

# ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE TÚNEIS EM MACIÇOS ROCHOSOS FRACTURADOS\*

## Analysis of tunnel behaviour in discontinuous rock masses

por

A. Pinto da Cunha\*\*

**RESUMO** — Apresentam-se estudos paramétricos relativos à influência das descontinuidades do maciço rochoso sobre o comportamento de túneis. Analisam-se os campos de tensões e deslocamentos e comparam-se os resultados com soluções analíticas ou numéricas relativas a meios contínuos, isotrópicos ou anisótropos.

**SYNOPSIS** — Some parametric studies about the influence of the mechanical properties of joints on tunnel behaviour are reported. Stress and displacement fields are presented, and a comparison is made with isotropic and anisotropic, analytical or numerical continuous solutions.

### 1 — INTRODUÇÃO

A ocorrência aleatória de superfícies de descontinuidade e a dispersão das suas características geométricas e mecânicas, associadas à heterogeneidade e anisotropia da própria rocha, conferem aos maciços rochosos um comportamento estrutural complexo, para cuja previsão e análise há que recorrer a modelos simplificados dos maciços.

Tais modelos podem ser, conceptualmente, contínuos ou descontínuos, estando a sua verosimilhança e significado, em cada caso, directamente dependentes da morfologia macroscópica dos maciços e dos condicionalismos de informação geotécnica e capacidade computacional.

Para as aproximações de meio contínuo requer-se a atribuição ao elemento de volume de propriedades mecânicas equivalentes, em termos médios, às características do maciço real fracturado, podendo e devendo a heterogeneidade e anisotropia deste ser acolhidas no modelo. Nas aproximações de meio descontínuo, haverá que proceder à individualização das descontinuidades geotecnicamente relevantes, cujas propriedades mecânicas deverão ser definidas, concomitantemente com as do meio contínuo equivalente entre aquelas descontinuidades.

Em obras subterrâneas superficiais, em que os níveis de tensões no maciço são baixos, a deformação da matriz rochosa pode muitas vezes ser negligenciada face aos movimentos de translação e rotação que ocorrem nas superfícies de descontinuidade, tornadas cinematicamente viáveis pela abertura dos vazios. Modelos de blocos podem então ser utilizados, com propriedade, para a análise do comportamento estrutural.

\*Apresentado ao 6.º Congresso do ISRM, Montreal, 1987. A discussão do trabalho está aberta por um período de três meses.

\*\*Engenheiro Civil, Investigador Principal do LNEC.

Para obras mais profundas, sob estados de tensão mais elevados, pelo contrário, tanto a deformabilidade da rocha como a das fracturas deve ser tomada em consideração. O método dos elementos finitos surge, neste contexto, como um instrumento apropriado, quer para a investigação da fenomenologia das obras, quer para o seu projecto de execução.

Nesta comunicação apresentam-se estudos paramétricos sobre a influência das superfícies de descontinuidade e estado de tensão inicial no comportamento de túneis em rocha. Comparam-se os resultados com soluções analíticas e numéricas relativas a meios contínuos, isotropos ou anisotropos. A ocorrência de cedência nas juntas, em consequência da redistribuição de tensões operada pela escavação, é analisada em termos de tensões e deslocamentos, investigando-se os coeficientes de segurança ao escorregamento ao longo das superfícies de descontinuidade.

## 2 — TUNEL CIRCULAR EM MACIÇO ROCHOSO COM UMA FAMÍLIA DE DIACLASES PREDOMINANTE

Numa perspectiva de investigação fenomenológica, foram efectuadas análises, admitindo condição de estado plano de deformação, de túnel de secção circular com 3 m de raio, descrevendo-se as características geométricas e mecânicas adoptadas nos nove estudos paramétricos realizados nas Figs. 1 e 2.

O túnel está localizado em formação sedimentar, estratificada, em que foi individualizada a família de descontinuidades correspondente à separação dos estratos, admitindo-se espaçamento constante e comportamento linear ou não-linear das descontinuidades. Quanto ao maciço entre superfícies de estratificação, foi considerado como meio contínuo e isotropo, com comportamento elástico. À tensão inicial vertical  $\sigma_v$  foi atribuído o valor de 2 MPa, correspondente a um recobrimento de 80 m, fazendo-se variar nos cálculos a relação  $\sigma_H/\sigma_v$ . Para além da influência do estado de tensão inicial, estudou-se também a variação da rigidez normal e tangencial das juntas, da sua coesão e ângulo de atrito e da deformabilidade do meio contínuo entre superfícies de estratificação. Por razões de simetria foi possível estudar apenas um quarto da estrutura, com utilização de uma malha de elementos finitos isoparamétricos de seis e oito pontos nodais, incluindo elementos de junta, num total de 423 elementos e 1116 pontos nodais. Determinaram-se os campos de deslocamentos, tensões principais e linhas de iguais tensões para todos os cálculos (Cunha, 1981).

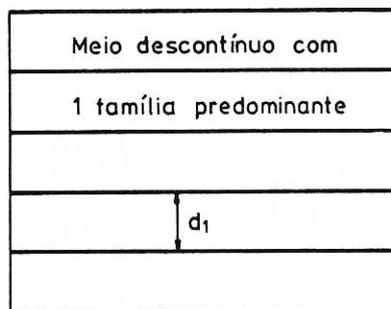
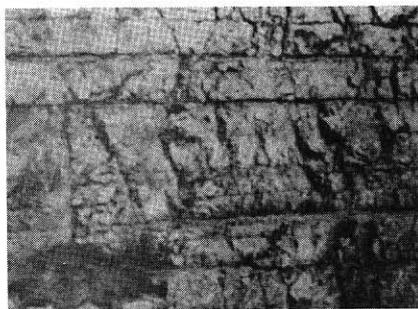


Fig. 1 — Formação sedimentar com uma família de descontinuidades predominante

CÁLCULO	ESTADO DE TENSÃO INICIAL $\lambda = \sigma_H / \sigma_V$	CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS DOS MEIOS					RELAÇÃO ENTRE DEFORMABILIDADES DO MACIÇO E DAS DESCONTINUIDADES
		CONTÍNUO	DESCONTINUIDADES				
		MÓDULO DE ELASTICIDADE E (MPa)	RIGIDEZ TANGENCIAL $K_T$ (MPa/m)	RIGIDEZ NORMAL $K_N$ (MPa/m)	COESÃO C (MPa)	ÂNGULO DE ATRITO $\psi$ (°)	
J1	1	$10^4$	$10^3$	$2,5 \times 10^3$	0	15	2000
J2	1	"	"	"	"	30	"
J3	1	"	"	"	0,15	15	"
J4	1	"	$2 \times 10^4$	$5 \times 10^4$	0	15	100
J5	3	"	$10^3$	$2,5 \times 10^3$	"	15	2000
J6	1/3	"	"	"	"	15	"
J7	1	"	$2 \times 10^6$	$5 \times 10^6$	"	15	1
J8	3	$10^3$	$10^3$	$2,5 \times 10^3$	"	15	200
J9	1	$10^3$	"	"	"	15	200

Fig. 2 — Características mecânicas adoptadas nos cálculos

Dado que a existência de uma família principal de descontinuidades confere ao maciço sedimentar um comportamento claramente orientado, comparam-se os resultados obtidos com os relativos a meios contínuos anisótropos, cujas características elásticas foram estabelecidas tendo em conta as propriedades mecânicas das juntas e da matriz rochosa. Os campos de deslocamentos e tensões relativos a estes meios contínuos, anisótropos e elásticos, equivalentes, quando comparados com os correspondentes meios descontínuos elásticos, mostram razoáveis semelhanças no que respeita ao padrão de tensões e deslocamentos (Cunha, 1981).

Na Fig. 3 apresentam-se, para a sequência de cálculos, a extensão e localização das zonas em que foi ultrapassada, nas superfícies de descontinuidade, a resistência ao corte, quantificada pela função linear de Coulomb. A cedência, dependente da posição das juntas relativamente ao túnel, apenas atinge as juntas II a VI, sendo máxima para as que se situam imediatamente acima e abaixo do fecho da abóbada (III e IV). A uma distância desta não superior ao raio do túnel, as descontinuidades acima do tecto comportam-se elasticamente para a totalidade das situações analisadas.

Pode observar-se, tendo em conta as características mecânicas adoptadas nos vários cálculos, que a extensão das juntas em que foi ultrapassada a resistência ao corte está relacionada com a variação da rigidez e resistência das juntas ou das propriedades da rocha e com a direcção da tensão principal máxima inicial. Assim, os deslocamentos nas fracturas e a extensão de cedência são maiores quando esta tensão máxima é paralela às fracturas. As zonas em cedência também aumentam quando a resistência das juntas diminui ou aumenta a sua rigidez (neste caso pela maior concentração de tensões nas juntas). Quando a rigidez das juntas é equivalente à deformabilidade da matriz rochosa, os escorregamentos nas fracturas são nulos (cálculo J7) embora a sua capacidade resistente possa ser excedida. A extensão das zonas em cedência aumenta das nascentes para o coroamento, onde a tensão máxima  $\sigma_\theta$  é paralela à família de fracturas, nelas provocando um incremento das tensões tangenciais.

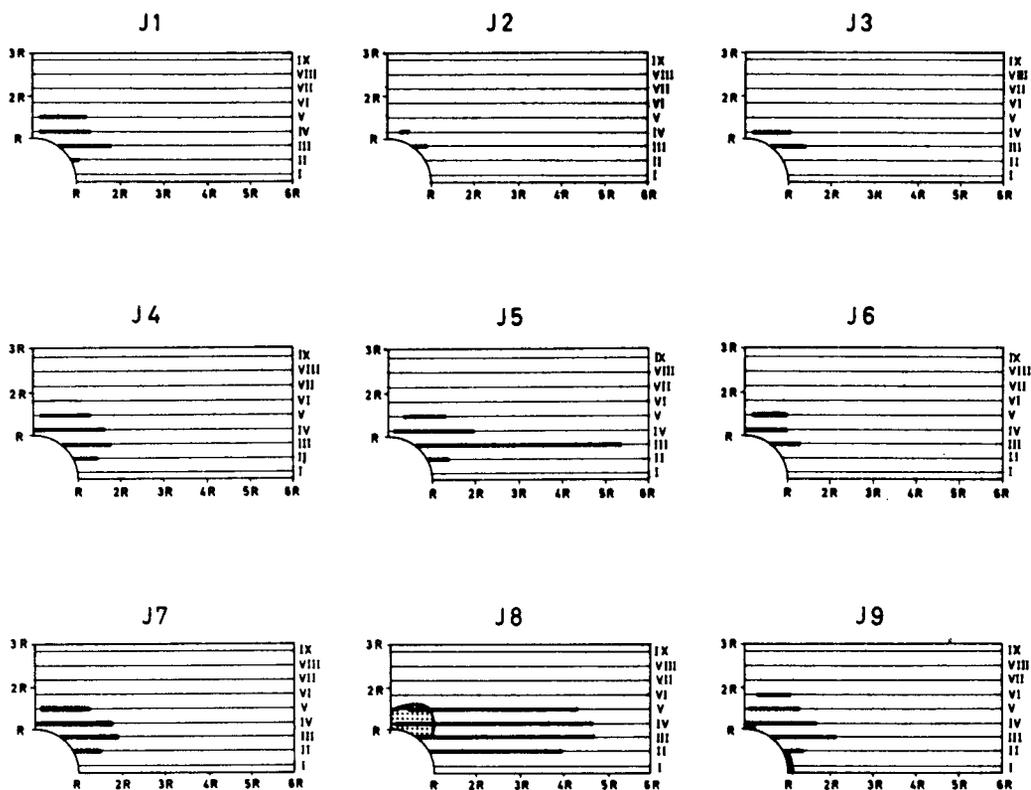


Fig. 3 — Zonas das fracturas em que foi ultrapassada a resistência ao escorregamento

Na Fig. 4 representam-se tensões e deslocamentos nas juntas III e IV, para os vários cálculos. Os deslocamentos aumentam à medida que a rigidez e resistência das discontinuidades diminui, isto é, à medida que aumenta o enfraquecimento introduzido pela presença das fracturas relativamente às propriedades da matriz rochosa. As diferenças são também fortemente influenciadas pela orientação das tensões iniciais. A situação mais desfavorável ocorre quando a tensão inicial máxima, paralela às fracturas (cálculos *J5*, *J8*) provoca um lento evanescimento das tensões tangenciais ao longo das mesmas e uma diminuição global do seu coeficiente de segurança ao deslizamento, conduzindo a um acréscimo na extensão das zonas onde a resistência ao escorregamento pode ser excedida e portanto a um aumento global dos escorregamentos. A tensão normal das fracturas não varia muito para as várias situações e os seus deslocamentos normais, acima do coroamento, são de abertura, associados a um efeito de flexão dos estratos, provocado pela escavação da secção. Tal flexão, determinando, por seu turno, um alívio da tensão normal, estabilizadora, nessas juntas, provoca a deterioração das suas condições de resistência ao escorregamento. Um efeito similar ou oposto, dependendo do facto de o escorregamento ser acompanhado de abertura ou fecho das juntas, seria provocado pelo efeito de dilatância. Aqui, todavia, as juntas foram consideradas não-dilatantes.

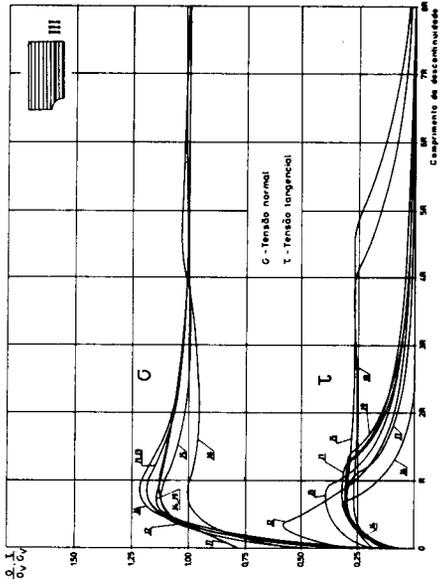
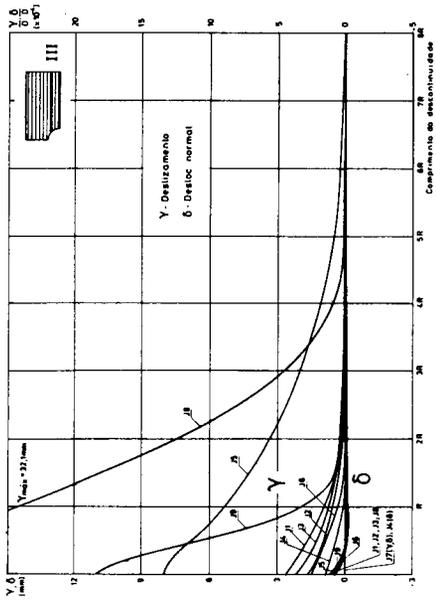
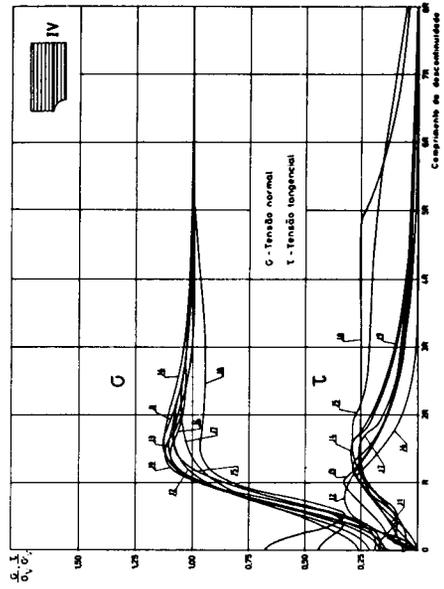
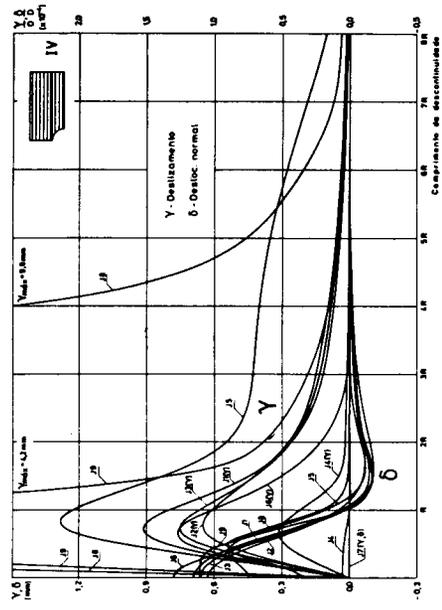


Fig. 4 — Deslocamentos e tensões normais e tangenciais (juntas III e IV)

A evolução do coeficiente de segurança pontual ao escorregamento para as várias juntas (cálculos J5, J6) é apresentada na Fig. 5, sendo a capacidade resistente das juntas estabelecida com base na envolvente linear de Coulomb. Verifica-se facilmente que, quando a tensão principal máxima inicial é paralela à família de fracturas, em virtude do lento evanescimento da tensão tangencial nas mesmas, o coeficiente de segurança aumenta mais lentamente com o afastamento da parede, função das características resistentes da junta e da sua posição relativamente à abertura.

Note-se que o facto de a capacidade resistente da junta ser pontualmente ultrapassada não determina necessariamente, nas condições geométricas do problema, o colapso do maciço rochoso — tal exigiria, fisicamente, a presença de outras fracturas que, intersectando-as, definissem blocos que, devido ao seu peso próprio e à presença da abertura, adquirissem uma efectiva possibilidade de movimento — mas pode determinar um significativo aumento dos deslocamentos, em contraponto ao comportamento elástico (aumentos de 10 vezes foram determinados).

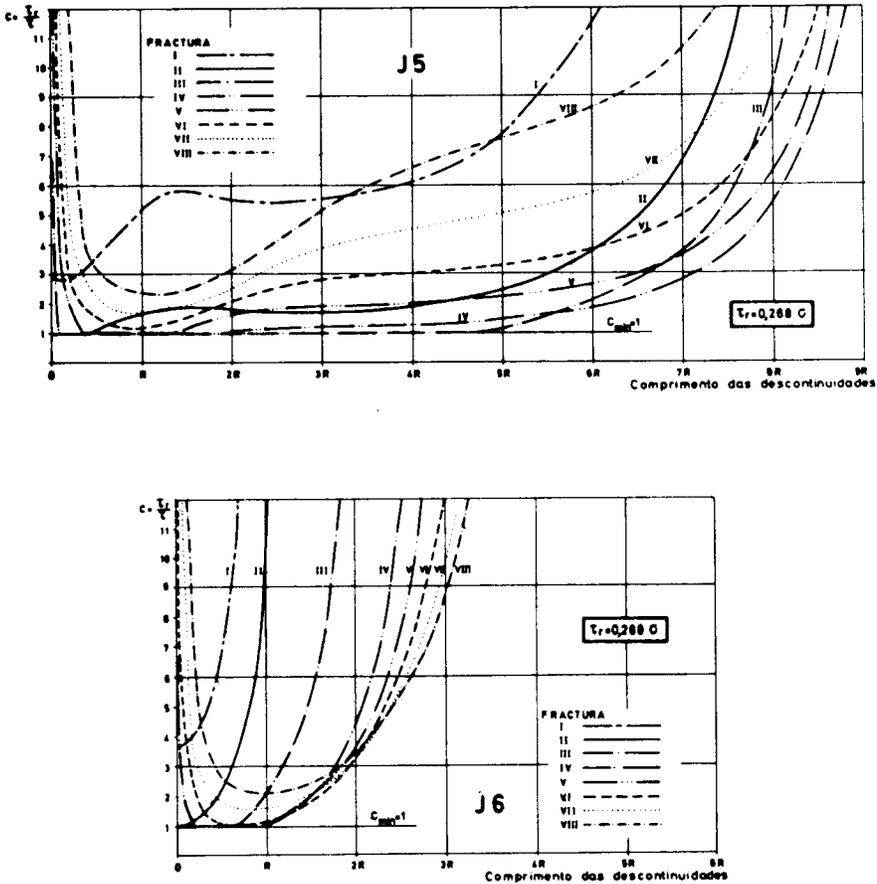


Fig. 5 — Coeficientes de segurança ao escorregamento nas juntas

Finalmente apresentam-se na Fig. 6 os deslocamentos de parede do túnel ( $u$  — horizontal,  $v$  — vertical,  $\delta_r$  — radial) para um quarto do perímetro circular ( $\theta=0^\circ$  — nascenças;  $\theta=90^\circ$  — coroamento) e comportamento linear e não-linear das descontinuidades (cálculos J5, J6). Estas curvas de deslocamentos ao longo de um quadrante são naturalmente descontínuas nos pontos de intersecção das fracturas existentes com a parede do túnel. A comparação entre os deslocamentos elásticos relativos a meio fracturado e os seus homólogos correspondentes ao meio contínuo anisotrópico equivalente revela, a menos dos efeitos singulares das fracturas, um andamento e amplitude muito semelhantes. As diferenças acentuam-se, naturalmente, nos casos em que as diaclases assumem comportamento não-linear, ou quando se comparam os deslocamentos relativos a modelo descontínuo com os de meio contínuo mas isotrópico, com as mesmas tensões iniciais e propriedades mecânicas iguais às da rocha do maciço. A relação entre os deslocamentos na parede para comportamento elastoplástico das descontinuidades e para meio isotrópico elástico atingiu valores elevados.

Por seu turno os deslocamentos, para comportamento elástico e elastoplástico das descontinuidades, apresentam um padrão semelhante, as diferenças de amplitude tanto maiores quanto maior a extensão das fracturas onde a resistência ao escorregamento é ultrapassada.

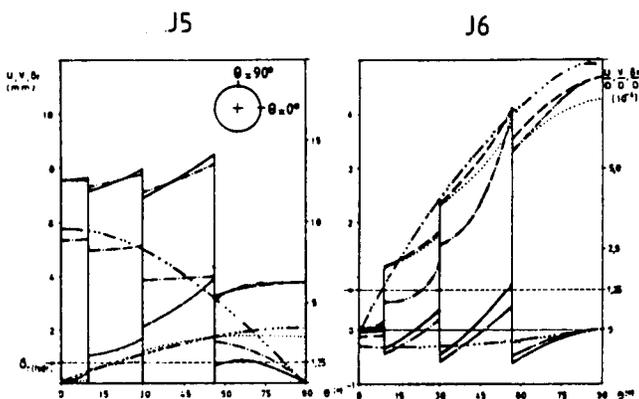


Fig. 6 — Deslocamentos na parede do túnel

### 3 — SECÇÃO CIRCULAR EM MACIÇO COM TRÊS FAMÍLIAS DE DIACLASES

Estuda-se, em equilíbrio plano, uma secção idêntica à anterior, num maciço rochoso ígneo em que ocorrem duas famílias de diaclases ortogonais entre si e ao plano da secção transversal, ambas supostas contínuas à escala da obra e com espaçamento constante (1 m). À presença de duas famílias associa-se, em regra, uma terceira família de importância semelhante, ortogonal às anteriores e, portanto, transversal ao eixo, pelo que a compartimentação do maciço em blocos paralelepípedicos, de dimensão inferior às da obra, originária, no caso do túnel, a possibilidade física de movimento dos blocos, sob a acção do peso próprio, embora contrariado pelo atrito com os blocos adjacentes.

Uma vez que o estudo cinemático dos blocos não é efectuado, a situação descrita ajusta-se melhor à análise do comportamento de um poço vertical em vez de um túnel, dado que, no primeiro caso, as duas famílias paralelas ao eixo passam a ser verticais e a terceira horizontal, deixando o peso de provocar a desarticulação do maciço.

Foram realizados dois cálculos, assumindo-se comportamento elástico para a rocha e não-linear para as fracturas. As tensões iniciais ( $\sigma_I = \sigma_{III} = 2 \text{ MPa}$ ) e as propriedades mecânicas adoptadas constam da Fig. 7. A simulação das descontinuidades é feita por elementos de junta constituídos por duas superfícies a distância nula, discretizadas por três pares de pontos nodais com idênticas coordenadas e os blocos materializados por elementos quadrangulares isoparamétricos com oito pontos nodais e funções interpoladoras do 2.º grau (Sousa e Teles, 1980).

As zonas das fracturas onde a resistência ao escorregamento é ultrapassada, em virtude da redistribuição de tensões operada pela escavação, são apresentadas na Fig. 8. Tal ocorre apenas numa extensão limitada, junto da abertura. Uma vez que as tensões iniciais são as mesmas para os dois cálculos (os quais diferem entre si pelo facto de em F1 as duas famílias de diaclases apresentarem propriedades mecânicas idênticas, e distintas no cálculo F2) os dois diagramas não são muito diferentes.

CÁLCULO	$G_I/G_{III}$	CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS DOS MEIOS								
		CONTÍNUO	FAMILIA PARALELA A $G_{III}$				FAMILIA PARALELA A $G_I$			
			E (MPa)	$K_T$ (MPa/m)	$K_N$ (MPa/m)	C (MPa)	$\Phi$ (°)	$K_T$ (MPa/m)	$K_N$ (MPa/m)	C (MPa)
F1	1	$10^4$	$10^3$	$2,5 \times 10^3$	0	15	$10^3$	$2,5 \times 10^3$	0	15
F2	1	$10^4$	$2 \times 10^4$	$5 \times 10^4$	0	15	$10^3$	$2,5 \times 10^3$	0	15

Fig. 7 — Parâmetros de cálculo

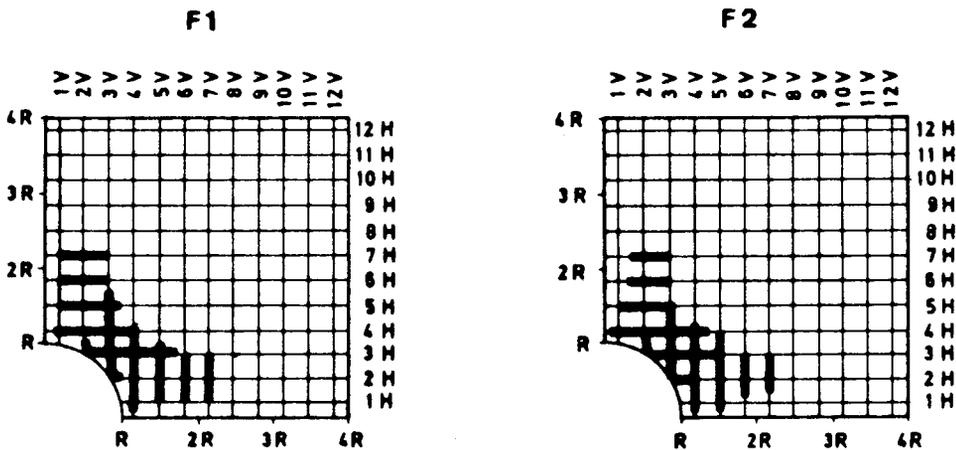
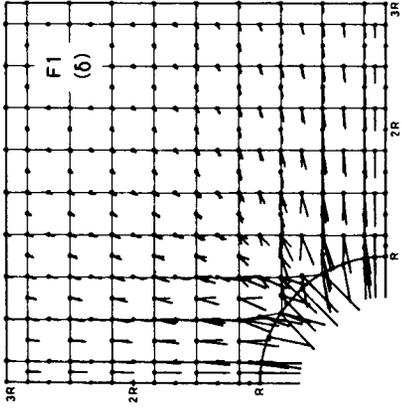
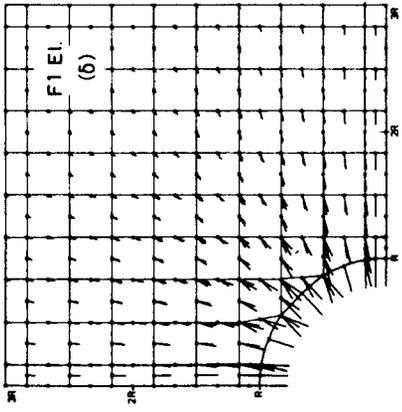
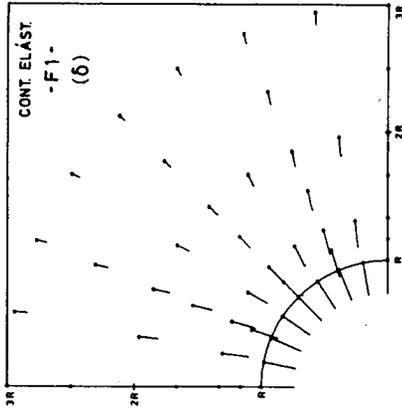


Fig. 8 — Zonas de cedência nas juntas



DESLOCAMENTOS



COMPONENTOS

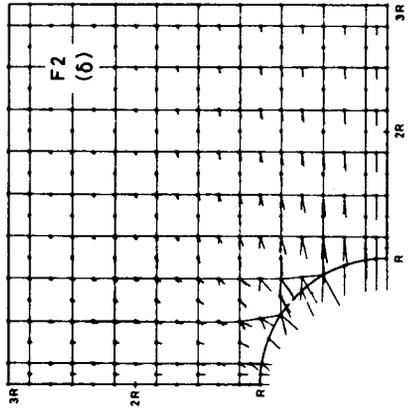
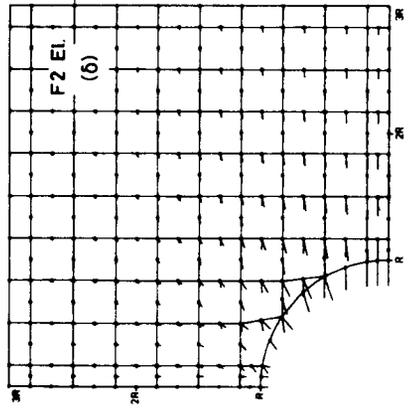
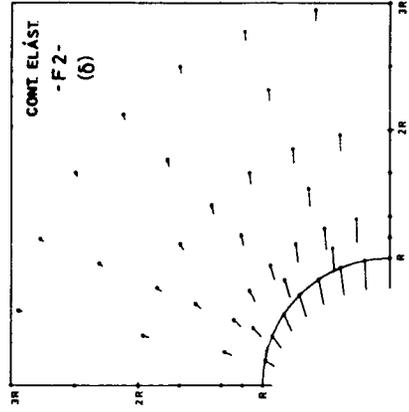


Fig. 9 — Deslocamentos nodais

Na Fig. 9 apresentam-se os deslocamentos nodais para os dois cálculos, que são comparados com os seus homólogos correspondentes a comportamento elástico das discontinuidades e ainda com as de um meio contínuo anisótropo equivalente, cujas características elásticas são obtidas tendo em conta a deformabilidade da rocha e da fracturação.

Para o cálculo F1, dado a isotropia da rocha e a deformabilidade idêntica das duas famílias, ressalta uma expressão uniforme dos deslocamentos ao longo do contorno da abertura sendo as diferenças de amplitude para F1 (el.) devidas à ocorrência de cedências nas fracturas, quando lhes é permitido comportamento não-linear, o mesmo acontecendo entre F2 e F2 (el.). É também visível uma redução na amplitude dos deslocamentos de F2 relativamente a F1, devido ao aumento de rigidez das juntas.

A comparação em deslocamentos entre os cálculos elásticos, relativos ao meio descontínuo e ao meio contínuo anisótropo equivalente, põe em evidência, mormente ao longo do contorno da secção, um padrão semelhante do campo de deslocamentos, quer em termos da sua evolução quer da sua amplitude.

Finalmente os deslocamentos na parede ( $u$  — horizontal,  $v$  — vertical) relativos a um quadrante ( $\theta = 0^\circ$  — nascenças,  $\theta = 90^\circ$  — coroamento) são apresentados na Fig. 10, quer para comportamento linear e não-linear das fracturas quer para o meio elástico anisótropo equivalente (contínuo). As curvas são descontínuas nas intersecções parede-fracturas, para as análises de meio descontínuo, sendo as diferenças de amplitude relativas a comportamento elástico e não-elástico consequência da maior ou menor extensão das juntas onde a resistência

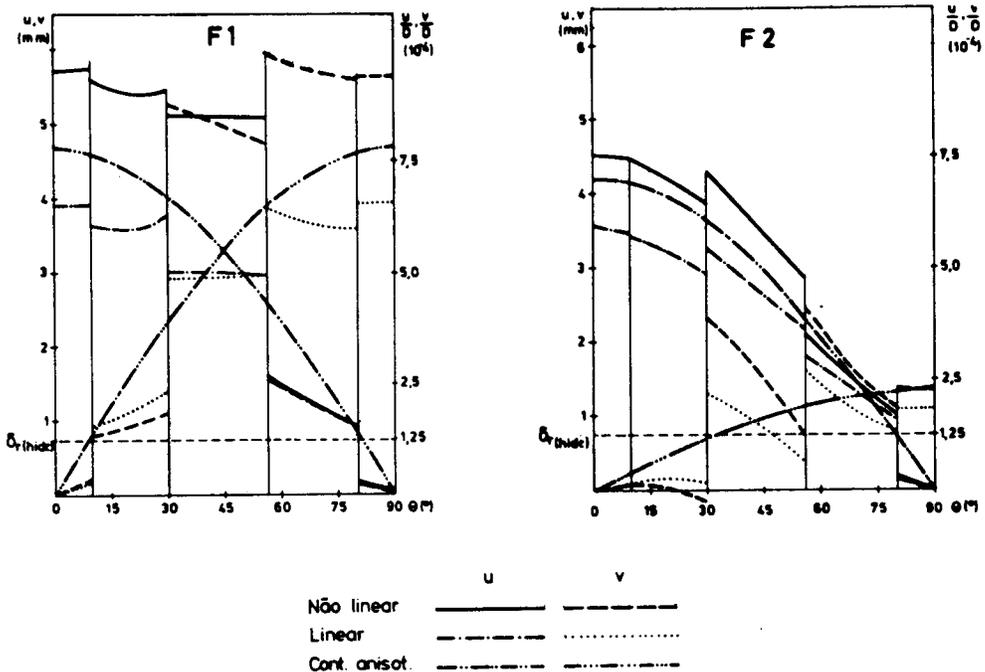


Fig. 10 — Deslocamentos no contorno da secção

ao escorregamento é ultrapassada, devido à escavação. Torna-se patente nesta figura como o modelo contínuo anisótropo equivalente fornece uma muito razoável aproximação do modelo elástico descontínuo em termos de deslocamentos. Pelo contrário, a comparação com um modelo contínuo isótropo, que apenas tenha em conta as propriedades da rocha, conduz a apreciáveis diferenças.

Uma comparação entre os cálculos apresentados neste capítulo e os seus homólogos para a mesma secção e maciço com uma única família de descontinuidades permitiria concluir que com o aumento do número de fracturas a sua influência individual nos deslocamentos da parede é atenuada, embora se registre um acréscimo global da deformabilidade do maciço devido à contribuição adicional trazida pelas fracturas.

#### 4 — CONCLUSÕES

A presença da fracturação induz um aumento global significativo da deformabilidade do maciço rochoso relativamente à rocha intacta e, na medida em que suprime a continuidade do maciço, acarreta uma distribuição de tensões nos blocos que pode ser muito diferente da existente no meio contínuo. As diferenças acentuam-se à medida que a rigidez e a resistência das superfícies de descontinuidade diminuem, isto é, à medida que se acentua o enfraquecimento relativamente à matriz rochosa, representado pelas fracturas.

As tensões e deslocamentos nas fracturas e o seu coeficiente de segurança ao escorregamento são função das características geométricas da abertura e da morfologia do maciço, assim como das propriedades mecânicas das próprias fracturas e da rocha e do estado de tensão inicial.

As representações de meio contínuo, elástico e anisotrópico dos maciços cujo comportamento é aproximadamente elástico, desde que tenham em consideração os modos de deformação de rocha e do sistema de fracturação, revelaram-se aceitáveis para previsão dos deslocamentos na vizinhança da parede de túneis, e portanto susceptíveis de utilização na estimação de necessidades de suporte ou interpretação de medições de convergência. A adequação da aproximação de meio anisótropo contínuo para previsão do comportamento deformacional dos maciços rochosos acentua-se à medida que a intensidade de fracturação aumenta e as suas características mecânicas enfraquecem.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CUNHA, A. P. (1981) — *Aplicação de modelos matemáticos ao estudo de túneis em maciços rochosos*. LNEC, Lisboa.
- CUNHA, A. P. (1987) — *Analysis of tunnel behaviour in discontinuous rock masses*. 6th ISRM Congress, Montreal.
- ROCHA, M. (1976) — *Estruturas subterrâneas*. LNEC, Lisboa.
- SOUSA, L. R.; TELES, M. M. (1980) — *Modelo de cálculo para o estudo de túneis pelo método dos elementos finitos*. LNEC, Lisboa.