

ACERCA DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DAS SUPERFÍCIES DE DESCONTINUIDADE DOS MACIÇOS ROCHOSOS

About the mechanical behaviour of joints in rock masses

por

A. Pinto da Cunha*

José Muralha**

RESUMO — Analisam-se aspectos essenciais do comportamento mecânico das descontinuidades dos maciços rochosos e apresentam-se resultados experimentais obtidos no LNEC relativamente à caracterização da rigidez normal e tangencial e da resistência das fracturas. Ênfase especial é dada à apreciação da rugosidade das juntas, parâmetro fundamental que determina o respectivo comportamento mecânico.

SYNOPSIS — The fundamental concepts of the mechanical behaviour of rock joints are presented, together with experimental data about the normal and tangencial stiffness and the shear strength of the joints. The importance of the wall roughness in the mechanical properties of the joints is emphasized and some new results on this matter are presented as well.

1 — INTRODUÇÃO

À escala dos maciços rochosos e das obras neles construídas, as superfícies de descontinuidade podem, na maior parte dos casos, ser consideradas como estruturas planares. Quaisquer forças ou deslocamentos são, conseqüentemente, susceptíveis de decomposição segundo a normal e segundo o plano da própria descontinuidade, pelo que as leis de comportamento deformacional e resistente de tais superfícies são habitualmente formuladas em termos de tensões e deslocamentos segundo essas direcções ortogonais.

Não obstante a utilização, por vezes, de ensaios triaxiais ou de torção, pode dizer-se que a caracterização mecânica das superfícies de descontinuidade tem sido efectuada, basicamente, por meio de ensaios de corte (deslizamento), laboratoriais e in situ, os quais conceptualmente idênticos, consistem na aplicação de uma força tangencial que provoca o deslocamento de um dos bordos da fractura relativamente ao outro. Durante o ensaio a superfície de descontinuidade encontra-se, em regra, sujeita a uma tensão normal constante, baseando-se a análise do seu comportamento mecânico no cômputo das tensões e deslocamentos normais e tangenciais envolvidos no ensaio, e na sua interpretação, no quadro de modelos de comportamento mais ou menos simplificados.

* Engenheiro Civil, Investigador Principal do LNEC.

** Engenheiro Civil, Assistente de Investigação do LNEC.

Nas secções seguintes analisam-se aspectos essenciais do comportamento mecânico das discontinuidades e dos seus modelos de representação e apresentam-se resultados, obtidos no LNEC, com interesse no domínio da caracterização mecânica da fracturação dos maciços rochosos.

2 — CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DAS SUPERFÍCIES DE DESCONTINUIDADE

2.1 — Generalidades

Os ensaios de deslizamento de discontinuidades são habitualmente conduzidos e interpretados admitindo distribuição uniforme das tensões normais e tangenciais sobre a superfície de deslizamento. Cálculos por elementos finitos (Schneider, 1978) revelam, efectivamente, que a distribuição de tensões na junta se pode considerar uniforme em toda a zona intermédia do bloco, apenas se afastando desta distribuição na vizinhança dos bordos. Estudos por elementos finitos, relativos ao ensaio de corte (Rocha, 1984), revelam que o aumento de rigidez do quadro de encabeçamento do bloco e a obliquidade da sollicitação de corte, relativamente à superfície de deslizamento, contribuem para uniformizar a distribuição das tensões nessa superfície, pelo que é corrente a aplicação da força tangencial, segundo um ângulo θ com a superfície de escorregamento. Sendo N e T respectivamente as forças normal e tangencial aplicadas e S a área da superfície inicialmente sujeita a deslizamento, a qual se vai reduzindo progressivamente para valores $S' = S - \Delta S$ durante o ensaio, as forças efectivas normal N' e tangencial T' na superfície de discontinuidade corresponderão

$$\begin{aligned} N' &= N + T \operatorname{sen} \theta \\ T' &= T \cos \theta \end{aligned} \quad (1)$$

e as tensões normal σ' e tangencial τ' na mesma superfície, no decorrer do ensaio, em função das sollicitações aplicadas, a

$$\sigma' = \frac{N'}{S'}; \tau' = \frac{T'}{S'} \quad (2)$$

Registando-se obliquidade da superfície de deslizamento relativamente a N , definida por ângulos α e β entre aquela superfície e o plano normal a N , as tensões corrigidas na superfície de discontinuidade corresponderão a (Peres-Rodrigues, 1968)

$$\begin{aligned} \sigma &= \frac{\tau' \operatorname{tg} \alpha + \sigma'}{\operatorname{tg}^2 \alpha + \operatorname{tg}^2 \beta + 1} \\ \tau &= \frac{\sqrt{(\sigma'^2 + \tau'^2) \operatorname{tg}^2 \beta + (\tau' - \sigma' \operatorname{tg} \alpha)^2}}{\operatorname{tg}^2 \alpha + \operatorname{tg}^2 \beta + 1} \end{aligned} \quad (3)$$

ou, no caso do ângulo transversal β ser desprezável, exclusivamente em função do ângulo longitudinal α :

$$\begin{aligned}\sigma &= (\sigma' \cos \alpha + \tau' \operatorname{sen} \alpha) \cos \alpha \\ \tau &= (\tau' \cos \alpha - \sigma' \operatorname{sen} \alpha) \cos \alpha\end{aligned}\quad (4)$$

expressões que podem exprimir igualmente as tensões na descontinuidade corrigidas do efeito da dilatação.

2.2 — Relação tensões-deformações tangenciais

Na Fig. 1 tipifica-se o comportamento de descontinuidades sujeitas a deslizamentos, sob tensão normal constante, reproduzindo-se a evolução da tensão tangencial τ aplicada, com o deslocamento tangencial δ_T correspondente. O diagrama revela um crescimento de τ com δ_T , até à vizinhança de um ponto P de coordenadas (τ_p, δ_{TP}) que define o máximo valor da resistência oferecida ao deslizamento pela superfície de descontinuidade (pico). Após P o deslizamento prossegue, implicando valores de $\tau < \tau_p$, tendentes para um valor constante τ_R , correspondente à resistência residual, a qual é alcançada para um deslocamento δ_{TR} que pode ser bastante superior a δ_{TP} . O coeficiente angular $\operatorname{tg} \alpha$ do ramo inicial da curva define a rigidez tangencial da junta K_T , com o significado de tensão tangencial correspondente a um deslocamento tangencial unitário.

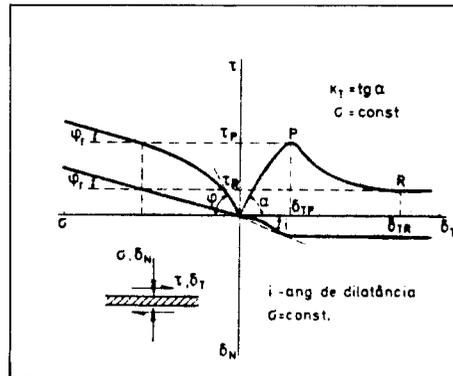


Fig. 1 — Comportamento em deslizamento de uma descontinuidade

Muitas vezes as curvas $\tau - \delta_T$ não evidenciam a presença de um pico, como na Fig. 1. Assim, na Fig. 2 (diagrama A) sintetizam-se os principais tipos de diagramas $\tau - \delta_T$ que se obtêm em ensaios de deslizamento de descontinuidade, correspondendo a diferentes padrões de

rugosidade das mesmas (Goodman, 1974). Assim, as curvas do tipo I referem-se a ensaios de juntas incipientes, os tipos II e III correspondem a fracturas rugosas sem preenchimento, o tipo IV a fracturas não preenchidas e de paredes lisas e, finalmente, as curvas V e VI a descontinuidades com preenchimentos de tipo argiloso. Na mesma figura, os diagramas B e C traduzem, para juntas com e sem resistência de pico, o fenómeno de acréscimo da rigidez tangencial com o crescimento da tensão normal aplicada.

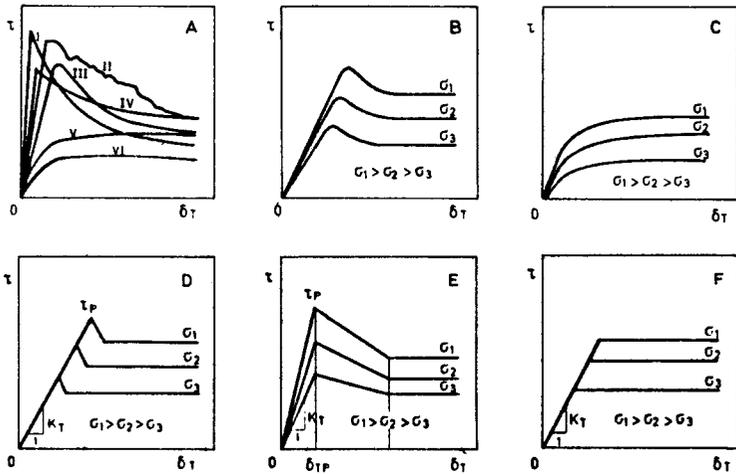


Fig. 2 — Comportamento tangencial de superfícies de descontinuidades reais e modelos de representação

É comum a aproximação dos diagramas reais $\tau - \delta_T$ por diagramas trilineares ou bilineares conforme se manifesta ou não a presença de pico. Cada troço linear do modelo é caracterizado por um valor de rigidez tangencial, correspondendo ao troço horizontal um valor nulo.

A dependência de K_T do valor da tensão normal aplicada é muitas vezes simplificada, mediante a adopção de modelos de rigidez tangencial constante ou com deslocamento de pico constante (Fig. 2, diagramas D, E e F) ou ainda modelos não-lineares representados por curvas, cujas expressões analíticas se adaptam mais ou menos, consoante os casos, aos diagramas experimentais. Muralha (1989, 1990) estudou de forma sistemática e desenvolveu vários programas de cálculo tendo em vista a adaptação dos diagramas reais $\tau - \delta_T$ correspondentes ao deslizamento de diaclases de diversos tipos e locais quer a diagramas bilineares (rigidez constante ou variável) quer a curvas representadas por funções exponenciais, hiperbólicas e trigonométricas (tg^{-1} , $tanh$, sec^{-1} , etc.).

Os primeiros trabalhos efectuados no LNEC no domínio da caracterização da rigidez tangencial de descontinuidades naturais dos maciços rochosos devem-se a Cunha (1981) e referem-se a um maciço xistoso onde haviam sido efectuados 3 ensaios de deslizamento de

descontinuidades in situ e 41 em laboratório, com registo das tensões e deformações tangenciais no decorrer dos deslizamentos.

Um estudo do sistema de compartimentação permitiu a identificação de três famílias principais, H (sub-horizontal), V (subvertical) e X (coincidente com a xistosidade), aproximadamente ortogonais entre si, e, na sequência, a análise da distribuição estatística dos valores de K_T para as três famílias de fracturas H, V e X. Na Fig. 3 são apresentadas as curvas cumulativas de K_T para cada família e determinadas as distribuições lognormais mais prováveis reproduzindo-se ainda os valores de $Q(\lambda)$ resultantes da aplicação do teste de Kolmogorov e da tabela de Smirnov, para verificação da adaptabilidade das distribuições teóricas às curvas reais. A figura, onde se apresentam também os valores da média e da mediana (correspondente a uma probabilidade de ocorrência de 50%), evidencia a boa adaptabilidade da distribuição lognormal à descrição dos K_T para as várias famílias, as quais apresentam valores bastante semelhantes entre si. Os valores mínimos desta grandeza correspondem à família H e aos ensaios in situ, sendo todos inferiores ao valor mínimo de K_T obtido em ensaios laboratoriais. Este facto atesta a existência de um efeito de escala no que respeita à rigidez tangencial, já referido por vários autores.

Para definição da rigidez tangencial, adoptou-se um critério de compensação de áreas entre os diagramas experimentais e os diagramas bilineares ou trilineares que, consoante o tipo de diagrama $\tau - \delta_T$, aproximavam aqueles, o que equivale a adoptar diagramas equivalentes aos reais, do ponto de vista da energia envolvida nos ensaios.

Esta formulação revela-se consistente com a aplicação destes resultados em modelos numéricos de elementos finitos ou de fronteira, baseados fundamentalmente em princípios energéticos (energia potencial ou energia complementar mínimas, etc.).

Nota-se que a informação disponível na literatura sobre este assunto não menciona em regra os critérios adoptados para a definição dos K_T e que, conforme se comprova com a análise efectuada, diferentes critérios podem determinar apreciáveis diferenças nos valores determinados. A necessidade de um esforço de uniformização de tais critérios, eventualmente no âmbito da ISRM (Suggested Methods), revela-se evidente.

Mais recentemente, Muralha e Cunha (1990) estudaram, de forma sistemática, a resistência ao deslizamento e a rigidez tangencial de famílias de descontinuidades de diferentes formações rochosas, tendo confirmado que a distribuição lognormal continua a ser, na maior parte dos casos, a que melhor se adapta à descrição da deformabilidade ao deslizamento das diaclases de uma mesma família (Fig. 4).

A mesma figura põe ainda em evidência (facto comum à generalidade das situações estudadas) o acréscimo da dispersão dos valores de K_T relativos a cada família com o crescimento da tensão normal e, conseqüentemente, com a resistência ao deslizamento, que é uma função monotonicamente crescente com a tensão normal.

Deve contudo notar-se que a análise efectuada dos dados experimentais disponíveis acerca da rigidez tangencial das diaclases de uma mesma família mostra que a distribuição dos K_T corresponde geralmente a uma curva com assimetria negativa muito pouco acentuada, passível em muitos casos de descrição satisfatória em termos de uma distribuição de Gauss.

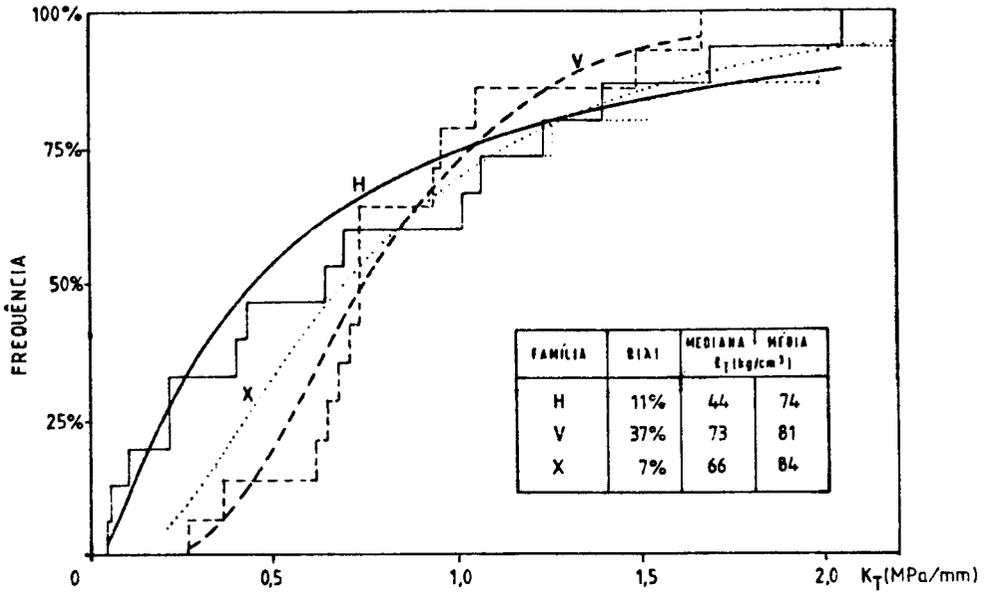


Fig. 3 — Curvas cumulativas de K_T para diversas familias de descontinuidades

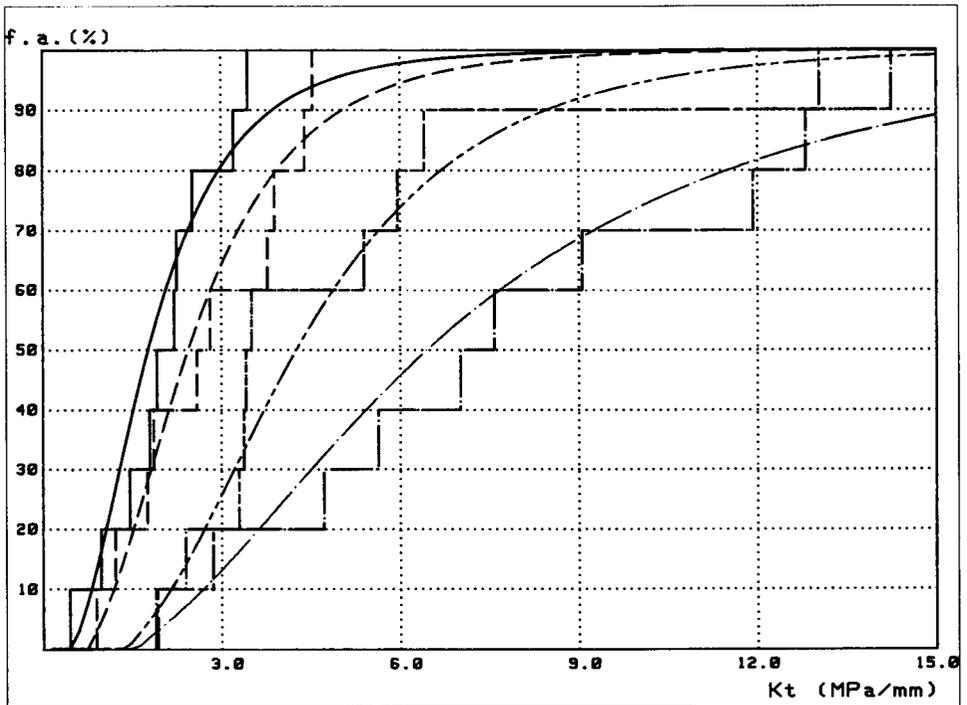


Fig. 4 — Curvas cumulativas da rigidez tangencial de uma familia de diaclases para diversos valores de tensão normal

A rigidez tangencial das superfícies de descontinuidade reflecte, entre outras, a influência complexa da natureza, grau de alteração, rugosidade e ondulação das suas paredes, nomeadamente da distribuição, inclinação e amplitude das asperezas, do tipo de contactos entre os bordos, dos preenchimentos e, ainda, da intensidade e distribuição das tensões normais e tangenciais aplicadas. Para diversos tipos de descontinuidades Goodman (1974) refere valores típicos de K_T , oscilando entre 6,0 MPa/mm para juntas incipientes (curvas tipo I) até 0,8 MPa/mm para fracturas finas com preenchimentos argilosos (tipo VI). Bandis *et al.* (1983) indicam para a rigidez tangencial inicial valores na gama 1,0 – 50,5 MPa/mm, claramente dependentes, para cada tipo de rocha, do grau de alteração das paredes.

Por seu turno, Barton e Choubey (1977) propõem para estimar a rigidez tangencial de uma descontinuidade a relação empírica que exprime a rigidez em função da resistência de pico e onde através de L (comprimento da amostra) se evidencia significativo efeito de escala no que respeita à deformabilidade tangencial das juntas. Nesta expressão,

$$K_T = \frac{100}{L} \tau \operatorname{tg} \left[JRC \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma} \right) + \phi_r \right] \quad (5)$$

JRC — coeficiente de rugosidade da junta

JCS — resistência à compressão da parede da junta

ϕ_r — ângulo de atrito residual

têm o habitual significado de toda a formulação de Barton, hoje quase universalmente utilizada no que refere à descrição do comportamento mecânico das superfícies de descontinuidade. Trata-se de uma formulação que conta entre os seus méritos ter dado o devido destaque ao papel da rugosidade no comportamento mecânico das descontinuidades e à influência da dimensão da amostra ensaiada nos resultados experimentais obtidos (efeito de escala).

2.3 — Dilatância

Um outro aspecto relevante do comportamento das descontinuidades, quando submetidas a deslizamento sob tensão normal constante, é a ocorrência de deslocamentos δ_N na direcção normal, enquanto se processa o deslocamento tangencial δ_T , o que traduz o fenómeno da dilatância (Fig. 1). A dilatância pode ser definida pelo ângulo i de dilatância — $\operatorname{tg} i = (\delta_N / \delta_T) \sigma$ — que representa a taxa de variação do deslocamento normal com o deslocamento tangencial, sob tensão normal constante, e correspondente ao ângulo que o plano médio da junta faz com a direcção instantânea do movimento.

Convém salientar que uma junta pode revelar comportamento dilatante ou contractante, conforme a rugosidade e a ondulação das paredes de rocha em contacto, a posição relativa inicial dos bordos, a intensidade das tensões normais aplicadas e o sentido e amplitude do movimento tangencial (Cunha, 1981).

É o que se ilustra na Fig. 5, com uma fractura de tipo ondulado liso, sujeita a uma sollicitação tangencial T , sob uma tensão normal constante. Assim, os esquemas I e II evidenciam como, para uma mesma descontinuidade e uma mesma posição inicial dos bordos, o sentido da sollicitação de corte pode determinar o seu comportamento dilatante ou contractante. Os esquemas III e IV manifestam, por seu turno, como para duas posições iniciais distintas da mesma junta, a mesma sollicitação tangencial determina comportamentos antagônicos, correspondentes a dilatação no primeiro caso e contração no segundo, o que põe em evidência a necessidade de respeitar a posição relativa dos bordos das descontinuidades naturais, antes de as sujeitar ao deslizamento, e, sempre que possível, aplicar as forças segundo as direcções e sentidos em que virão a actuar na obra ou, em alternativa, que conduzam a resistências mínimas.

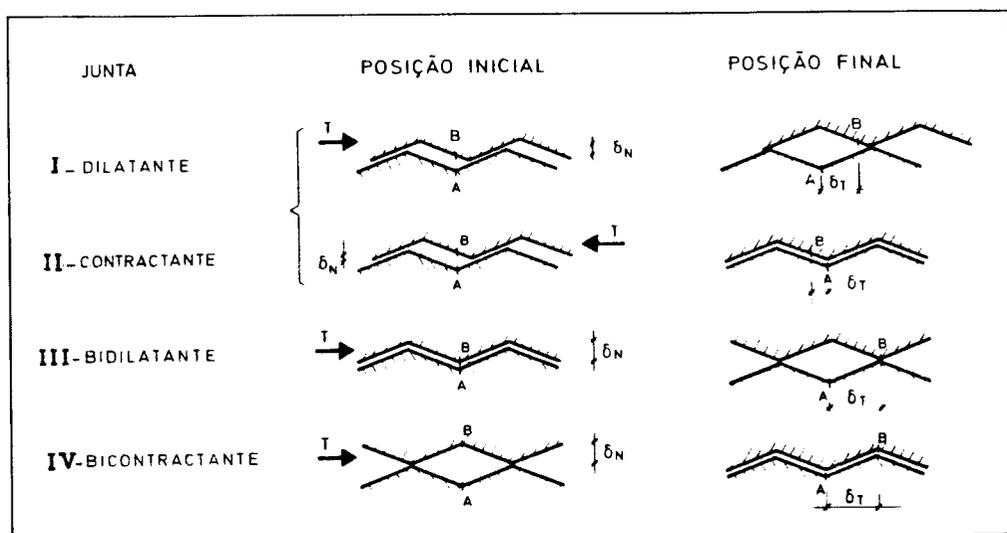


Fig. 5 — Efeito da ondulação, da posição inicial dos bordos e do sentido da sollicitação sobre a dilatância

A figura mostra também que, no caso de fracturas com ondulação, é esta que impõe a dilatação ou contração, durante o deslizamento, sendo de menor importância, sob este aspecto, as asperezas que definem a rugosidade das paredes, as quais influem sobretudo na resistência ao deslizamento. Dado que à escala dos ensaios laboratoriais a ondulação não pode, em regra, ser representada, tal significará que os resultados não têm em conta a sua influência, e o mesmo pode acontecer nos ensaios in situ, se as dimensões do bloco ensaiado forem inferiores ao “comprimento de onda” da superfície de descontinuidade de que foi extraído.

A Fig. 5 permite ainda compreender que o sentido da deformação normal possa ser invertido, em função da amplitude do movimento. Assim, por exemplo, a junta bidilatante retratada no esquema III passaria a revelar, se o deslizamento continuasse para além da posição nela

referida como final, um comportamento contractante. Por outro lado, também o valor da tensão normal durante o deslizamento pode inverter o sentido da deformação normal da descontinuidade, como mostra a Fig. 6 onde, com o crescimento de σ aplicado à descontinuidade, a mesma passa de dilatante a contractante, devido ao esmagamento dos contactos.

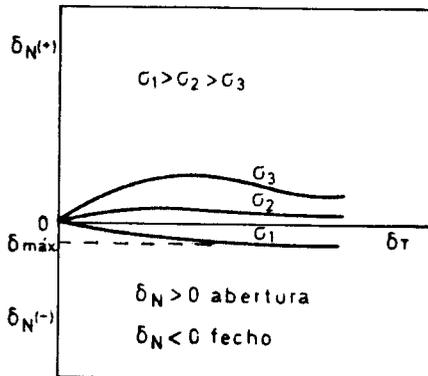


Fig. 6 — Variação de δ_N com o valor da tensão normal

Dado, que a existência de dilatância tende a aumentar a tensão normal aplicada na junta e que a resistência ao corte aumenta com σ , a sua não-consideração na análise conduz a uma avaliação da resistência das descontinuidades do lado da segurança.

2.4 — Deformação normal

A deformação normal de uma superfície de descontinuidade, sujeita à variação da tensão normal aplicada (por exemplo, aquando da aplicação de σ até se atingir o valor que permanecerá constante durante o ensaio de deslizamento) é ilustrada na Fig. 7.

A partir de um valor inicial da tensão σ_0 , ao qual corresponderá um deslocamento normal $\delta_N = 0$, uma diminuição do estado de compressão inicial tende a provocar um gradual afastamento dos bordos, até que atingida a resistência à tracção R , em regra desprezável, se anula o estado de tensão na superfície. Pelo contrário, a um aumento gradual da compressão, corresponde uma aproximação crescente entre as duas faces da fractura, até um valor limite que traduz o fecho máximo da descontinuidade, δ_0 .

O comportamento na direcção perpendicular ao plano da fractura é habitualmente caracterizado pela rigidez normal K_N , com o significado de variação da tensão normal correspondente a um deslocamento δ_N unitário. A rigidez normal reflecte a natureza dos contactos entre as faces da junta, a rugosidade das suas paredes e a resistência e deformabilidade das asperezas, a espessura, tipo e propriedades dos enchimentos, a intensidade e distribuição da tensão normal

aplicada. Dado que à medida que a deformação normal aumenta, com o acréscimo de σ aumentam progressivamente os pontos de contacto entre os bordos, verificando-se nomeadamente o esmagamento de pontos rochosos, a rigidez normal aumenta também com δ_N , assumindo no limite, correspondente ao fecho máximo da junta, um valor teoricamente infinito em termos do modelo conceptual apresentado.

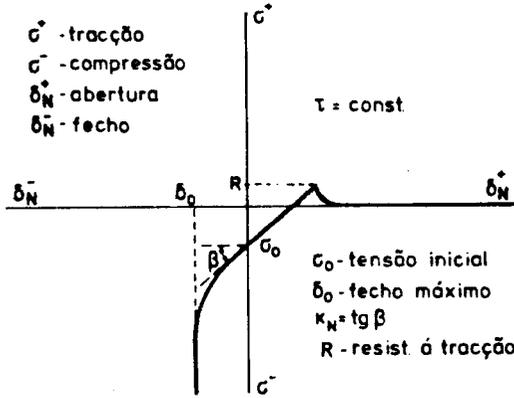


Fig. 7 — Deformação normal das discontinuidades com a variação da tensão normal

Para a representação da função $\sigma(\delta_N)$, Goodman (1974) combinando as condições de fecho máximo e não-resistência à tração propôs a seguinte relação hiperbólica onde c e t são constantes

$$\frac{\sigma - \sigma_0}{\sigma_0} = c \left(\frac{\delta_N}{\delta_0 - \delta_N} \right)^t \quad (6)$$

e Bandis (1980) apresenta a seguinte lei que descreve a deformação para ciclos de carga e descarga

$$\delta_N / \sigma = a - b \cdot \delta_N \quad (7)$$

- onde δ_N — fecho sob acção da tensão σ
 a — inverso da rigidez normal inicial K_{Ni}
 b — a/δ_0

exprimindo-se δ_0 e K_{Ni} em função dos habituais parâmetros JRC e JCS .

O mesmo autor apresenta valores de rigidez normal inicial na gama 2,3 – 70,2 MPa/mm, dependentes da natureza da rocha e grau de alteração dos bordos das juntas, valores que aumentam significativamente em ciclos subsequentes, já que o processo de descarga é tipicamente anelástico e com um comportamento histerético vincado, com deformações remanescentes acentuadas.

É também comum, no que respeita à deformação normal, a adopção de diagramas de tipo bilinear, correspondendo o segundo ramo, em regra, a uma rigidez muito elevada para simular o fecho máximo da junta.

Não tem sido frequente no LNEC a medição dos deslocamentos normais em laboratório durante a aplicação da carga normal de serviço, de forma a permitir a caracterização da rigidez normal das discontinuidades. Constituiu excepção um trabalho efectuado no estrangeiro (LNEC, 1978) em que, a partir de cinco ensaios *in situ* e de mais quarenta ensaios laboratoriais de deslizamento, os autores efectuaram, para os primeiros deslizamentos, a determinação da rigidez normal e tangencial das superfícies de descontinuidade.

Os valores de K_N , dado que apenas se dispunha dos valores finais de δ_N relativos à aplicação da tensão normal, antes de cada deslizamento, correspondem a valores secantes.

Na Fig. 8 são apresentados e comparados os valores globais obtidos para a rigidez normal e tangencial das várias descontinuidades, oscilando a relação K_N/K_T entre um e treze. Em valores absolutos, os K_N secantes distribuem-se no intervalo (0,3 – 8,1) MPa/mm e os K_T no intervalo (0,1 – 1,9) MPa/mm. Trata-se de um maciço heterogéneo, em que as superfícies de descontinuidade testadas correspondem a superfícies de baixa resistência, diaclases e contactos entre diferentes formações, apresentando enchimentos e rugosidades diversas, pelo que se considerou vantajosa uma análise mais individualizada de cada uma das zonas testadas, explicitando-se para o diagrama global e para cada tipo de descontinuidades as respectivas correlações $K_N = aK_T$, obtidas por mínimos quadrados (Fig. 8).

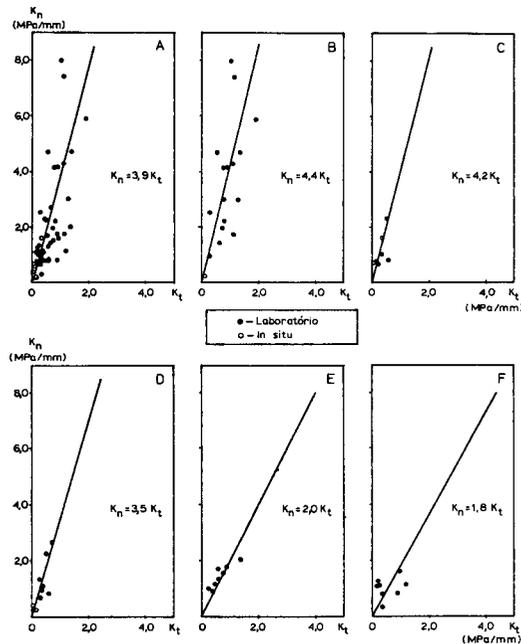


Fig. 8 — Comparação entre valores da rigidez normal e tangencial

Nesta figura tem-se:

- A — Conjunto das diaclases ensaiadas, in situ e em laboratório
- B — Contactos entre camadas de argilito sem preenchimentos
- C — Contactos entre camadas de argilito preenchidos com material esmagado
- D — Contactos entre camadas de argilito com preenchimento argiloso
- E — Descontinuidades em formação de argilito com enchimento fino
- F — Juntas de contacto entre camadas de argilito com preenchimento de calcite.

É patente que as amostras sem preenchimento (B) apresentam em média valores de K_N e K_T superiores às suas congéneres com preenchimentos.

Comprovou-se também que, de um modo geral, os valores de K_N e K_T correspondentes aos ensaios in situ são inferiores, para as mesmas zonas, aos relativos a ensaios laboratoriais, o que atesta a existência de um efeito de escala no que respeita a ambos os parâmetros, para além de eventuais reflexos das condições experimentais.

2.5 — Resistência ao deslizamento das superfícies de descontinuidade

A caracterização da resistência τ ao deslizamento das superfícies de descontinuidade de maciços rochosos implica o estabelecimento de uma relação do tipo $\tau = f(\sigma, D, R, L, E, DS)$ onde

- σ — tensão normal aplicada
- D — dimensão da amostra no sentido do deslizamento
- R — rugosidade da amostra
- E — natureza e espessura do enchimento
- L — litologia e grau de alteração do material da parede da diaclase
- DS — direcção e sentido do deslizamento

No LNEC a caracterização da resistência ao deslizamento tem sido conduzida com base em ensaios laboratoriais e in situ sob tensão normal constante, interpretados no quadro simplificado, mas aceitável do ponto de vista prático, da teoria de Coulomb, quer para resistências de pico quer residuais. Neste quadro a envolvente assume a conhecida forma linear

$$\tau = C + \sigma \cdot \operatorname{tg} \varphi \quad (8)$$

onde C representa a coesão aparente (com significado de resistência ao corte sob tensão normal nula) e φ o ângulo de atrito (C_r e φ_r para resistência residual). A determinação do coeficiente angular e ordenada na origem das rectas de Coulomb mais prováveis, no espaço de coordenadas

$\tau - \sigma$, é feita sobre um número de ensaios não inferior a 3, minimizando a soma dos quadrados dos desvios:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \varphi &= \frac{n \sum \sigma_i \tau_i - \sum \sigma_i \sum \tau_i}{n \sum \sigma_i^2 - (\sum \sigma_i)^2} \\ C &= \frac{\sum \tau_i \sum \sigma_i^2 - \sum \sigma_i \sum \sigma_i \tau_i}{n \sum \sigma_i^2 - (\sum \sigma_i)^2} \end{aligned} \quad (9)$$

onde σ_i e τ_i representam as tensões (de pico ou residuais) correspondentes ao ensaio i do conjunto de n ensaios envolvidos no somatório, as quais podem ser previamente corrigidas, dos efeitos da obliquidade da força de corte, da variação da área sujeita ao deslizamento no decorrer do ensaio e da eventual obliquidade da superfície de deslizamento, relativamente ao plano médio da diaclase. Na formulação de Coulomb C e φ retratam pois, de forma indirecta, a influência conjugada e complexa de rugosidade, natureza, alteração, preenchimento e dimensão da diaclase.

Uma síntese (Cunha, 1981) de mais de quatrocentos ensaios de deslizamento de diaclases de maciços litologicamente diferenciados — granitos (90), xistos (196), calcários (15), gnaisses (7), grauvaques (14), quartzitos (15) e corneânas (74) — evidenciou a não-existência de diferenças significativas quanto às características resistentes das fracturas dos diferentes tipos de formações rochosas (valores de φ no intervalo $15^\circ - 45^\circ$ e C entre 0 e 0,6 MPa). A dispersão dos valores obtidos para cada tipo de rocha traduz, outrossim, a variação das características geométricas das fracturas, em particular da rugosidade dos bordos, do grau de alteração das paredes ou da presença de enchimentos com baixas características resistentes.

As dimensões muito semelhantes das amostras ensaiadas não permitem, na síntese apresentada, explicitar a influência da dimensão sobre as resistências obtidas. A existência de um efeito de escala, particularmente significativo para diaclases rugosas e menos nítido para superfícies planas e lisas, é contudo hoje em dia geralmente aceite. Mais nítido no que respeita à resistência de pico, que diminui com o aumento das dimensões dos provetes, o efeito de escala torna-se todavia menos significativo no que respeita à resistência residual.

A caracterização da resistência por uma envolvente linear não retrata, para tensões normais baixas, o comportamento das descontinuidades. Na realidade, segundo Patton (1966), para tensões normais baixas, o deslizamento processa-se fundamentalmente por escorregamento entre as paredes da descontinuidade, sendo galgadas as rugosidades das mesmas. Então, se as irregularidades apresentarem em média uma inclinação i (ângulo de dilatância) relativamente ao plano da junta, e se for φ o ângulo de atrito dos materiais ao longo da mesma, a esta zona corresponderá uma envolvente de rotura inclinada de um ângulo $\varphi + i$ (Fig. 9). Para tensões normais elevadas, pelo contrário, a energia necessária para levar um bloco a deslizar, por galgamento das irregularidades, sobre o bloco oposto, é superior à energia que corresponde ao

corte ou esmagamento de tais irregularidades, pelo que a envolvente de rotura corresponderá a uma recta, de inclinação correspondente ao ângulo de atrito residual φ_r , do material rochoso. Uma vez que para tensões normais intermédias ocorrerá uma zona de transição, em que coexistirão fenómenos de corte e de escorregamento sobre as irregularidades, a resistência real de pico das descontinuidades será distinta do diagrama bilinear de Patton, correspondendo antes a uma envolvente curva tal como a da Fig. 9. À resistência residual corresponderá, por seu turno, uma envolvente rectilínea de inclinação φ_r (Fig. 1). Para descontinuidades de paredes lisas ou preenchidas com material argiloso, em que a dilatância é desprezável, as envolventes de pico e residual poderão coincidir.

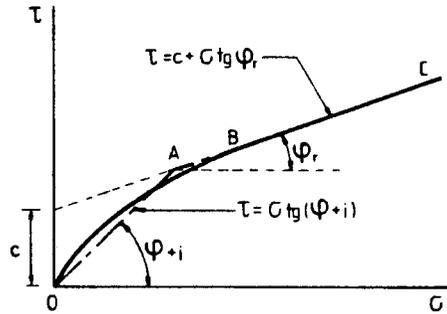


Fig. 9 — Envolvente de resistência ao corte das descontinuidades

Para representação da resistência de pico das superfícies de descontinuidades em função da tensão normal aplicada, têm também sido propostas, por vários autores leis não-lineares com fundamentação empírica, como é o caso de Ladanyi e Archambault ou mais recentemente de Barton e Choubey (1977). Este autor, na linha do modelo não-linear de Patton, define a resistência de pico τ_p

$$\tau_p = \sigma \cdot \text{tg} [JRC \log_{10} (JCS/\sigma) + \phi_b] \quad (10)$$

onde JRC — coeficiente de rugosidade da fractura

JCS — resistência à compressão uniaxial da parede da junta

ϕ_b — ângulo de fricção básico de superfícies planas e inalteradas

Note-se que esta equação exprime a diminuição do ângulo de atrito efectivo com o aumento da tensão normal, segundo uma lei linear com o logaritmo desta.

Para a caracterização de JCS , que reflecte a influência do grau de alteração do material que constitui as paredes da descontinuidade sobre a respectiva resistência ao corte, Barton propôs a utilização do martelo de Schmidt e para a determinação de ϕ_b ensaios específicos de desli-

zamento, quer em plano inclinado (“tilt test”) quer por traccionamento (“pull tests”). Quanto ao *JRC*, que reflecte a decisiva influência da rugosidade das descontinuidades sobre a sua resistência e deformabilidade, pode ser obtido pelo expressão

$$JRC = \frac{\text{arc tg}(\tau_p/\sigma) - \phi_b}{\log_{10}(JCS/\sigma)} \quad (11)$$

desde que previamente conhecidas as restantes grandezas que nela intervêm. Outra forma de estimar *JRC* é a partir da comparação das superfícies das descontinuidades a ensaiar com perfis tipo (Fig. 10) que reflectem outras tantas classes de rugosidade e por conseguinte de *JRC* (Barton e Choubey, 1977).

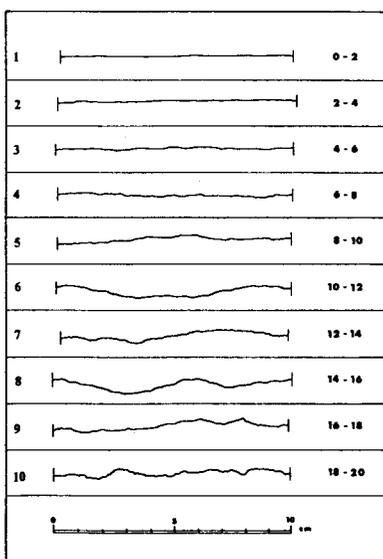


Fig. 10 — Perfis tipo de rugosidades e valores de *JRC* associados

A importância da rugosidade, ao nível das asperezas ou da ondulação, na deformabilidade e resistência, das descontinuidades tem levado ao desenvolvimento de diversas técnicas com diferente sofisticação, quer para o seu levantamento (métodos fotogramétricos, bússola e clinómetro, perfilógrafos, perfilometria de sombras, etc.) quer para a sua representação e interpretação (diagramas de declives, análise fractal, etc.) (Pistone, 1984).

A convicção, adquirida na observação de numerosas superfícies deslizadas, de que apenas uma percentagem, por vezes bastante reduzida, da área total acaba por ser envolvida no deslizamento, função do padrão de rugosidade dessa superfície, ou por outras palavras, o comportamento deformacional e resistente das descontinuidades, se bem que ligado à rugosidade global das superfícies, apresenta evidências de ser particularmente condicionado por certas

singularidades dessas superfícies, nomeadamente pelos picos e reentrâncias mais significativos, levou os autores a procurarem uma correlação entre o máximo desnível h (amplitude) no sentido do deslizamento, detectável em cada amostra (Fig. 11), e o parâmetro da sua rugosidade global que é o JRC . Os resultados preliminares logo evidenciaram que a correlação, a existir, não deveria ser linear, pelo que foi procurada, por simplicidade, uma curva parabólica do 2º grau, passando na origem, uma vez que a concepção do JRC assume a hipótese de que uma diaclase perfeitamente plana e lisa ($h = 0$) deverá apresentar JRC nulo. A equação escolhida foi utilizada para diversos tipos de maciços rochosos, sendo certo que não há razões físicas para a existência de uma correlação apertada entre as duas grandezas h e JRC , mas que, por ambas exprimirem características (pontuais e globais, respectivamente) atinentes à rugosidade das fracturas, é verosímil a existência de um certo relacionamento entre elas, ou seja, o valor do JRC será influenciado pelo de h , não sendo a recíproca obrigatoriamente verdadeira.

Tomou-se como base de análise o enquadramento das diaclases nas respectivas famílias de compartimentação. A apreciação dos valores de JRC relativos a numerosas diaclases de vários locais, diferentes litologias e níveis de rugosidade foi feita a partir quer da observação directa das amostras quer da sua representação topográfica por perfis de rugosidade, próximos e equidistantes, traçados segundo o sentido do deslizamento.

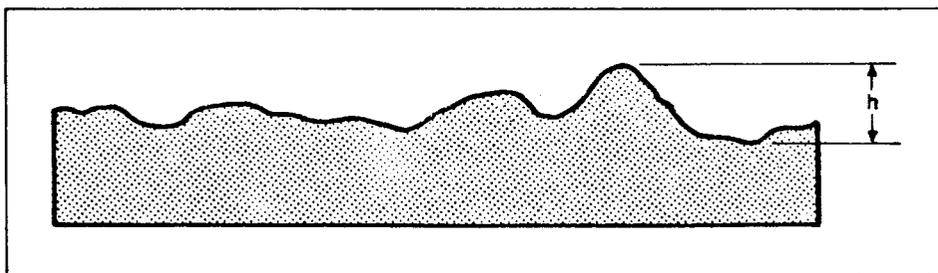


Fig. 11 — Definição da amplitude (h)

Na Fig. 12 apresentam-se a título ilustrativo os diagramas relativos a um maciço xistoso, com três famílias de descontinuidades H, V e X (Muralha e Cunha, 1990).

Na linha de clarificação das potencialidades da formulação de Barton para a previsão do comportamento mecânico das descontinuidades, a partir dos parâmetros JRC , JCS e ϕ_b , sem recorrer a ensaios de deslizamento, os autores procederam, para dois locais distintos, à investigação das possibilidades de utilização da expressão (10) para a previsão da resistência ao deslizamento das 3 famílias de diaclases de cada local. Para esse efeito, dispunham das rectas de Coulomb mais prováveis para cada família, obtidas dos respectivos ensaios laboratoriais, e dos valores médios de JRC , também para cada família, obtidos dos valores individuais das diaclases, tendo-se tomado para ϕ_b valores próximos de 30 graus de acordo com Barton e Choubey (1977).

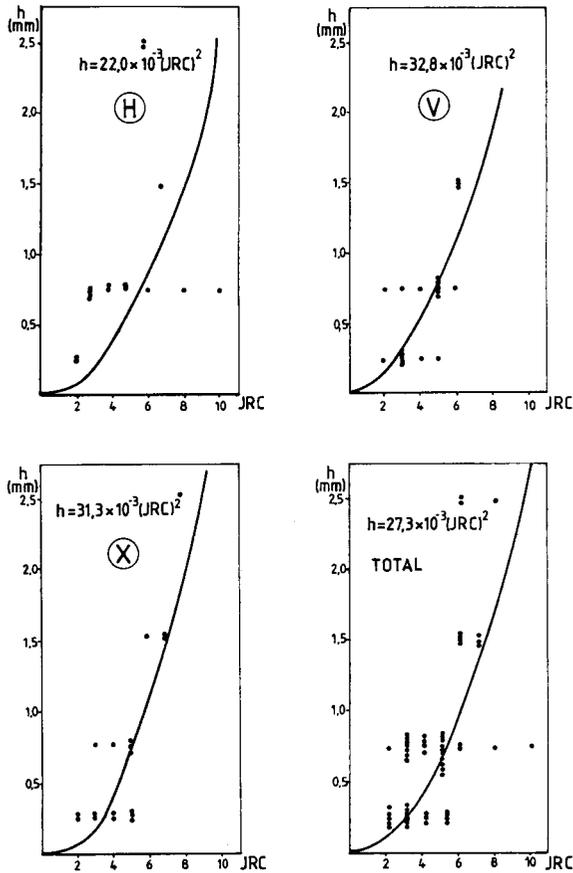


Fig. 12 — Relação entre a amplitude máxima da rugosidade e *JRC*

Para essas diaclases não foram feitas determinações do *JCS* mas dispunha-se das tensões de rotura em compressão uniaxial, que marcam o limite superior dos valores possíveis de *JCS*. Havendo indicações na literatura de que o *JCS* das juntas pode atingir, para diaclases muito alteradas, valores até 25% da resistência em compressão uniaxial, procurou-se para cada família verificar a adaptação da envolvente não-linear de Barton aos valores experimentais, adoptando para *JCS*, como alternativas, quer o valor médio quer o mínimo das resistências à compressão da rocha, σ_c . Uma análise destes resultados preliminares, envolvendo as curvas de resistência com $JCS = \bar{\sigma}_c$, reproduzidas na Fig. 13, aponta no sentido de um certo afastamento dos resultados fornecidos pelo modelo não-linear dos resultados experimentais, o que de nenhuma forma permite aconselhar a substituição da realização de ensaios na determinação das características resistentes do sistema de fracturação dos maciços rochosos por simples previsões com base no modelo de Barton.

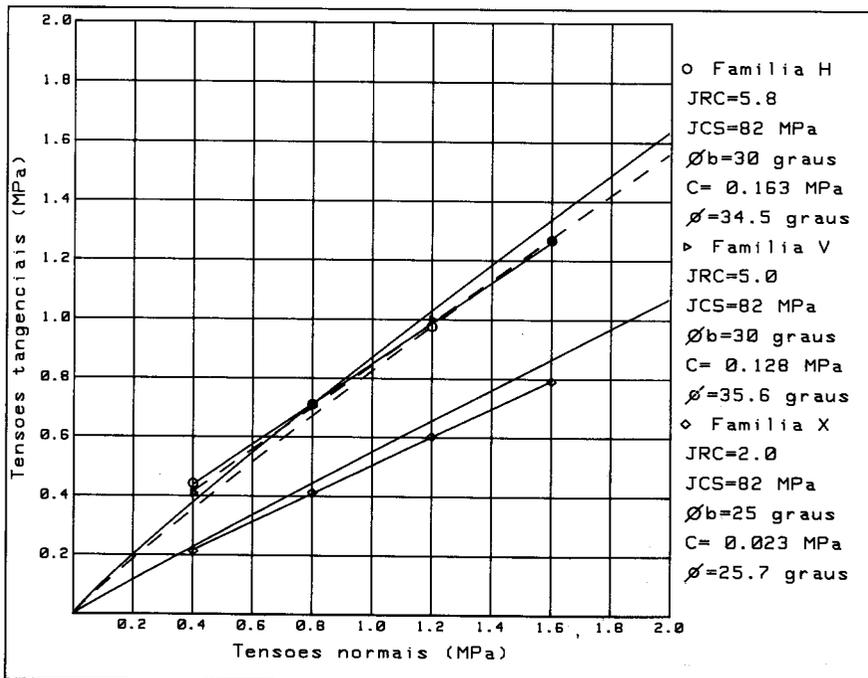
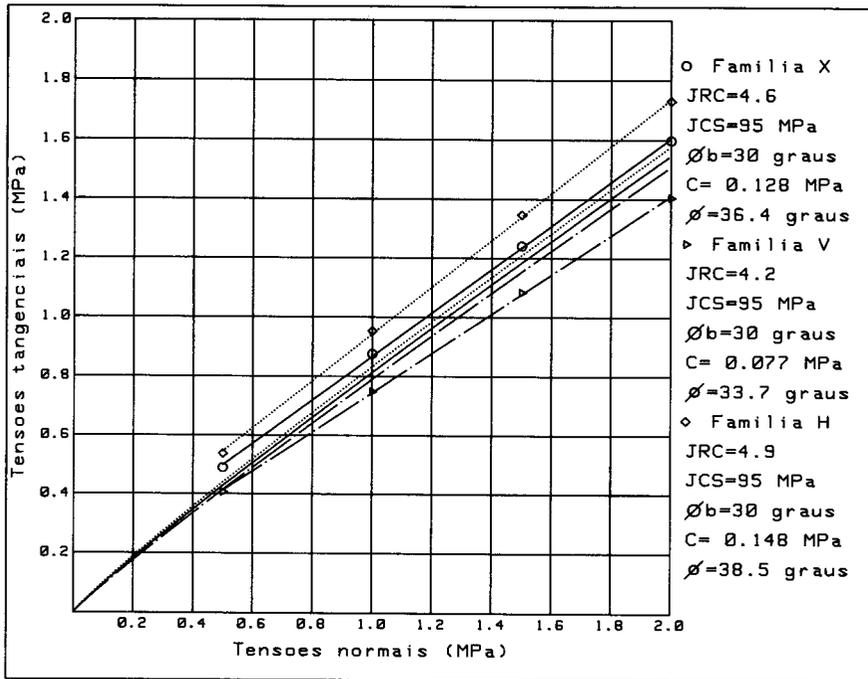


Fig. 13 — Avaliação da resistência ao deslizamento — comparação da envolvente experimental com um modelo não-linear de previsão

3 — ENSAIOS DE DESLIZAMENTO SOB DEFORMAÇÃO NORMAL IMPEDIDA

No que foi dito, foi sempre considerado o comportamento ao corte das discontinuidades mantendo a tensão normal constante no decorrer do ensaio. Dado que em muitas obras em maciços rochosos a redistribuição de tensões operada devido às mesmas dificilmente se coaduna com a condição $\sigma = \text{const.}$, têm sido realizados por alguns autores (Goodman, 1974), ensaios em que é totalmente impedido o deslocamento normal ($\delta_N = 0$). Na Fig. 14 reproduz-se a variação de τ , σ e δ_N com δ_T , para os dois tipos de ensaio, o que permite explicar a influência das condições experimentais sobre o comportamento das discontinuidades. Para a condição $\sigma = \text{const.}$, a figura evidencia diagramas típicos de comportamento ao corte $\tau - \delta_T$ e variação da dilatância $\delta_n - \delta_p$, idênticos aos apresentados anteriormente para similares condições de ensaio. Quando porém a dilatância é completamente impedida no decorrer do ensaio ($\delta_N = 0$), a resistência ao corte aumenta, como consequência do acréscimo de tensão σ na junta, em virtude do impedimento da deformação na mesma direcção.

Na realidade, e dado que os mecanismos de comportamento das obras em maciços rochosos não permitem assegurar, também, o cumprimento da condição $\delta_N = 0$, considera-se mais adequada a apreciação do comportamento mecânico das discontinuidades por meio de ensaios sob tensão normal constante, cujos resultados se situam do lado da segurança relativamente à condição experimental de deformação normal impedida.

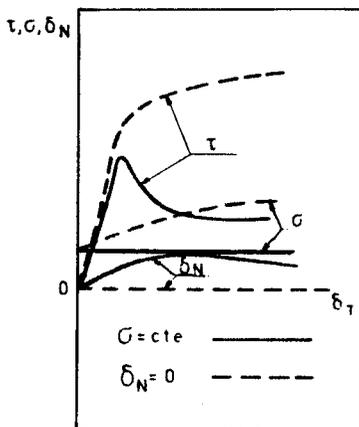


Fig. 14 — Comparação entre ensaios de corte com $\sigma = \text{Cte}$ e $\delta_N = 0$

4 — CONCLUSÕES

Os resultados ora apresentados devem ser considerados como preliminares e inserem-se numa linha de pesquisa que tem como objectivo contribuir para a clarificação do comportamento mecânico das superfícies de discontinuidade dos maciços rochosos. Este compor-

tamento revela-se particularmente complexo, reflectindo a influência de factores tão diversos como a natureza da rocha, grau de alteração e rugosidade das paredes das fracturas, amplitude e geometria das asperezas, tipo de contacto entre os bordos, natureza e características dos eventuais preenchimentos, intensidade e distribuição das tensões normais e tangenciais aplicadas e direcção, sentido e amplitude das deformações associadas. A determinação das características mecânicas das superfícies de descontinuidade por via experimental é ainda influenciada pelas dimensões das amostras ensaiadas, evidenciando um efeito de escala que, particularmente significativo para fracturas rugosas, deve ser tido em conta na utilização dos resultados para fins de projecto de obras geotécnicas em maciços rochosos.

A caracterização da resistência máxima ao deslizamento das descontinuidades por uma envolvente linear revela-se como muito aceitável do ponto de vista prático, para um grande número de situações. Leva, contudo, por vezes, à adopção de valores significativos para a coesão, o que pode carecer de verosimilhança, dado que esta é basicamente uma ordenada na origem associada ao modelo interpretativo linear e a um mecanismo de corte que pode não subsistir fisicamente para tensões normais baixas.

A consideração de envolventes não-lineares permitirá, em vários casos, um melhor ajuste aos resultados experimentais e evidenciar a variação do ângulo de atrito efectivo com o nível de tensões envolvidas. Todavia, a experiência colhida pelos autores permite expressar as maiores reservas à substituição da realização de ensaios pela utilização de modelos não-lineares de previsão do comportamento mecânico das juntas, baseados em parâmetros de rugosidade e alteração das fracturas, ainda que de fácil determinação.

Finalmente, no trabalho apresentado realça-se o papel da rugosidade na resistência ao deslizamento e aponta-se a necessidade da sua descrição em termos globais a par de uma caracterização pontual das singularidades mais significativas que influenciam os mecanismos de deslizamento, fazendo intervir de forma activa no processo apenas uma parcela da secção total das descontinuidades.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BANDIS, S. C. (1980) — *Experimental studies of scale effects on shear strength and deformation of rock joints*. Ph. D. Thesis, Univ. Leeds.
- BANDIS, S. C.; LUMSDEN, A. C.; BARTON, N. R. (1983) — *Fundamentals of rock joint deformation*. "Int. Journal Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.", vol. 20, n.º 6.
- BARTON, N.; CHOUBEY, V. (1977) — *The shear strength of rock joints in theory and practice*. "Rock Mechanics", vol. 10.
- CUNHA, A. P. (1981) — *Aplicação de modelos matemáticos ao estudo de túneis em maciços rochosos*. Tese para Especialista. LNEC, Lisboa.
- CUNHA, A. P. (1990) — *Scale Effects in Rock Mechanics. Introductory Lecture*. 1st Int. Workshop on Scale Effects in Rocks Masses. Loen, Norway.
- GOODMAN, R. (1974) — *The mechanical properties of joints*. 3rd ISRM Congr., vol. 1, Denver.
- LNEC (1978) — *Determination of the shear strength characteristics in the foundation rock mass of the Aslantas Dam*.

- MURALHA, J. (1989) — *Modelação de diagramas tensões tangenciais–deslocamentos tangenciais de ensaios de deslizamento de descontinuidades*. 3.º Encontro Nacional de Geotecnia, Porto.
- MURALHA, J. (1989) — *Evaluation of mechanical characteristics of rock joints under shear loads*. ISRM Conference on Rock Joints. Loen, Norway.
- MURALHA, J. ; CUNHA, A. P. (1990) — *Caracterização do comportamento mecânico de superfícies de descontinuidade*. Relatório PIDDAC, LNEC (a publicar).
- PATTON, F. D. (1966) — *Multiple modes of shear failure in rock and related materials*. Ph. D. Thesis, Univ. Illinois.
- PERES-RODRIGUES, F. (1968) — *Determination of shear throughout the rock and slide along joints*. Int. Symp. on Rock Mechanics, Madrid.
- PISTONE, R. S. (1984) — *Efeito de escala na resistência ao deslizamento de descontinuidades em maciços rochosos*. Dissertação de mestrado, Univ. Nova, Lisboa.
- ROCHA, M. (1981) — *Mecânica das rochas*. LNEC, Lisboa.
- SCHNEIDER, H. J. (1978) — *The laboratory direct shear test — an analysis and geotechnical evaluation*. "Bul. IAEG," n.º 18.