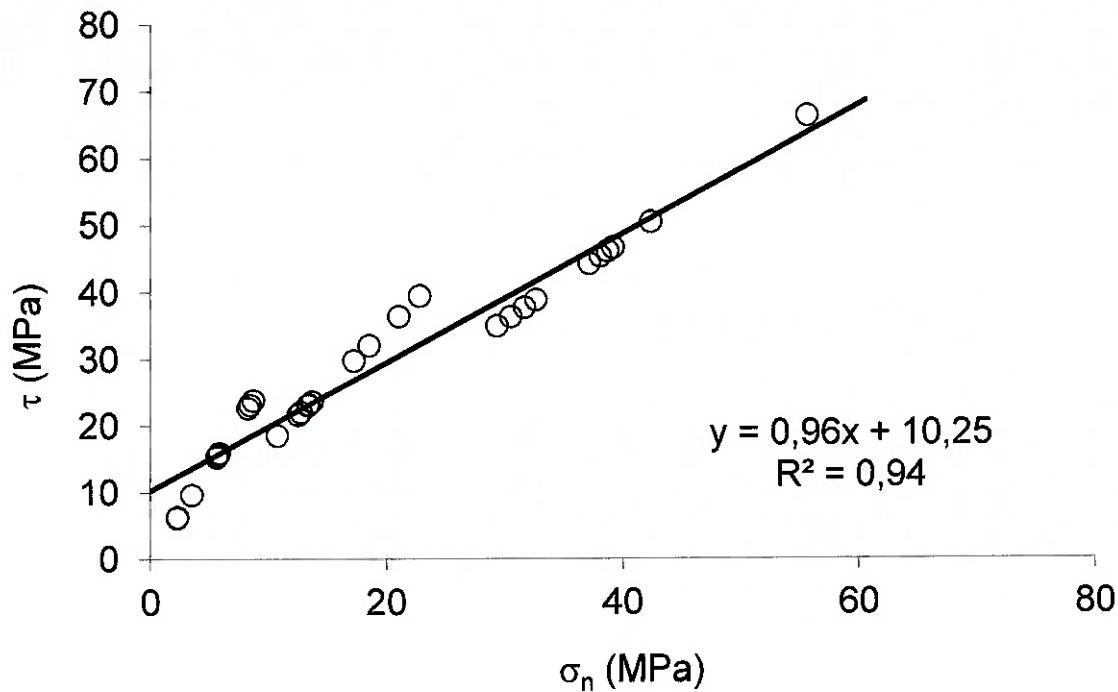


Gráfico 11 - Regressão linear ensaio Protodiakonov modificado em Itabirito

Finalizando comparando as 2 regressões lineares com um intervalo de confiança de 99%, sendo a reta preta o ensaio direto e a reta vermelha o Protodiakonov modificado, cunhas inclinadas.

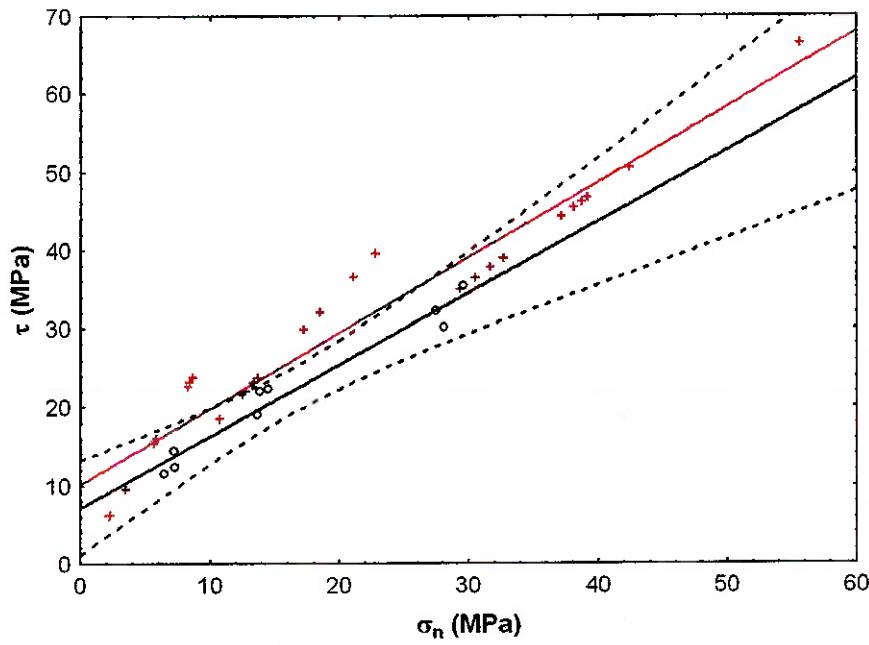


Grafico 12 – Comparaçāo de ensaios em Itabirito

#### 4.5. Conclusões

A comparação dos dois métodos de ensaio foi feita através da regressão linear dos dois ensaios, utilizando todos os valores encontrados para a análise. Nessa comparação utilizamos um intervalo de confiança de 99% em base do cisalhamento direto, este método realizado segundo as normas da ISRM (1981).

Foram utilizadas 9 amostras para cisalhamento direto, sendo 3 para cada referência de cada ângulo do ensaio das cunhas inclinadas, isso observado nos valores obtidos e das regressões lineares.

Estabelecido que a quantidade mínima de amostras para o ensaio de cunhas inclinadas é de 30 amostras, 10 para cada ângulo, já garantem uma aproximação adequada da envoltória de ruptura.

Foram realizados os 4 ensaios, seguindo todas as normas técnicas para tal obtivemos seus resultados, e no caso das cunhas inclinadas aplicada toda a seqüência de preparação de amostras proposta neste trabalho, sendo um único ponto de discussão a necessidade da retifica para o ensaio das cunhas inclinadas (Protodiakov). De forma geral foi satisfatório toda a experiência, analisando as informações obtidas nos ensaios se nota que dos 4 ensaios realizados 3 obtiveram resultados aceitáveis, ou seja dentro do intervalo de confiança estabelecido, de 99%.

Mas vale destacar que ainda o ensaio sozinho não pode ser utilizado com total confiança e usado exclusivamente para garantir a segurança de um projeto de engenharia, e sim utilizado em conjunto com outros ensaios como compressão uniaxial, compressão triaxial e tração para garantir uma análise com um alto grau de confiança e segurança para um projeto de engenharia.

## 5. Conclusão

Os objetivos que foram propostos no inicio deste trabalho foram atingidos, e expostos ao longo de toda esta documentação, apesar de seu bom resultado, vemos que é necessário um maior numero de pesquisas para maior conhecimento sobre o assunto, uma melhor aproximação de seus resultados, que influencia toda a engenharia de rochas.

Esta experiência que tive durante todo o desenvolvimento foi extremamente gratificante, sendo possível a visualização prática de vários pontos da mecânica de rochas que antes foram apenas vistos em aulas, além de perceber como existe espaço para o desenvolvimento da área. Graças a esse projeto, que fez me interessar cada vez mais pela mecânica de rochas, contribuiu para minha formação acadêmica e a formação de engenheiro.

## Bibliografia

- AMADEI, B.; STEPHANSSON, O. Rock Stress and its Measurement. London: Chapman & Hall, 1997.
- ANDREEV, G. E.. Brittle Failure Rock Materials. Washington, DC: Taylor & Francis, 1995.
- BELL, F. G. Engineering Properties of Soil and Rocks. Cambridge, MA: Blackwell Publishers, 2000.
- BRADY, B. H. G.; BROWN, E. T. Rock Mechanics. New York: Springer, 2004.
- GOODMAN, R. E. Introduction to Rock Mechanics. New York, NY: Wiley, 1990.
- HOEK, E. Support of Underground Excavations in Hard Rock. Rotterdam: A.A. Balkema, 1997.
- HOEK , E. The application of Modern Techniques to Underground Design, São Paulo: Kochem & Cella, 1998.
- HUDSON, J. A. Engineering Rock Mechanics. UK: Elsevier Science, 1997.
- INDRARATNA, B. Shear Behaviour of Rock Joints. Washington, DC: Taylor & Francis, 2000.
- ISRM (2007).International Society for Rock Mechanics (ISRM). The Complete suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 1974-2006. ISRM Commission on Testing Methods –“Suggested Method for Determining the Uniaxial Compressive Strength and Deformability of Rock Materials” e “Suggested Method for Determining the Strength of Rock Materials in Triaxial Compression: Revised Version” (ISRM, 1983, 2007).
- MAH, C. Rock Slope Engineering: Civil and Mining. Washington, DC: Taylor & Francis, 2004.
- PARRY, R. H. Mohr Circles, Stress Paths and Geotechnics. Washington, DC: Taylor & Francis, 1995.
- PENG, S.; ZHANG, J. Engineering Geology for Underground Rocks. New York: Springer, 2007.