

# O ENSAIO CILÍNDRICO OCO E SUAS POTENCIALIDADES EM GEOTECNIA

## THE HOLLOW CYLINDRICAL TEST AND ITS GEOTECHNICAL APPLICATIONS

Dinis da Gama, C., *Centro de Geotecnia do IST, Lisboa, Portugal, dgama@ist.utl.pt*  
Reis e Sousa, M., *Centro de Geotecnia do IST, Lisboa, Portugal, reis.sousa@mail.ist.utl.pt*  
Barroso, F., *Centro de Geotecnia do IST, Lisboa, Portugal, E-mail: pcm4028@mail.ist.utl.pt*

### RESUMO

As resistências ao corte das rochas são determinadas, geralmente, por meio de ensaios de corte directo ou compressão triaxial. Porém, estes métodos de ensaio nem sempre reproduzem o estado de tensão em que se encontra a rocha no interior do maciço, não obstante de no convencional ensaio triaxial serem transmitidas tensões ao provete de ensaio segundo três eixos triortogonais, duas delas são numericamente iguais, pois trata-se da pressão lateral ou de confinamento. Neste trabalho descreve-se um equipamento destinado ao ensaio cilíndrico oco, que permite aplicar com facilidade três tensões com valores diferentes, criando um estado de tensão verdadeiramente triaxial, apresentam-se os resultados obtidos e tiram-se conclusões.

### ABSTRACT

The shear strength of rocks is commonly measured by direct shear tests, as well as triaxial compression tests. However, these experiments do not represent the states of stress that exist in most rock masses, because in the conventional triaxial compression the confining pressure is constant in all directions and therefore, only a particular triaxial state is created. In this article, a description of the hollow cylinder test is presented, which allows the application of stresses along three directions, thus inducing true 3-D states of stress in the rock sample. Results obtained with this technique are shown and further applications are suggested.

### 1. INTRODUÇÃO

Por meio de ensaios de corte directo e de ensaios triaxiais procura-se sujeitar as rochas em que estão fundadas certas estruturas subterrâneas a condições próximas daquelas em que se encontram no interior dos maciços rochosos. Porém, em muitos casos, a rocha está sujeita a verdadeiros estados triaxiais, ou seja, a tensões principais máximas, mínimas e intermédias e, como é sabido, nem mesmo no ensaio triaxial convencional podem ser reproduzidas tais solicitações pois, neste ensaio transmitem-se tensões ao provete segundo três eixos triortogonais,  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  e  $\sigma_z$ , mas os valores de duas delas ( $\sigma_x$  e  $\sigma_y$ ) são numericamente iguais, tratando-se da pressão lateral de confinamento.

O ensaio que permite reproduzir as diversas solicitações a que pode estar sujeita a rocha no interior do maciço rochoso (estado triaxial puro), é o ensaio do cilindro oco. Não obstante, as grandes potencialidades do ensaio do cilindro oco para o estudo da deformação e rotura da rocha quando sujeita a elevadas pressões de confinamento, este método de ensaio tem sido pouco utilizado por a preparação do provete ser de aplicação difícil e morosa.

## 2. EQUIPAMENTO E ENSAIOS

O ensaio do cilindro oco, no qual podem ser aplicadas três tensões com valores diferentes entre si, pressão axial,  $p_a$ , pressão lateral ou externa,  $p_e$ , e pressão interna,  $p_i$ , (Figura 1), relativamente ao tradicional ensaio triaxial, tem a diferença de transmitir pressão na parede do furo coaxial previamente aberto no provete (Figura 2). Para isso, além da prensa que transmite a força axial, existem dois sistemas distintos de transmissão de pressão; um, que transmite a pressão externa (lateral) e o outro, que transmite a pressão interna.

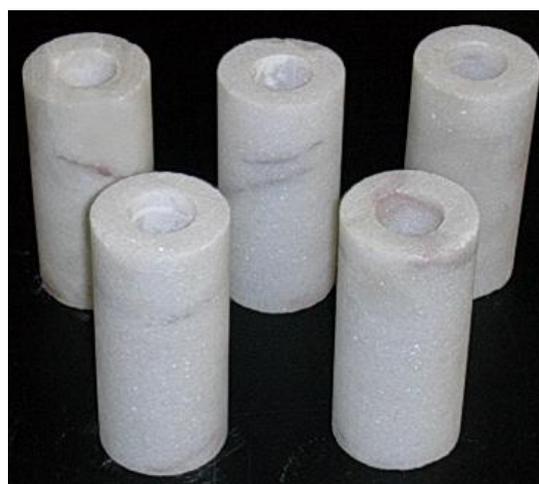
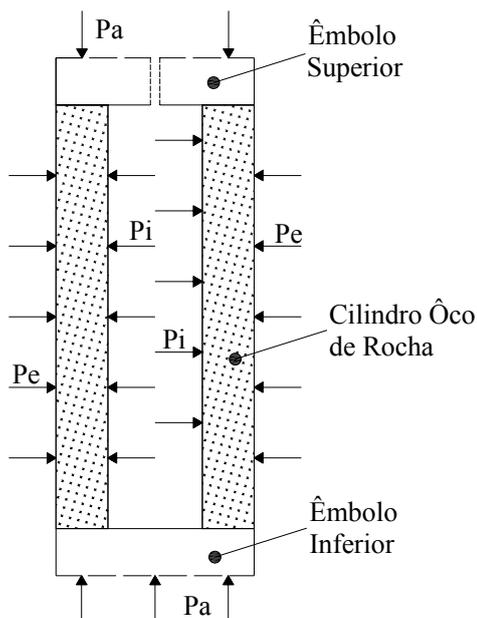


Figura 1 – Esquema de aplicação de pressões. Figura 2 – Provetes para ensaio (mármore).

Não obstante existirem alguns trabalhos publicados sobre o ensaio do cilindro oco e de em alguns desses trabalhos ser descrito o equipamento e metodologia do ensaio, tal método tem sido muito pouco aplicado, dada a dificuldade na aplicação da pressão interna e no impedimento do contacto directo do fluido transmissor dessa pressão com a parede do furo.

Sendo o ensaio cilíndrico oco o único método que permite reproduzir o estado de tensão a que se encontra sujeita a rocha a grandes profundidades no interior dos maciços, e daí o seu grande interesse técnico-científico, procurou-se um equipamento que fosse, simultaneamente, funcional e de fácil aplicação. Relativamente ao equipamento do tradicional ensaio triaxial, o equipamento agora utilizado apresenta como alteração significativa o dispositivo que permite transmitir a pressão à parede do furo axial previamente aberto no provete de ensaio. Assim, no êmbolo superior da câmara triaxial, foi aberto um pequeno furo através do qual é bombeado e conduzido o óleo para a membrana plástica que contacta com a parede do furo do cilindro oco e lhe transmite a pressão interna (Figura 3).

Os extremos da membrana plástica são solidarizados com os topos planos dos êmbolos da câmara triaxial em encaixes especiais impedindo-se, assim, qualquer saída de óleo do interior da membrana. Este método permite aplicar pressões internas até 15 MPa. Na Figura 4 podem ver-se as diferentes partes do equipamento de aplicação de pressões laterais e internas e na Figura 5

mostra-se a câmara instalada na prensa de ensaio e ligada aos sistemas de transmissão de pressão externa e de pressão interna.



Figura 3 – Sistema de pressão interna



Figura 4 – Câmara triaxial e provete montado



Figura 5 – Câmara triaxial, com provete em ensaio

Os provetes ensaiados foram preparados por meio de caroteadora e serra de disco diamantado, de forma a que, quer o diâmetro externo quer a altura fossem compatíveis com a câmara triaxial a utilizar (respectivamente 42 e 90 mm) e que o furo central que forma o cilindro oco, fosse coaxial com o próprio provete e tivesse o diâmetro de 20 mm.

Foram realizados ensaios sobre provetes de mármore, de textura muito fina, sacaróide e cristalina e sobre provetes de calcário oolítico, de textura fina e sacaróide. Os provetes de cada um dos tipos de rocha foram sujeitos a diversas combinações de pressão axial,  $p_a$ , pressão lateral ou externa,  $p_e$ , e pressão interna,  $p_i$ , as quais levaram as rochas à rotura. Aquelas combinações de pressões foram designadas por condições de ensaio, consoante a relação entre as mesmas. Na Tabela 1 indicam-se, para cada tipo de rocha, essas condições de ensaio, o número de provetes ensaiados em cada situação, bem como as pressões aplicadas a cada provete e que motivaram a rotura.

Tabela 1 – Pressões aplicadas aos provetes ensaiados e que conduziram à rotura da rocha

Tipo de rocha	Condição do ensaio	Provetes ensaiados	Pressões aplicadas (MPa)		
			Axial ( $p_a$ )	Externa ( $p_e$ )	Interna ( $p_i$ )
Mármore cristalino	A	5	58,8*	0,0	0,0
	B	2	0,0	0,0	4,0
			0,0	0,0	4,5
	C	2	28,8	0,0	2,0
			8,2	0,0	4,0
	D	4	71,0	3,0	1,5
			85,5	6,0	2,5
			100,6	10,0	4,0
			107,4	12,0	6,0
	E	4	60,7	2,0	3,0
			69,9	5,0	5,5
			73,5	4,0	6,0
77,7			6,0	8,0	
Calcário oolítico	A	6	45,4**	0,0	0,0
	B	2	0,0	0,0	5,9
			0,0	0,0	6,0
	C	2	14,0	0,0	3,0
			17,6	0,0	3,0
	D	3	79,0	5,0	2,5
			98,4	6,0	4,0
			96,2	13,0	10,0
	E	1	49,5	4,0	8,0

\* - Valor médio de cinco provetes, com coeficiente de variação de 4,6 %

\*\* - Valor médio de seis provetes, com coeficiente de variação de 8,9 %

### 3. RESULTADOS OBTIDOS NA EXPERIMENTAÇÃO

Conhecidos os valores das pressões  $p_a$ ,  $p_e$  e  $p_i$  transmitidas ao provete no momento da rotura (Tabela 1) e os raios exterior,  $r_e$ , e interior,  $r_i$ , do cilindro oco (21 e 10 mm, respectivamente), calcularam-se as tensões principais.

Em qualquer ponto do interior do provete, a uma distância,  $r$ , do eixo do provete (com  $r_i \leq r \leq r_e$ ), a tensão radial e a tensão angular são dadas, respectivamente, por:

$$\sigma_r = \frac{p_e r_e^2 - p_i r_i^2}{r_e^2 - r_i^2} - \frac{1}{r^2} \frac{(p_e - p_i) r_i^2 r_e^2}{r_e^2 - r_i^2} \quad (\text{Equação 1})$$

$$\sigma_\theta = \frac{p_e r_e^2 - p_i r_i^2}{r_e^2 - r_i^2} + \frac{1}{r^2} \frac{(p_e - p_i) r_i^2 r_e^2}{r_e^2 - r_i^2} \quad (\text{Equação 2})$$

Uma vez que são nulas as tensões tangenciais segundo aquelas duas direcções ( $r$  e  $\theta$ ),  $\sigma_r$  e  $\sigma_\theta$  são duas das tensões principais.

A terceira tensão principal é a tensão axial  $\sigma_z = p_a$ .

Considerando que as tensões máximas de tracção e de corte ocorrem na superfície interna do cilindro oco, assume-se que, em todos os casos, o processo de rotura se inicia naquela superfície; assim, será  $r = r_i$  (1). Tal suposição é confirmada por dados experimentais, como por exemplo pelos elementos finitos.

Sendo  $r = r_i$ , as expressões atrás apresentadas para o cálculo das tensões principais ( $\sigma_r$  e  $\sigma_\theta$ ) são simplificadas. Na Tabela 2 constam as expressões simplificadas que, consoante a condição do ensaio, permitem uma forma simples de cálculo daquelas tensões.

Tabela 2 – Expressões para cálculo das tensões principais.

Condição do ensaio	Pressões aplicadas	Tensões principais ( $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ )		
		$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_3$
A	$P_a > 0$ $p_e = p_i = 0$	$P_a$	0	0
B	$p_i > 0$ $p_a = p_e = 0$	$p_i$	0	$-\frac{p_i(r_e^2 + r_i^2)}{r_e^2 - r_i^2}$
C	$p_a > p_i > 0$ $P_e = 0$	$P_a$	$p_i$	$-\frac{p_i(r_e^2 + r_i^2)}{r_e^2 - r_i^2}$
D	$p_a > p_e > p_i > 0$	$P_a$	$\frac{2p_e r_e^2 - p_i(r_e^2 + r_i^2)}{r_e^2 - r_i^2}$	$P_i$
E	$p_a > p_i > p_e > 0$	$P_a$	$p_i$	$\frac{2p_e r_e^2 - p_i(r_e^2 + r_i^2)}{r_e^2 - r_i^2}$

A partir dos valores das pressões que motivaram a rotura de cada provete (Tabela 1), com base nas expressões constantes na Tabela 2, calcularam-se, para cada provete, as tensões principais actuantes no momento da rotura. Na Tabela 3 são apresentados os valores das tensões principais respeitantes aos provetes de mármore cristalino e na Tabela 4 apresentam-se os valores das tensões principais respeitantes aos provetes de calcário oolítico.

Calculados os valores das tensões principais que motivaram a rotura dos diferentes provetes de cada tipo de rocha, utilizando apenas os valores das tensões máximas e mínimas, determinou-se

a envolvente de Mohr e as características de corte correspondentes a cada tipo de rocha ensaiada. Nas Figura 6 e 7 são apresentados estes resultados.

Tabela 3 – Mármore cristalino – Pressões aplicadas e tensões principais

Condição do ensaio	Pressões aplicadas (MPa)			Tensões principais (MPa)		
	$p_a$	$p_e$	$p_i$	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_3$
A	58,8	0,0	0,0	58,8	0,0	0,0
B	0,0	0,0	4,0	4,0	0,0	-6,3
	0,0	0,0	4,5	4,5	0,0	-7,1
C	26,9	0,0	2,0	26,9	2,0	-3,2
	7,7	0,0	4,0	7,7	4,0	-6,4
D	71,0	3,0	1,5	71,0	5,4	1,5
	85,5	6,0	2,5	85,5	11,4	2,5
	100,6	10,0	4,0	100,6	19,5	4,0
	107,4	12,0	6,0	107,4	21,5	6,0
E	60,7	2,0	3,0	60,7	3,0	0,4
	69,9	5,0	5,5	69,9	5,5	4,2
	73,5	4,0	6,0	73,5	6,0	0,8
	77,7	6,0	8,0	77,7	8,0	2,8

Resistência à tracção por compressão diametral (média de 6 provetes): - 6,1 MPa

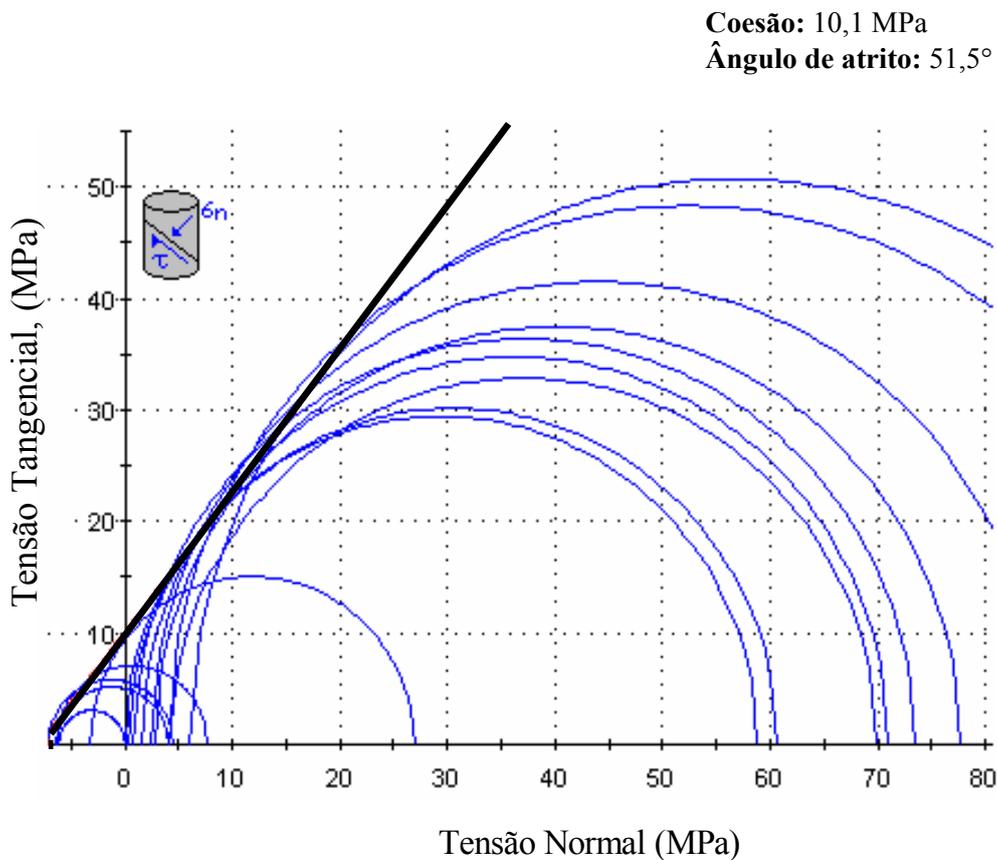


Figura 6 – Mármore cristalino – Envolvente de Mohr

Tabela 4 – Calcário oolítico – Pressões aplicadas e tensões principais

Condição do ensaio	Pressões aplicadas (MPa)			Tensões principais (MPa)		
	$p_a$	$p_e$	$p_i$	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_3$
A	45,4	0,0	0,0	45,4	0,0	0,0
B	0,0	0,0	5,9	5,9	0,0	-9,4
	0,0	0,0	6,9	6,0	0,0	-9,5
C	14,0	0,0	3,0	14,0	3,0	-4,8
	17,6	0,0	3,0	17,6	3,0	-4,8
D	79,0	5,0	2,5	79,0	9,0	2,5
	98,4	6,0	4,0	98,4	9,2	4,0
	96,2	13,0	10,0	96,2	17,8	10,0
E	49,5	4,0	8,0	49,5	8,0	-2,3

Resistência à tracção por compressão diametral (média de 5 provetes): - 5,6 MPa

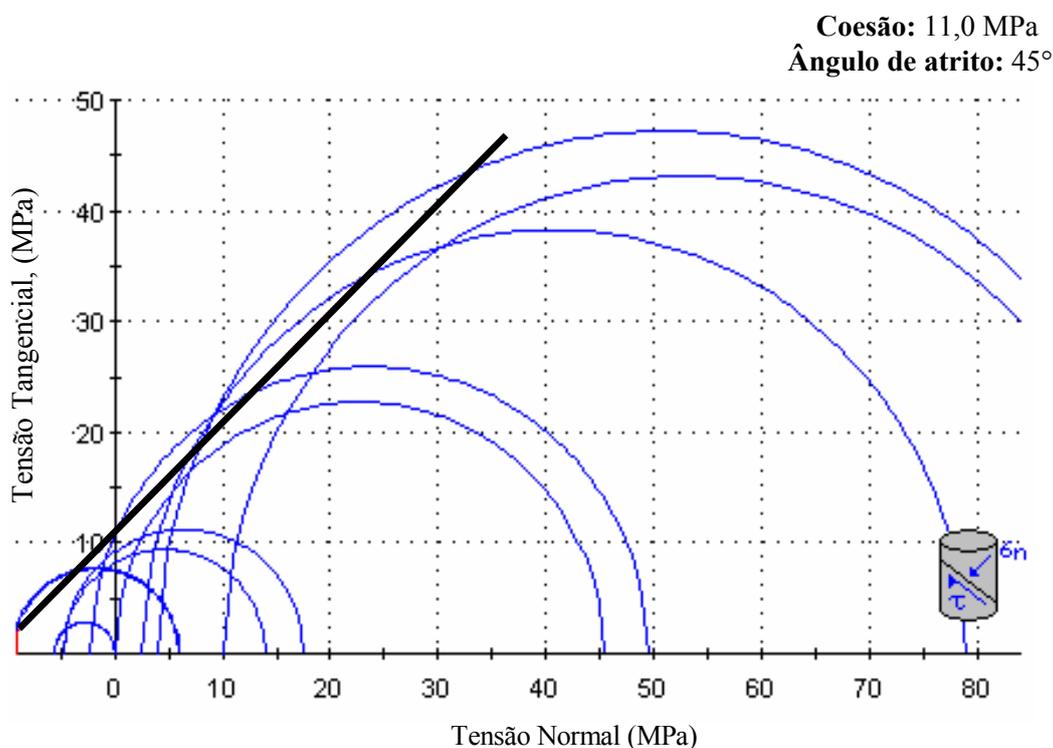


Figura 7 – Calcário oolítico – Envolvente de Mohr

#### 4. COMPARAÇÃO COM O ENSAIO TRIAXIAL

Para testar os resultados dos ensaios com o cilindro oco, foram submetidos ao tradicional ensaio triaxial ( $\sigma_2 = \sigma_3$ ) provetes sem furo coaxial dos dois tipos de rocha em estudo.

Os resultados obtidos nestes ensaios (Tabela 5), indicam que os valores definidores das características de corte (coesão e ângulo de atrito) são um pouco inferiores aos valores determinados nos ensaios sobre cilindros ocios. No mármore cristalino, de textura muito fina e sacaróide, a coesão apresenta idêntico valor e o ângulo de atrito apresenta um decréscimo de 6°;

no calcário oolítico, de textura fina, o ângulo de atrito apresenta idêntico valor e a coesão apresenta um decréscimo significativo (de 11,0 para 7,5 MPa). Tal facto indicia alguma influência do tipo de ensaio na obtenção dos valores característicos de corte, dependente, possivelmente, da textura da rocha ensaiada.

Tabela 5 – Resultados dos ensaios triaxiais convencionais (com  $\sigma_2 = \sigma_3$ )

Tipo de rocha	Provete N°	Tensões aplicadas (MPa)		Características de corte	
		$\sigma_1$	$\sigma_2 = \sigma_3$	Coesão (MPa)	Âng. de atrito
Mármore Cristalino	1	58,8	0,0	9,8	45,5°
	2	58,7	1,0		
	3	66,1	2,0		
	4	70,1	4,0		
	5	84,3	8,0		
Calcário oolítico	1	45,4	0,0	7,5	44,5°
	2	41,0	1,0		
	3	50,0	3,0		
	4	53,0	4,0		
	5	72,0	5,0		
	6	64,0	6,0		

Os resultados obtidos nos ensaios efectuados sobre os dois tipos de rocha (Tabelas 3 a 5 e Figura 2 e 3) mostram que:

- Existe uma forte influência da tensão principal intermédia na resistência à rotura. Isto é mais evidente nos ensaios respeitantes à condição D, em que a pressão externa é superior à pressão interna;
- Entre os diversos círculos de Mohr, correspondentes às tensões principais máximas e mínimas, e a tangente mais provável a esses mesmos círculos não se observam desvios muito significativos; aqueles desvios são menores no mármore cristalino do que no calcário oolítico;
- Existe uma certa diferença (embora não excessivamente acentuada) entre os valores determinados pelo ensaio do cilindro oco e os determinados pelo ensaio triaxial tradicional.

Para uma melhor compreensão dos tipos de rotura da rocha correspondentes a cada uma das cinco condições de ensaio do cilindro oco, nas Figuras 8 a 12 apresentam-se as fracturas típicas ocorridas nos provetes de mármore cristalino.



Figura 8 – Condição A (só  $p_a$ )



Figura 9 – Condição B (só  $p_i$ )



Figura 10 – Condição C (só  $p_a$  e  $p_i$ )



Figura 11 – Condição D ( $p_a > p_e > p_i > 0$ )



Figura 12 – Condição E ( $p_a > p_i > p_e > 0$ )

Pela observação das fracturas típicas nas diferentes condições impostas nos ensaios, verifica-se:

- Para a condição de ensaio A (apenas compressão axial), as roturas foram motivadas por forças de corte, variando os ângulos formados pelos planos de rotura e o eixo do provete entre 20 e 35°;
- Para os provetes da condição B, apenas pressão interna, os principais planos de rotura são diametraes, associados a algumas fracturas longitudinais;
- As fracturas dos provetes ensaiados sob a condição C (pressão axial e pressão interna) estão contidas em planos verticais, planos estes que contém o eixo do provete. Estas fracturas desenvolvem-se do raio interior para o raio exterior;
- No caso dos provetes submetidos à condição D ( $p_a > p_e > p_i$ ), devido a uma maior influência da pressão axial, as roturas voltam a ser motivadas por forças de corte, mas de forma menos pronunciada, dado o efeito da pressão externa. O ângulo entre o plano de rotura e o eixo do provete é da ordem de 25°;
- No caso dos provetes submetidos à condição E ( $p_a > p_i > p_e$ ), as superfícies de rotura são uma mistura das roturas da condição A com as roturas da condição B, visto que aquelas duas situações estão presentes neste ensaio, pelos efeitos dominantes das pressões axiais e internas.

## 5. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos permitem as seguintes conclusões de ordem geral:

- a) O equipamento de ensaio cilíndrico oco, descrito neste trabalho, é bastante eficiente e de fácil aplicação. O tempo necessário para a realização de um ensaio deste tipo é ligeiramente superior ao tempo de realização de um ensaio triaxial tradicional.
- b) São elevadas as potencialidades do ensaio cilíndrico oco (por ser verdadeiramente triaxial), quer no que respeita à possibilidade de reproduzir as condições de tensão a que estão submetidas as rochas no interior dos maciços, quer no que respeita à análise do tipo de rotura em função do estado de tensão triortogonal.
- c) Dada a fácil e expedita utilização do método de ensaio do cilindro oco, na determinação das características de corte das rochas, principalmente quando estas estão submetidas a tensões principais de valores bem distintos quando se situam a grandes profundidades, é aconselhável a utilização deste método.
- d) Os valores das características de corte das rochas determinados por meio do ensaio cilíndrico oco, permitem uma melhor avaliação da envolvente de rotura das rochas e, conseqüentemente, da sua verdadeira resistência “in situ”.

## 6. REFERÊNCIAS

- [1] Dinis da Gama, C. ; Menezes, J. (1974) The Hollow Cylinder Test in the Measurement of Mechanical Rock Properties. 2<sup>nd</sup> International Congress of the International Association of Engineering Geology.
- [2] Handin, J. ; Heard, H. C. and Magouirk, J. N. (1967) – Effects of the Intermediate Principal Stress on the Failure of Limestone, Dolomite and Glass at Different Temperatures and Strain Rates. Journal of Geophysical Research. Vol. 72, Pp. 611-640.
- [3] Rocha, M. (1981) – Mecânica das Rochas. Laboratório Nacional de Engenharia Civil – Lisboa.
- [4] Warnock, F. V. and Benham, P. P. (1967) – Mechanics of Solids and Strength of Materials. Pitman Paperbacks. London.
- [5] Hudson, J. A. and Harrison, J. P. (1997) – Engineering Rock Mechanics. Pergamon Press, Elsevier.
- [6] Sharma, V. M. and Saxena, K. R. (2002). In Situ Characterization of Rocks. A. A. Balkema Publishers, Lisse.