

**MÉTODO EXPEDITO PARA DETERMINAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS
DE CORTE DE ROCHAS E DE DESLIZAMENTO DE DIACLASES**

***A QUICK METHOD FOR DETERMINING THE SHEAR STRENGTH OF
ROCKS AND DISCONTINUITIES***

DINIS DA GAMA, CARLOS*
CARANHOLA PEREIRA, HUGO**
REIS E SOUSA, MANUEL***

RESUMO

No presente artigo é descrito um método expedito para a realização de ensaios para caracterização da resistência de rochas ao corte e da resistência de diaclases ao deslizamento, e apresentam-se os resultados obtidos com o mesmo. O método tem, relativamente ao método tradicional, a vantagem de possibilitar a realização de ensaios para determinação das características de corte de rochas e de deslizamento de diaclases, sem preparações especiais e morosas das amostras, e, ainda, a de utilizar um único sistema de aplicação de forças. Para além de reduzir o custo dos mesmos, permite a obtenção de resultados em curto espaço de tempo. A ensaios de corte, foram submetidas amostras constituídas por quatro tipos diferentes de rocha; a ensaios de deslizamento, foram submetidas quatro amostras contendo descontinuidades pertencentes a diferentes famílias de diaclasamento ocorrentes num maciço granítico. Conclui-se pela aplicabilidade desta técnica, face às vantagens operacionais que oferece e à boa qualidade dos resultados que produz, nomeadamente para a determinação de parâmetros de resistência ao corte de rochas e das suas envolventes de rotura.

ABSTRACT

A simple method for the determination of shear strength of rock materials and discontinuities is described, as well as the results obtained upon its utilization. The method shows several advantages with respect to the traditional technique of direct shear strength measurements, namely by requiring less time consuming sample preparation procedures, under a unique applied loading. Lower testing costs and shorter times to obtain the desired results are the main advantages. To prove the method capabilities, four rock types and four granitic rock joints were tested with success.

Therefore, the applicability of the method may be confirmed due to the good quality of results both for providing shear strength parameters and for establishing failure envelopes for rocks and discontinuities.

(* *Presidente do Centro de Geotecnia do Instituto Superior Técnico , dgama@ist.utl.pt*

(** *Investigador do Núcleo de Rochas, Centro de Geotecnia do IST, caranhola@ist.utl.pt*

(*** *Técnico Especialista do Núcleo de Rochas, Centro de Geotecnia do IST*

1. INTRODUÇÃO

O conhecimento das características mecânicas das rochas constituintes dos maciços rochosos sobre os quais são fundadas obras de grande porte é da maior importância para a avaliação das condições de segurança dessas mesmas obras. Para que os valores determinados em ensaio, como definidores daquelas características, sejam representativos da rocha que envolve toda a fundação da obra, é necessário que o número de amostras a ensaiar tenha em consideração, quer a dimensão da obra, quer as forças que a mesma transmite à fundação, quer, ainda, o tipo de rocha ou rochas ocorrentes. Na maioria dos casos, para uma suficiente caracterização da rocha de fundação da obra, é necessário proceder ao ensaio de apreciável número de amostras. Por isso, procura-se aplicar métodos de ensaio que, além de fiáveis, sejam expeditos, por forma a que o tempo para a realização do número de ensaios julgado necessário seja compatível com o prazo dado pelo projectista da obra, para a apresentação dos resultados dos ensaios.

Dos métodos usualmente seguidos para a determinação das diversas características mecânicas das rochas, o que respeita à determinação das características de corte de rochas e às características de deslizamento de diaclase será, certamente, um dos mais morosos e mais dispendiosos.

A técnica de ensaio de corte de rochas [1] e de deslizamento de diaclases [2], [4] habitualmente seguida consiste, fundamentalmente, na aplicação de forças normais e de forças tangenciais à esperada superfície de rotura, no caso de corte de rocha, ou às superfícies da diaclase, no caso de deslizamento. Essas forças são produzidas por dois sistemas independentes, instalados em adequada estrutura metálica rígida. Para a aplicação desta técnica, as amostras possuem forma prismática, de maneira a garantir uma distribuição uniforme das forças normais e tangenciais que lhes são transmitidas no ensaio. Nos casos em que as dimensões das amostras são suficientes, são talhados provetes prismáticos; nos casos em que são reduzidas as dimensões das amostras (uma grande parte), as mesmas são encabeçadas com argamassa de cimento. Estas operações são bastante trabalhosas e morosas e, no caso do encabeçamento, antes do ensaio, há que aguardar o tempo suficiente para o endurecimento (da ordem de 7 dias).

Pelas razões expostas, reconheceu-se ser de grande importância estudar um novo tipo de equipamento de ensaio que permitisse determinar as características de corte de rochas e as características de deslizamento de diaclases, de forma mais expedita e sem os inconvenientes mencionados.

2. DESCRIÇÃO DO NOVO EQUIPAMENTO DE ENSAIO

A maior parte das amostras fornecidas para a determinação das características de corte de rochas e para a determinação das características de deslizamento de diaclases têm a forma cilíndrica e são obtidas por meio de sondagem; as restantes amostras fornecidas para ensaio têm forma irregular (blocos). Desses blocos, é bastante fácil e pouco moroso preparar, em laboratório, amostras cilíndricas por meio de perfuradora rotativa.

O equipamento, de que é objecto este trabalho, foi estudado no sentido de permitir o ensaio de amostras cilíndricas de diferentes diâmetros, segundo técnica mais expedita do que a que é presentemente seguida. Para a aplicação desta técnica, a preparação das amostras para ensaio resume-se ao corte dos seus topos, por meio de serra de disco diamantado. Esta nova técnica de

ensaio, para além de reduzir, muito substancialmente, o tempo gasto em preparações, simplifica as operações do próprio ensaio, visto utilizar apenas um único sistema de aplicação de forças.

O equipamento de ensaio é constituído por três tipos diferentes de peças, construídas em aço duro e que são: peças que suportam os provetes cilíndricos e lhes transmitem as forças de ensaio, produzidas por uma prensa; peças que possibilitam a variação do ângulo entre a linha de acção da força a transmitir e a superfície a ensaiar; e peças que possibilitam a redução dos raios de curvatura das superfícies cilíndricas que alojam o provete de ensaio.

2.1 Peças de suporte do provete e de transmissão das forças

Estas peças, com concavidades cilíndricas, têm a dupla função de alojar o provete, naquelas concavidades e de lhe transmitir a força aplicada no ensaio. Esta força é transmitida aos topos e superfície lateral do provete, e a sua linha de acção forma com a esperada superfície de rotura, ou com as superfícies de deslizamento, um ângulo (α) previamente definido. Pela decomposição da força, F , que provoca a rotura do provete, ou o deslizamento das superfícies opostas da diaclase, determina-se a força normal, F_n , e a força tangencial, F_t , actuantes na superfície de rotura, ou na superfície de deslizamento.

Para a determinação das características de corte de rocha, segundo planos diametrais das amostras (planos longitudinais) e segundo planos transversais das mesmas [7], e, também, para a determinação das características de deslizamento de diaclases contidas nas amostras, seja qual for o valor do ângulo entre as suas superfícies e o eixo da amostra, o novo equipamento de ensaios é constituído por dois tipos distintos de sistemas de transmissão das forças de ensaio (Fig. 1 e 2). Os sistemas do tipo esquematizado na figura 1 são utilizados nos ensaios para determinação das características de corte de rocha segundo planos longitudinais do provete; os sistemas do tipo esquematizado na figura 2, são utilizados nos ensaios para determinação das características de corte de rocha segundo planos transversais do provete. Nos ensaios para determinação das características de deslizamento de diaclases, o tipo de sistema a utilizar será função do valor do ângulo entre o eixo da amostra e as superfícies da diaclase.

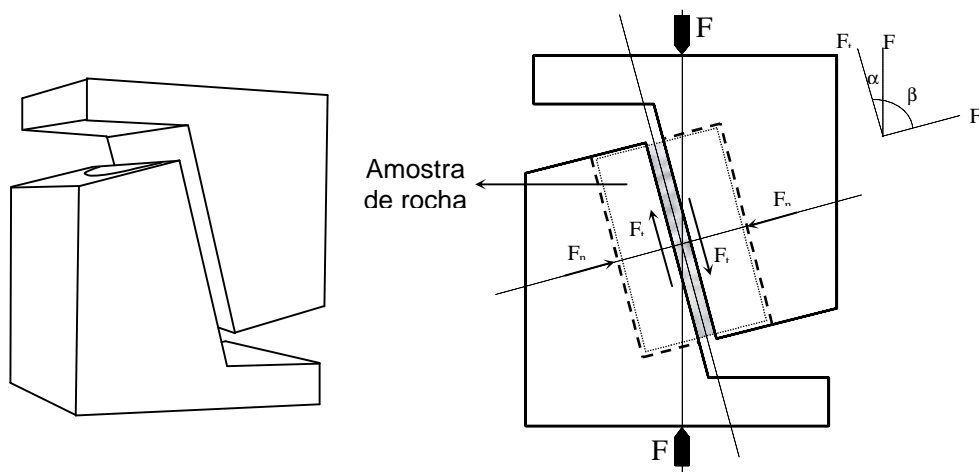


Figura 1 – Esquema do sistema de ensaio de corte directo, por plano longitudinal

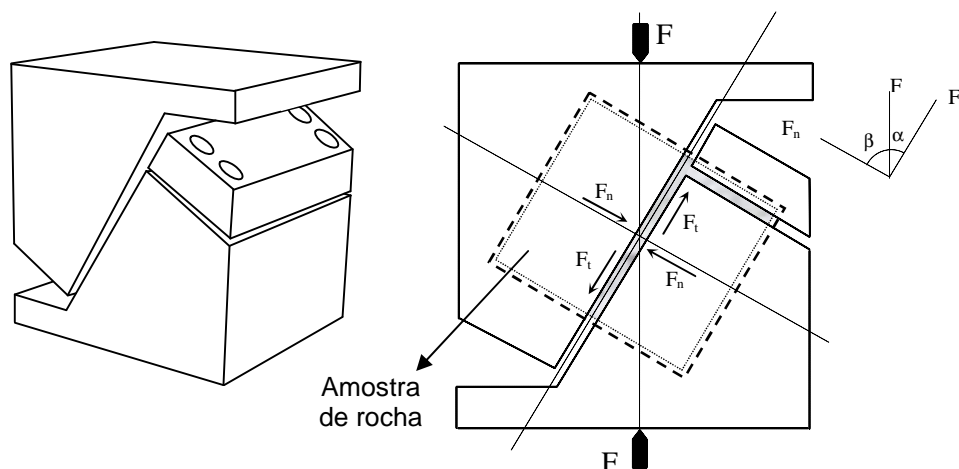


Figura 2 – Esquema do sistema de ensaio de corte directo por plano transversal

Em qualquer dos sistemas, entre as duas peças de transmissão das forças de ensaio ao provete, existe uma zona livre em toda a extensão da esperada superfície de rotura, ou das superfícies de deslizamento, sendo da ordem de 6mm o afastamento relativo daquelas peças.

A base inferior de suporte do provete para o ensaio segundo plano transversal (Fig. 2) é composta por duas partes, fixas por quatro parafusos. Por meio do aperto dos parafusos, obtém-se o ajuste das superfícies do provete às superfícies internas da base de suporte, eliminando-se, assim, eventuais momentos flectores.

2.2 Peças para variação angular

Como é sugerido pela ISRM, quer para a determinação das características de corte de qualquer tipo de rocha, quer para a determinação da resistência ao deslizamento de qualquer diaclase, o número mínimo de ensaios a realizar deverá ser de cinco e os valores das tensões normais que actuam sobre as superfícies em estudo, na altura da rotura ou do deslizamento, devem ser diferentes de ensaio para ensaio [5]. Tal é conseguido com dois sistemas de cada um dos tipos esquematizados nas figuras 1 e 2 (um com a inclinação de 15° e o outro com 30°) e por pares de cunhas de aço duro, que se encaixam nas bases de qualquer daqueles sistemas. Estas cunhas de aço possuem dois pernos que entram em furos existentes nos topos das peças de suporte do provete, podendo ser instaladas no sentido de aumentar ou de reduzir o valor do ângulo α .

O conjunto do equipamento anteriormente descrito, permite variar, de 0° a 45°, o ângulo formado pela linha de acção da força de ensaio com a superfície em estudo, sendo de 5° o valor de cada acréscimo, ou decréscimo, que pode ser introduzido naquele ângulo.

2.3 Peças de redução de diâmetro

As amostras de rocha obtidas por sondagem e que, com frequência, são submetidas a ensaios de corte ou de deslizamento, têm diâmetros da ordem de 52, 62, 72 e 82mm. Para que o equipamento que se vem descrevendo tenha aplicação prática para o ensaio das amostras

usualmente fornecidas é necessário que o mesmo comporte provetes com aqueles diferentes diâmetros.

A redução dos raios de curvatura (41mm) das concavidades cilíndricas das peças que alojam o provete é obtida por intermédio de meias canas de aço duro, com diferentes espessuras e raio de curvatura da parede exterior igual a 41mm. Introduzindo, nas referidas concavidades cilíndricas, meias canas com raio de curvatura interno equivalente ao raio do provete a ensaiar, o sistema torna-se apto para o ensaio. Nos sistemas para ensaio de provetes segundo planos transversais aos mesmos, são introduzidas duas meias canas em cada uma das peças de alojamento, e entre as meias canas deve existir uma folga da ordem de 2,5mm, para que as mesmas não absorvam parte da força de ensaio, assegurando-se, assim, que a mesma é integralmente transmitida ao provete.

Na figura 3 apresenta-se fotografia do ensaio, por plano longitudinal, de um provete de granito com 62mm de diâmetro e das diferentes peças do sistema de ensaio (cunhas e meias canas incluídas), com o provete depois da rotura.

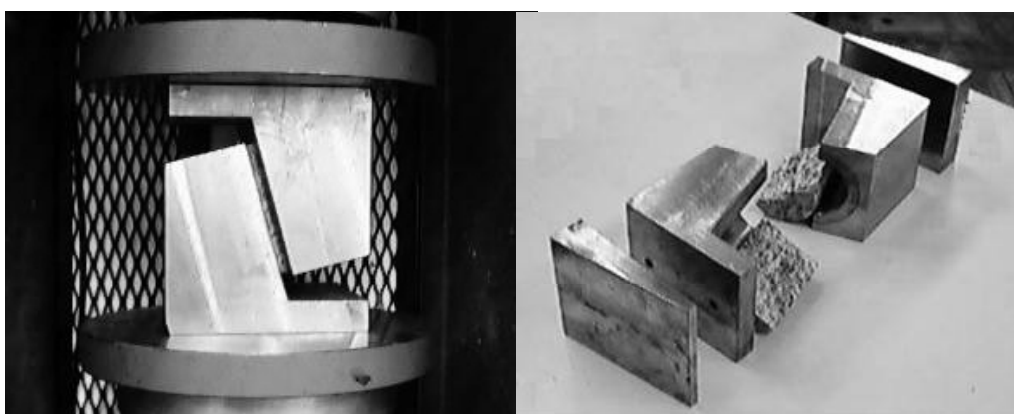


Figura 3 – Fotografia do ensaio, por plano longitudinal, de um provete de 62mm de diâmetro, antes e após rotura.

3. ENSAIOS EFECTUADOS E RESULTADOS OBTIDOS

3.1 Ensaio de corte

Foram ensaiados ao corte sete conjuntos de provetes de diferentes rochas. Quatro desses conjuntos de provetes foram ensaiados segundo planos longitudinais; os outros três conjuntos foram ensaiados segundo planos transversais. Os provetes ensaiados eram constituídos por três tipos de rocha granítica, com estados de alteração muito diversos, e por rocha calcária, e tinham diâmetros de 52, 62 e 82mm. Dos três tipos de rocha granítica ensaiada, um respeitava a granito porfiróide, levemente alterado (W1); outro respeitava a granito de grão médio, medianamente alterado (W3/2); e o restante, respeitava a granito de grão grosseiro, muito alterado (W4). Quanto à rocha calcária ensaiada, esta era formada por um calcário margoso, sem indícios de

alteração. Cada conjunto de rocha granítica foi constituído por quatro provetes, e cada conjunto de rocha calcária foi constituído por cinco provetes.

Os resultados obtidos nos ensaios de corte estão traduzidos no Quadro 1 e 2. O primeiro daqueles Quadros respeita aos ensaios segundo planos longitudinais dos provetes, o outro, respeita aos ensaios segundo planos transversais. Neles, para além do tipo de rocha ensaiada, da área de corte dos provetes e do ângulo formado pela linha de acção da força aplicada e a superfície de rotura, indicam-se os valores das forças que motivaram as roturas, os valores das tensões de corte (normais e tangenciais), os valores das características de corte (coesão e ângulo de atrito) e, ainda, os coeficientes de correlação entre os valores obtidos para cada conjunto de provetes e a recta mais provável àqueles valores. Os valores definidores das características de corte [3], bem como os dos coeficientes de correlação, foram determinados por meio de um método estatístico, método dos mínimos quadrados.

Quadro 1 - Ensaio de corte segundo plano longitudinal dos provetes

Tipo de rocha	Secção (cm ²)	Ângulo (α)	Força de rotura (kN)	Tensões (MPa)		Características de corte		Coef. de correlação
				Normal, σ	Tang., τ	c (MPa)	φ (°)	
Granito levemente alterado	51,4	10 ⁰	71,3	2,14	13,66	10,87	53 ⁰	0,999
		15 ⁰	91,3	4,60	17,16			
		20 ⁰	114,9	7,59	20,84			
		25 ⁰	153,7	12,64	27,10			
Granito c/média alteração	51,2	10 ⁰	29,7	1,01	5,71	5,34	60 ⁰	0,991
		15 ⁰	70,7	3,57	13,34			
		20 ⁰	84,6	5,65	15,33			
		25 ⁰	161,1	13,30	28,52			
Granito muito alterado	69,4	10 ⁰	6,6	0,17	0,94	0,91	62 ⁰	0,992
		15 ⁰	15,5	0,58	2,16			
		20 ⁰	26,9	1,33	3,64			
		25 ⁰	42,9	2,61	5,60			
Calcário margoso	45,9	5 ⁰	10,7	0,20	2,32	2,30	54 ⁰	0,991
		10 ⁰	15,4	0,58	3,30			
		15 ⁰	19,3	1,09	4,06			
		20 ⁰	21,6	1,61	4,42			
		25 ⁰	33,1	3,05	6,54			

(α) Ângulo entre a linha de acção da força aplicada e a superfície de corte

Na figura 4 representam-se, para um dos tipos de rocha ensaiada, os pontos de coordenadas (σ_i , τ_i) determinados nos ensaios de corte segundo planos longitudinais e planos transversais dos provetes e traçou-se, para cada caso, a recta de Coulomb mais provável.

Quadro 2 - Ensaio de corte segundo plano transversal dos provetes

Tipo de rocha	Secção (cm ²)	Ângulo (α)	Força de rotura (kN)	Tensões (MPa)		Características de corte		Coef. de correlação
				Normal, σ	Tang., τ	c (MPa)	φ (°)	
Granito levemente alterado	29,7	10 ⁰	44,0	2,57	14,59	11,79	53 ⁰	0,995
		15 ⁰	58,5	5,10	19,03			
		20 ⁰	77,6	8,94	24,55			
		25 ⁰	98,7	14,04	30,12			
Granito c/ média alteração	29,2	10 ⁰	24,6	1,46	8,30	5,95	56 ⁰	0,999
		15 ⁰	29,5	2,61	9,76			
		20 ⁰	38,1	4,46	12,26			
		25 ⁰	62,4	9,03	19,37			
Calcário margoso	22,9	5 ⁰	11,5	0,44	5,00	4,60	56 ⁰	0,991
		10 ⁰	14,6	1,11	6,28			
		15 ⁰	17,6	1,99	7,42			
		20 ⁰	27,8	4,15	11,41			
		25 ⁰	32,8	6,05	12,98			

(α) Ângulo entre a linha de acção da força aplicada e a superfície de corte

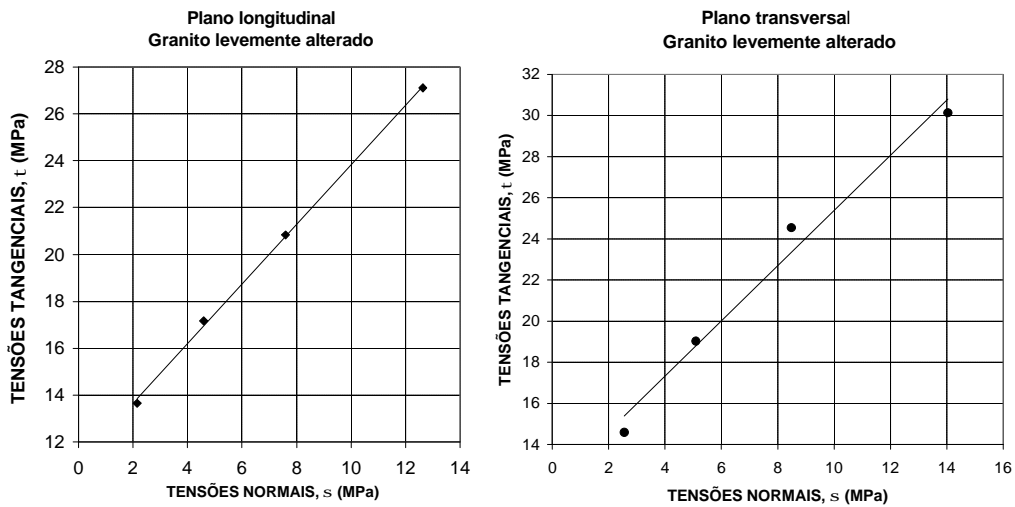


Figura 4 – Exemplos de diagramas tensões normais / tensões tangenciais, de ensaios segundo planos longitudinais e planos transversais dos provetes.

Nas Fotos da figura 5 apresentam-se aspectos das superfícies de rotura de alguns dos provetes em que foi imposta a superfície de corte por plano longitudinal e superfícies de rotura de alguns dos provetes em que foi imposta a superfície de corte por plano transversal.

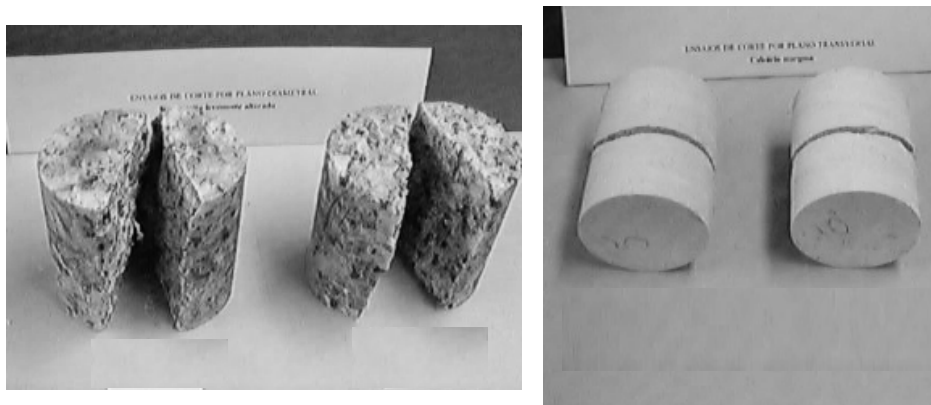


Figura 5 – Aspectos das superfícies de corte de alguns dos provetes ensaiados segundo planos longitudinais e segundo planos transversais.

3.2 Ensaio de deslizamento

Ao ensaio de deslizamento foram submetidas quatro amostras de rocha granítica que continham diaclases sem qualquer preenchimento, pertencentes a três famílias diferentes de diaclasamento. Uma das famílias de diaclases era sub-vertical (V), outra inclinada (I), e a terceira sub-horizontal (H). As superfícies da diaclase pertencente à família V eram levemente onduladas, denteadas, com rugosidade média e ligeiramente alteradas; as das duas diaclases pertencentes à família I, eram onduladas, com rugosidade pouco acentuada e medianamente alteradas; as da diaclase pertencente à família H, eram levemente onduladas, muito rugosas e sem alteração aparente [6].

A amostra que continha a diaclase pertencente à família V foi submetida a cinco deslizamentos (fases do ensaio); as outras três amostras foram submetidas a quatro deslizamentos. O valor do ângulo (α) entre a linha de acção da força aplicada e as superfícies em ensaio, foi sendo aumentado, de deslizamento para deslizamento, e por ordem crescente. Terminada cada fase do ensaio, foram as superfícies da diaclase repostas na posição inicial, ou seja, na posição relativa que ocupavam no interior do maciço.

Os resultados obtidos nos ensaios de deslizamento de diaclases estão traduzidos no Quadro 3. Neste Quadro, para além da diaclase ensaiada, da área de deslizamento e do ângulo formado pela linha de acção da força aplicada e a superfície de deslizamento, indicam-se os valores máximos das forças registados nos deslizamentos, os valores das tensões de deslizamento (normais e tangenciais), os valores das características de deslizamento (coesão aparente e ângulo de atrito), e, ainda, os coeficientes de correlação entre os valores obtidos para cada diaclase e a recta mais provável àqueles valores. Os valores definidores das características de deslizamento, e os dos coeficientes de correlação, foram determinados pelo método mencionado nos ensaios de corte.

Na figura 6, representam-se, para uma das diaclases ensaiadas, os pontos de coordenadas (σ_i , τ_i) determinadas nas diferentes fases do ensaio da diaclase e traçou-se a recta de Coulomb mais provável.

Quadro 3 - Ensaios de deslizamento de diaclases

Diaclase	Secção (cm ²)	Ângulo (α)	Força de desliz. (kN)	Tensões (MPa)		Características de desliz.		Coef. de correlação
				Normal, σ	Tang. , τ	c (MPa)	φ (°)	
V	43,9	25 ⁰	0,282	0,03	0,06	0,04	44 ⁰	0,999
		30 ⁰	0,473	0,05	0,09			
		35 ⁰	0,600	0,08	0,11			
		40 ⁰	1,709	0,25	0,29			
		45 ⁰	9,127	1,47	1,47			
I (1)	66,5	34 ⁰	1,569	0,13	0,20	0,15	40 ⁰	0,999
		39 ⁰	3,540	0,34	0,41			
		44 ⁰	13,002	1,36	1,41			
		49 ⁰	38,842	4,41	3,83			
I (2)	62,9	35 ⁰	1,418	0,13	0,18	0,12	39 ⁰	0,994
		40 ⁰	2,582	0,26	0,31			
		45 ⁰	14,026	1,58	1,58			
		50 ⁰	22,298	2,72	2,28			
H	59,9	27 ⁰	0,236	0,02	0,04	0,03	47 ⁰	0,999
		32 ⁰	0,491	0,04	0,07			
		37 ⁰	1,818	0,18	0,24			
		42 ⁰	12,545	1,40	1,56			

(α) Ângulo entre a linha de acção da força aplicada e as superfícies de deslizamento

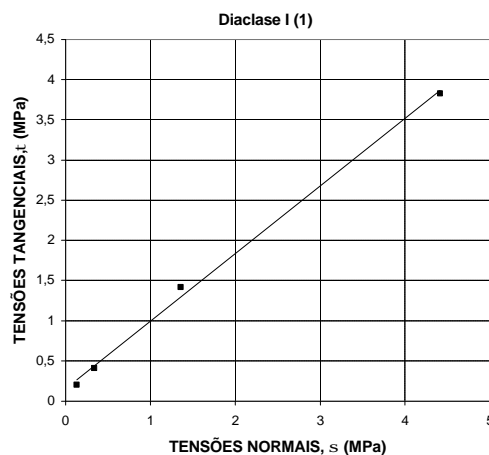


Figura 6 – Exemplo de diagrama tensões normais/tensões tangenciais, do ensaio de deslizamento da diaclase I(1).

4. CONCLUSÕES

Os tempos gastos na realização dos ensaios (incluindo as preparações), os resultados obtidos para cada conjunto ensaiado, e o aspecto das superfícies de rotura dos provetes ensaiados ao corte, permitem concluir que o sistema de ensaio desenvolvido oferece vantagens relativamente ao processo convencional.

O novo tipo de equipamento utilizado na realização de ensaios para determinação das características de corte de rochas e das características de deslizamento de diaclases, para além de ser de fácil aplicação, permite a obtenção de resultados de forma bastante expedita.

As observações efectuadas às superfícies de rotura dos provetes submetidos a ensaio de corte, mostraram que, ao invés do que por vezes se observa nos ensaios efectuados pelo método tradicional, essas superfícies não terão sido sujeitas a outras solicitações que não fossem as das tensões de corte (tensões normais e tensões tangenciais), ou, se o foram, tais solicitações não tiveram qualquer magnitude significativa.

Os valores (σ_i , τ_i) determinados nos ensaios de corte de cada grupo de provetes constituídos pelo mesmo tipo de rocha, bem como os determinados nas diferentes fases de deslizamento a que foi sujeita cada diaclase, apresentam desvios pouco significativos relativamente à correspondente recta mais provável àqueles valores (recta de Coulomb), variando os coeficientes de correlação entre 99,1% e 99,9%. Isto, comprova que são fiáveis os resultados obtidos nos ensaios efectuados com o novo tipo de equipamento.

Também a facilidade de reproduzir numerosas situações de rotura ao corte de rochas, através de combinações das várias cunhas metálicas, torna este método muito interessante para averiguar essa propriedade das rochas nas condições reais de cada projecto de engenharia. Em particular destaca-se a rotura ao corte para tensões tangenciais, que é essencial para caracterizar situações a grandes profundidades.

REFERÊNCIAS

- [1] Cording, E. J. (1976) Shear Strength on Bedding and Foliation Surfaces, in Rock Engineering for Foundations and Slopes, Proc. ASCE Speciality Conf. (Boulder, Colo, vol. 2, pp. 172-192).
- [2] Dight, P.M., and H. K. Chiu: (1981) Prediction of Shear Strength of Joints Using Profiles, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr., 18, 369-386.
- [3] Dinis da Gama, C. (1983) "Interactive Graphics in the Back-Analysis of Slope Failures," Proc. 5th Int. Cong. Rock Mech., vol. C, pp. 53-60.
- [4] Franklin, J. A. (1985) "A Direct Shear Machine for Testing Rock Joints," ASTM Geotech, Testing J., 8 (1), 25-29.
- [5] ISRM: "Suggested Methods for Rock Characterization, Testing, and Monitoring;" ISRM Commission on Testing Methods, E. T. Brown, Ed. (Pergamon, Oxford, 1981), 211 pp.
- [6] McMahon, B. K.: "Some Practical Considerations for the Estimation of Shear Strength of Joints and Other Discontinuities," Proc. Int. Symp. Fundamentals of Rock Joints (Björkliden Sweden, 1985), pp. 475-485.
- [7] Patton, F. D.: "Multiple Modes of Shear Failure in Rock," Proc. 1st Int. Cong. Rock Mech. (Lisbon, Portugal, 1996), vol. 1, pp. 509-513.