

# ACERCA DO COMPORTAMENTO DE TÚNEIS NA VIZINHANÇA DA FRENTE DE ESCAVAÇÃO \*

## Analysis of advancing tunnels

por

A. PINTO DA CUNHA\*\*

**RESUMO** — Apresenta-se um estudo por elementos finitos da progressão de túneis de secção circular em maciço contínuo, com comportamento linear e não-linear, em situações de homogeneidade, heterogeneidade e anisotropia. Ênfase especial é dado ao estudo do atravessamento de um contacto entre duas formações com características mecânicas muito diferenciadas e da transposição de um acidente geológico com expressão geotécnica relevante. Debate-se a problemática da utilização de análises planas para o estudo do comportamento tipicamente tridimensional de túneis na vizinhança da frente de escavação.

**SYNOPSIS** — A finite element study of axisymmetric tunnels, advancing in linear and non linear continuous rock masses is described. Isotropic, anisotropic, homogeneous and non-homogeneous situations are considered. Advancing in the neighbourhood of a contact between two geological formations and the crossing of a geological fault are studied with some detail. The possibility of studying the three dimensional behaviour of advancing tunnels by 2D approaches is also discussed.

## 1 — INTRODUÇÃO

O equilíbrio junto da frente de escavação de um túnel, quaisquer que sejam o método de escavação e suporte adoptados, o estado de tensão inicial, o comportamento reológico do maciço escavado e a forma, dimensões e localização da obra, constitui paradigma de um equilíbrio de natureza tridimensional, cuja solução pode ser obtida por métodos numéricos, condicionada a validade da solução à natureza das aproximações introduzidas no modelo e à maior ou menor adaptação à realidade dos parâmetros considerados no cálculo. A extensão desta zona em equilíbrio tridimensional depende fundamentalmente das características mecânicas do maciço escavado e do suporte aplicado, sendo da ordem de poucos diâmetros para comportamentos reológicos que se possam considerar praticamente como independentes do tempo.

---

\* Versão portuguesa ampliada e actualizada de um trabalho apresentado ao 5.º Congresso da ISRM, Melbourne, 1983. A discussão está aberta por um período de três meses.

\*\* Eng.º Civil, Investigador Principal do LNEC.

Os estudos sobre a fenomenologia de túneis na vizinhança da frente de escavação, que ora se apresentam, fazem aplicação do método dos elementos finitos, cujas potencialidades o tornam particularmente adequado para o fim em vista, dada a sua versatilidade e a facilidade com que permite a representação de heterogeneidades, anisotropias e descontinuidades, de quaisquer reologias e estados de tensão inicial e a simulação de diferentes suportes e sequências construtivas.

Consideram-se túneis de secção circular, sujeitos a um estado de tensão inicial hidrostático e uniforme, isto é, escavados a profundidade suficiente para ser desprezável a variação do estado de tensão com a profundidade. O equilíbrio, mesmo na zona da frente, pode então ser considerado como axissimétrico, desde que a escavação se processe em secção total e qualquer heterogeneidade ou anisotropia do maciço envolvente, tal como qualquer suporte existente, respeitem idêntica condição de simetria.

Adopta-se para o maciço escavado uma representação de meio contínuo, aceitável para maciços terrosos e, também, para maciços rochosos, quando praticamente intactos ou, pelo contrário, intensamente alterados e fracturados. Atribuem-se ao maciço comportamentos lineares e não-lineares, do tipo elastoplástico e com resistência residual.

Investigam-se diversas situações de avanço de túneis em meio homogéneo e heterogéneo, isotrópico e anisotrópico, com ênfase especial para o atravessamento de um contacto com uma formação com características mecânicas precárias e a transposição de um acidente geológico com expressão geotécnica relevante.

## 2 — MODELO AXISSIMÉTRICO UTILIZADO

O modelo axissimétrico de elementos finitos utilizado foi desenvolvido no LNEC, tendo em vista, essencialmente, o estudo fenomenologia do avanço de túneis (Cunha, 1981). O modelo permite a simulação do avanço longitudinal por fases, mediante a desactivação em cada fase do conjunto de elementos relativos ao maciço que se situam na zona a escavar, efectuando-se por um processo de activação semelhante a instalação do suporte. Sempre que novos elementos são activados ou desactivados, origina-se uma nova estrutura, onde deixou de haver equilíbrio entre as forças correspondentes às solicitações aplicadas até à fase anterior e as devidas às tensões instaladas. O problema da não-linearidade geométrica é resolvido segundo uma via proposta por Ranken e Ghaboussi (1975), calculando-se em cada fase o acréscimo de deslocamentos correspondentes às forças não equilibradas existentes no início da fase e ao eventual incremento de solicitação associado à fase. Pode adoptar-se para os materiais comportamento linear (isotrópico ou transverso-isotrópico) ou não-linear (isotrópico), elastoplástico ou com resistência residual, sendo a solução numérica do processo não-linear obtida com recurso a técnicas iterativas e de tensões iniciais. Apenas são admitidas solicitações simétricas, limitando-se consequentemente as análises a situações de campo de tensões iniciais hidrostático e uniforme.

Na fig. 1, reproduz-se a malha de elementos finitos utilizada para análise das diversas situações aqui relatadas, a qual compreende 1492 elementos finitos isoparamétricos triangulares e quadrangulares, com um total de 1441 pontos nodais.

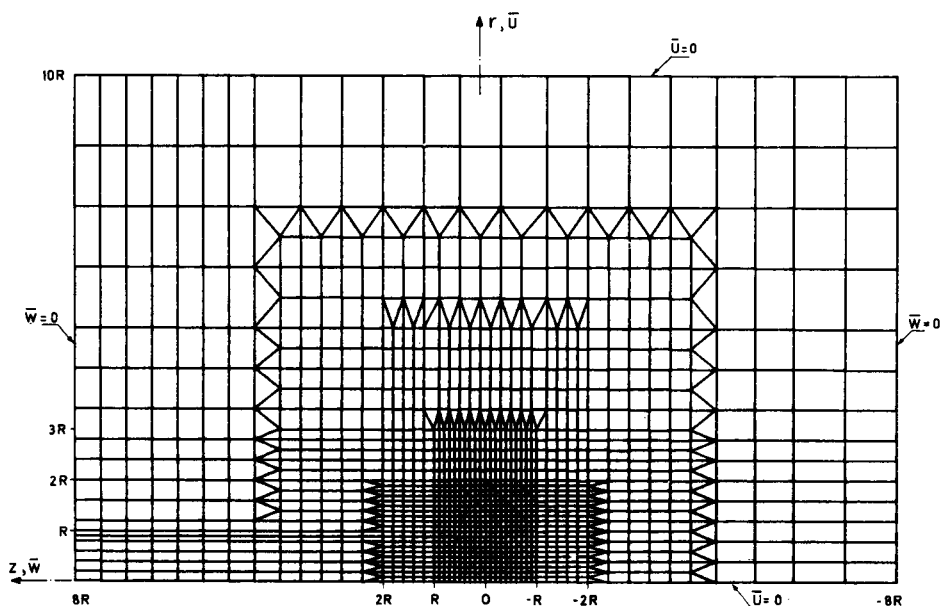


Fig. 1 — Malha de elementos finitos utilizada

### 3 — AVANÇO EM MACIÇO HOMOGÊNEO E ISOTRÓPICO

Constituiu objectivo deste estudo a definição de uma situação de referência para comparação com os cálculos subsequentes, relativos a situações mais complexas, envolvendo heterogeneidades, anisotropias e comportamentos não-lineares do maciço envolvente.

Considerando o maciço rochoso como homogêneo, isotrópico e elástico, com módulo de elasticidade  $E$ , e fazendo variar o coeficiente de Poisson ( $\gamma = 0,01; 0,25; 0,45$ ), simulou-se a escavação, numa só fase, de túnel circular de raio  $R$ , sem revestimento.

Na fig. 2, apresenta-se evolução dos deslocamentos radiais  $\delta_r$  e longitudinais  $\delta_z$ , tornados adimensionais com  $\delta_{r,0}$ , (deslocamentos radial máximo da parede) em secções transversais ao eixo, a distâncias crescentes da frente, na zona escavada e adiante da frente. A secção V, a 2 diâmetros da frente de escavação e, portanto, no limite da zona de influência desta, permite verificar a coincidência dos deslocamentos radiais máximos fornecidos pelo cálculo axissimétrico com os dados por soluções analíticas planas, enquanto a secção V', à mesma distância da frente, mas na zona não escavada, apresenta deslocamentos praticamente nulos (condição de maciço não perturbado).

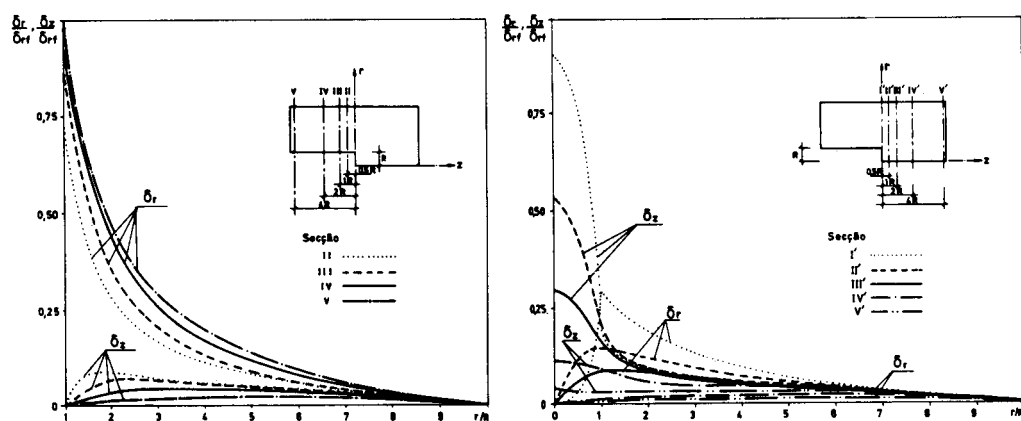


Fig. 2 — Deslocamentos elásticos, radiais e longitudinais, em secções transversais

Quanto aos deslocamentos longitudinais, máximos na frente (Secção I'), diminuem com o afastamento da frente, fora de cuja zona de influência tendem para zero (condição de estado plano de deformação).

Na fig. 3 reproduz-se, por sua vez, a evolução das tensões em secções transversais, à distância  $d/R$  da frente, na zona escavada. O exame sequencial da figura mostra uma gradual evolução do estado de tensão perturbado pela escavação até se atingir, no limite da zona tridimensional referida (secção V), condições de simetria entre  $\sigma_r$  e  $\sigma_\theta$ , relativamente à tensão inicial  $p_i$ , e  $\sigma_r + \sigma_\theta = 2 p_i$ ,  $\sigma_z = p_i$ ,  $\tau_{rz} = 0$  (correspondentes a estado plano de deformação).

Na fig. 4 representa-se, por seu turno, a evolução gradual das tensões em secções transversais adiante da frente, na parte não escavada, atingindo-se também no limite de dois diâmetros (secção V') condição de maciço não perturbado ( $\sigma_r = \sigma_z = \sigma_\theta = p_i$ ;  $\tau_{rz} = 0$ ).

No que respeita aos deslocamentos em secções longitudinais, apresenta-se na fig. 5 a evolução, com a distância à frente, dos deslocamentos radiais (normalizados com  $\delta_{rf}$ ) em quatro secções (1-4). A figura evidencia que os deslocamentos se começam a fazer sentir no maciço não escavado cerca de dois diâmetros adiante da frente (secção onde já se processaram cerca de 25% dos deslocamentos finais, os quais não podem ser detectados por medições de convergências) e atingem o seu valor assymptótico também cerca de dois diâmetros atrás da frente, correspondendo tal valor máximo na parede ao deslocamento  $\delta_{rf}$  da solução plana.

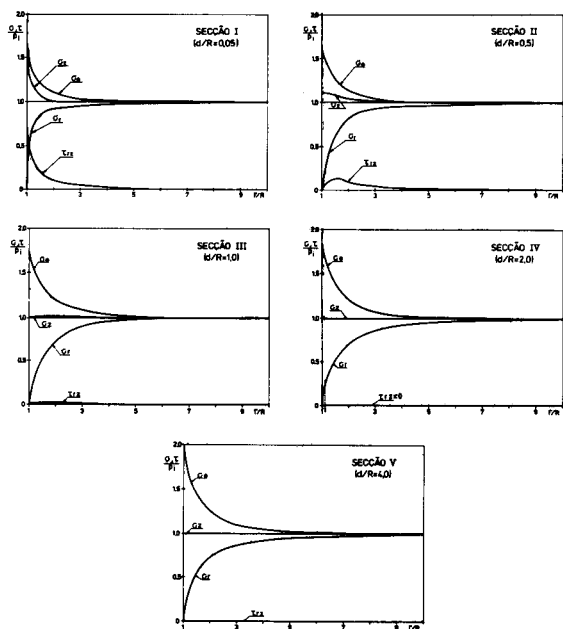


Fig. 3 — Tensões em seções transversais de túnel axissimétrico na zona escavada, em regime elástico

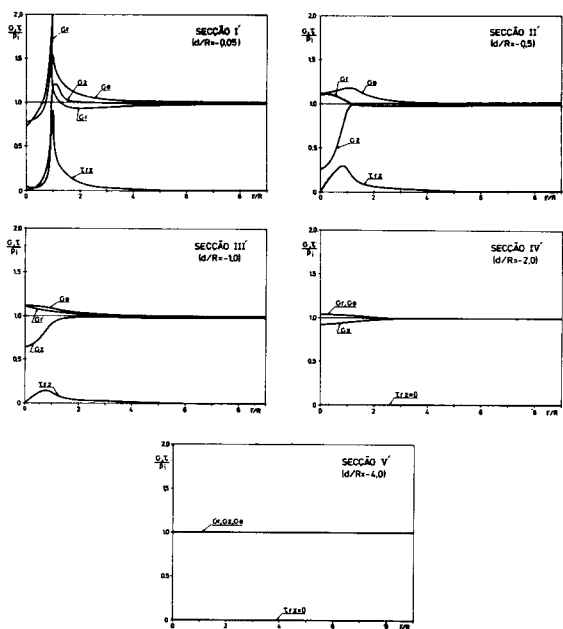


Fig. 4 — Tensões em seções transversais de túnel axissimétrico na zona não escavada, em regime elástico

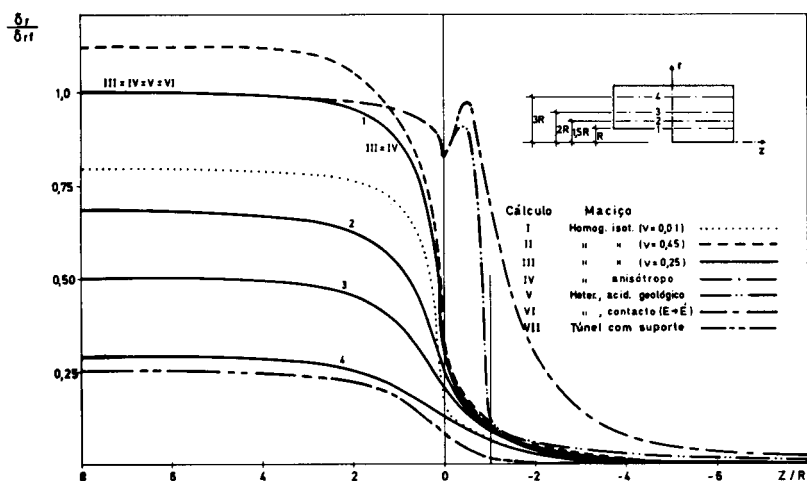


Fig. 5 — Deslocamentos radiais normalizados ao longo da parede e em secções longitudinais (comportamento elástico)

No que respeita aos deslocamentos longitudinais ao longo da parede, os quais são reproduzidos na fig. 6, atingem o valor máximo (cerca de 25% dos radiais) na parte não escavada junto da frente, sendo dirigidos, em virtude da escavação, no sentido da abertura criada. A figura permite entender ainda que, sendo os deslocamentos  $\delta_z$  praticamente nulos na parede escavada, se possa recorrer unicamente à análise dos deslocamentos radiais do maciço, para a conversão dos equilíbrios tridimensionais em planos e estabelecimento das condições de interacção entre maciço e suporte, de forma aproximada (ver capítulo 10).

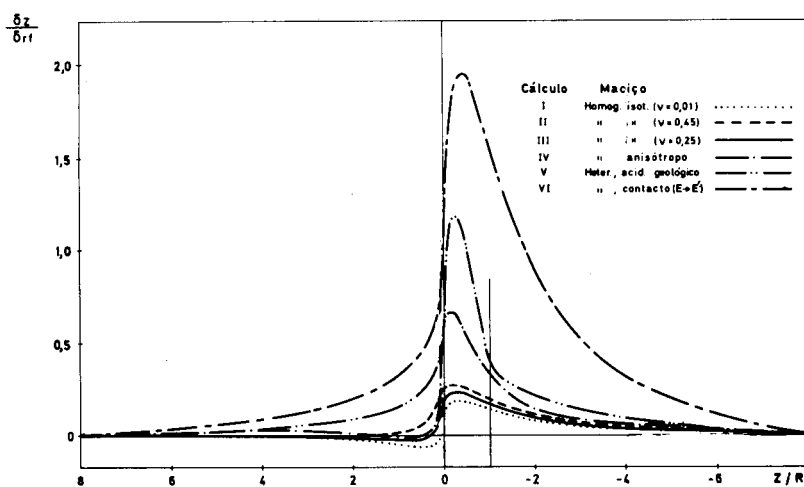


Fig. 6 — Deslocamentos longitudinais normalizados ao longo da parede (comportamento elástico)

O deslocamento  $\delta_z$  atinge porém o seu valor máximo na própria frente, sobre o eixo de simetria da estrutura, valor que é, como mostra o primeiro diagrama da fig. 7 (maciço isótropo), próximo do deslocamento radial máximo na parede.

A repetição do cálculo com o mesmo módulo de elasticidade e com novos valores do coeficiente de Poisson ( $\nu = 0,01; 0,45$ ) permitiu concluir que a distribuição de tensões não é significativamente afectada pelo valor de  $\nu$  na zona tridimensional de influência da frente, não o sendo, naturalmente, a partir daí, dado que se atinge quer condição de maciço não perturbado, quer condição de estado plano de deformação, em que a distribuição de tensões é independente das características elásticas. Quanto aos deslocamentos radiais, eles são naturalmente afectados pelo valor de  $\nu$  verificando-se (fig. 5) que os deslocamentos finais na parede escavada são proporcionais a  $(1 + \nu)$ . Por seu turno a variação do coeficiente de Poisson exerce pequena influência sobre os deslocamentos longitudinais (fig. 6 e 7) sendo que os  $\delta_z$  correspondentes aos três casos se sobrepõem praticamente.

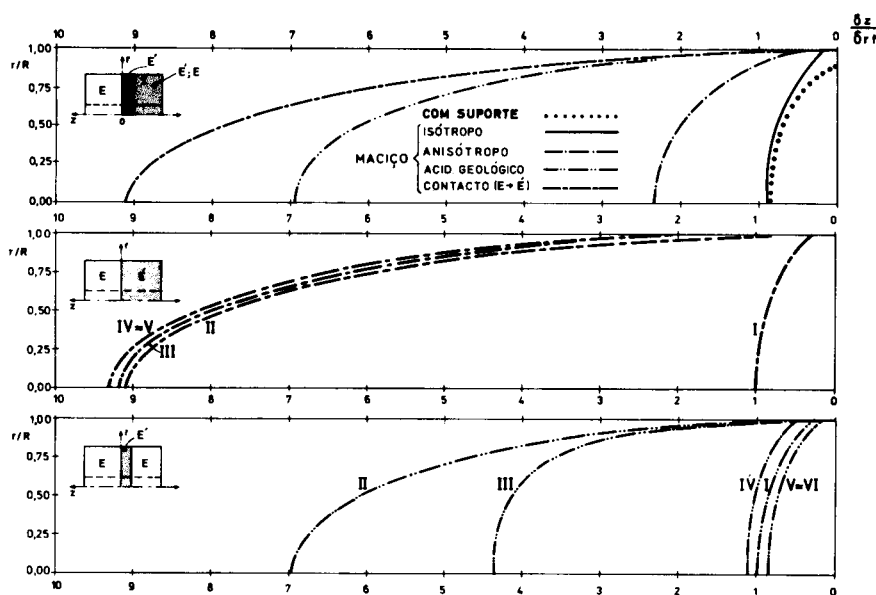


Fig. 7 — Deslocamentos longitudinais na frente (comportamento elástico)

#### 4 — AVANÇO EM MACIÇO HOMOGÊNEO E ANISÓTROPO

Considerou-se o maciço rochoso como transverso-isotrópico, com cinco constantes elásticas independentes, sendo o eixo de simetria elástica coincidente com o eixo do túnel. Esta situação corresponde a um maciço rochoso sedimentar com estratificação vertical e perpendicular ao eixo de avanço ou a um maciço xistoso em que a xistosidade coincide com a estratificação e ambas com a orientação referida.

No cálculo efectuado, com escavação numa só fase, atribuiu-se ao módulo de deformabilidade perpendicular aos estratos o valor  $E' = 0,25 E$ , que corresponde a um coeficiente de anisotropia de quatro e, consequentemente,  $\nu' = 0,25$ . A fim de estabelecer comparação com a situação isótropa referida na secção anterior, admitiu-se que o maciço conservava nos planos de estratificação ou xistosidade a mesma deformabilidade da situação de referência ( $E$ ;  $\nu = 0,25$ ).

No que respeita ao módulo de distorção, constante independente, tomou-se o valor do cálculo isótropo, o que corresponde a manter a distorção no plano *Orz* e, portanto, a uma variação mínima dos parâmetros de cálculo, relativamente à situação de referência.

A análise do campo de deslocamentos mostra, sobretudo, relativamente ao cálculo isótropo, significativo incremento dos deslocamentos longitudinais na frente e na zona adiante da frente (Cunha, 1983) — o que se explica pelo facto de a deformabilidade transversal ter sido mantida inalterada. A fig. 5 mostra, pela mesma razão, uma evolução dos deslocamentos radiais ao longo da parede praticamente coincidente com a de meio isótropo, enquanto que os deslocamentos longitudinais sofrem um aumento substancial na zona adiante da frente (fig. 6), o que é confirmado pela fig. 7, onde se apresentam os deslocamentos longitudinais da própria frente. Em termos de síntese, pode afirmar-se que, para situações de anisotropia do tipo considerado, o túnel manifesta ao longo da parede escavada um comportamento praticamente idêntico ao seu homólogo aberto em meio isótropo, e a frente de escavação, pelo contrário, um comportamento tanto mais diferenciado quanto maior o coeficiente de anisotropia do maciço.

## 5 — AVANÇO EM MACIÇO HETEROGÉNEO — TRANSPOSIÇÃO DE CONTACTO ENTRE FORMAÇÕES ROCHOSAS

Com o objectivo de estudar a influência da heterogeneidade do maciço, analisou-se o problema da transposição de um contacto vertical entre formações muito diferenciadas (penetração da frente num maciço com características mecânicas precárias).

Considerou-se a formação rochosa em que se encontrava a frente antes de atingir o contacto com módulo de elasticidade  $E$  e  $\nu = 0,25$  (idêntico à situação homogénea isótropa analisada anteriormente) e o novo maciço com  $E' = E/10$  e  $\nu' = \nu$ .

Apresenta-se na fig. 8 a evolução, para quatro sucessivas posições da escavação, dos deslocamentos na vizinhança da frente. Na fase I, ainda com a frente a um diâmetro do contacto, evidencia-se andamento praticamente idêntico ao do maciço homogéneo do capítulo 3. Na fase II, em que a frente atinge o contacto, nota-se uma explosão dos deslocamentos da frente e na zona adiante da frente onde se repercutem os efeitos da escavação, correspondente à deformabilidade dez vezes superior desta segunda formação, enquanto toda a parede, permanecendo na zona mais rígida, não apresenta variação apreciável, em termos de deformacionais, relativamente à situação homogénea de referência. No que respeita às fases seguintes (os avanços foram reduzidos ao entrar-se numa formação mais precária) estas evidenciam já troços da parede, junto à frente, na formação mais deformável, onde é visível um acréscimo brusco dos deslocamentos.



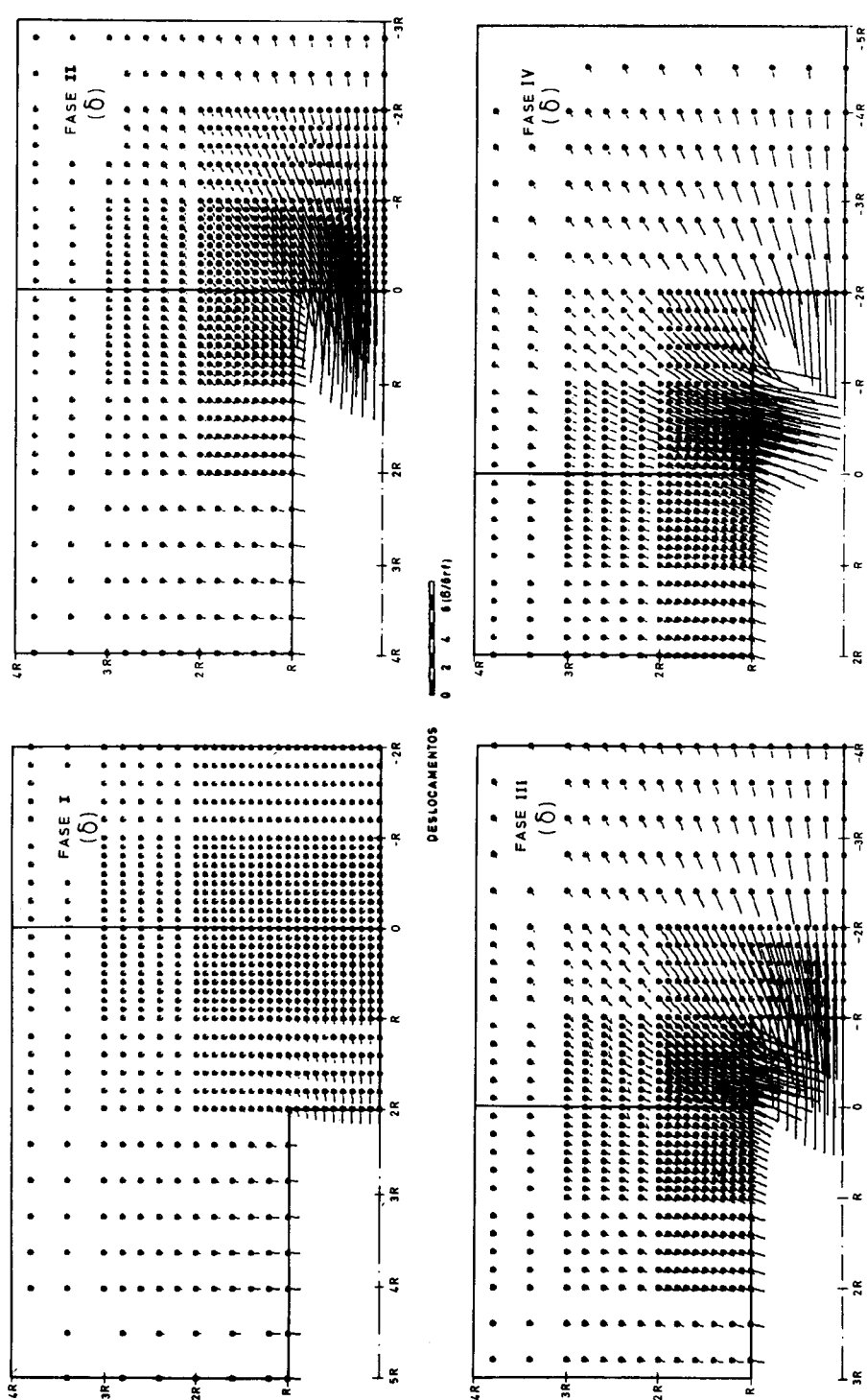


Fig. 8 — Evolução dos deslocamentos na vizinhança da frente (transposição de contacto entre formações)

Observa-se que o primeiro maciço funciona, relativamente à formação à direita, como um muro rígido que impede na sua vizinhança a expressão dos deslocamentos longitudinais da zona mais deformável, de que resulta o aspecto eminentemente radial dos deslocamentos nesta formação, na zona imediatamente junto do contacto.

Na fig. 5 acha-se reproduzida a evolução dos deslocamentos radiais na parede da abertura, quando a frente de escavação se encontra sobre o contacto (fase II). Evidencia-se apreciável aumento de  $\delta$ , na parte não escavada, relativamente à situação homogénea de referência, devido à muito maior deformabilidade do maciço adiante da frente, sendo contudo os deslocamentos  $\delta$ , travados, ao entrar-se na formação mais rígida, por forma tal que os valores assintóticos são iguais aos da situação de maciço homogéneo com módulo  $E$  (curvas VI e III).

Também na fig. 6 os deslocamentos longitudinais na parede, na fase II (curva VI), revelam, relativamente à situação homogénea de referência, um acréscimo substancial no sentido da escavação, na zona adiante da frente, o que corresponde à deformabilidade da nova formação envolvida. Por seu turno no diagrama superior da fig. 7 apresentam-se os deslocamentos longitudinais no contorno da frente, quando esta se situa sobre o contacto. A deformação da frente é praticamente influenciada apenas pela deformabilidade da segunda formação, pelo que, relativamente à situação homogénea do maciço com módulo  $E$ , o deslocamento é cerca de dez vezes superior.

No diagrama intermédio da fig. 7 apresenta-se ainda uma análise comparativa dos deslocamentos da frente no final de cada uma das fases de escavação, ressaltando que o deslocamento da fase I é praticamente igual ao da situação homogénea de referência ( $E$ ,  $\nu$ ), isto é, pouco afectado pela maior deformabilidade da segunda formação, enquanto que os deslocamentos das fases II, III e IV são, praticamente, idênticos entre si e correspondem a cerca de dez vezes os deslocamentos do meio homogéneo inicial, com módulo  $E$ , ou seja, variam com o inverso do módulo de elasticidade das formações.

Finalmente na fig. 9 a evolução, fase a fase, dos deslocamentos radiais da parede revela que o valor assintótico destes corresponde, na formação inicial, ao valor  $\delta_f$  do meio homogéneo com características elásticas ( $E$ ,  $\nu$ ) muito embora os  $\delta$ , tenham atingido na segunda formação, dez vezes mais deformável, uma amplitude coerente com as características deste meio. Resulta assim que a aproximação de uma formação de pior qualidade, sendo o contacto perpendicular ao eixo do túnel, não é claramente denunciada por um acréscimo das convergências, mesmo que medidas junto à frente, senão depois de se entrar na própria formação com qualidades precárias, isto é, o maciço não avisa antecipadamente da deterioração súbita das suas características, quando se realizam medições de convergência no interior da escavação (Cunha, 1983).

## 6 — AVANÇO EM MACIÇO HETEROGÉNEO — TRANSPOSIÇÃO DE ACIDENTE GEOLÓGICO

Uma outra situação de heterogeneidade com muito interesse é a que respeita ao avanço de um túnel de secção circular na vizinhança de um acidente geológico (falha ou zona de esmagamento), com atitude vertical e perpendicular ao eixo do túnel, e constituído por material com características mecânicas precárias.

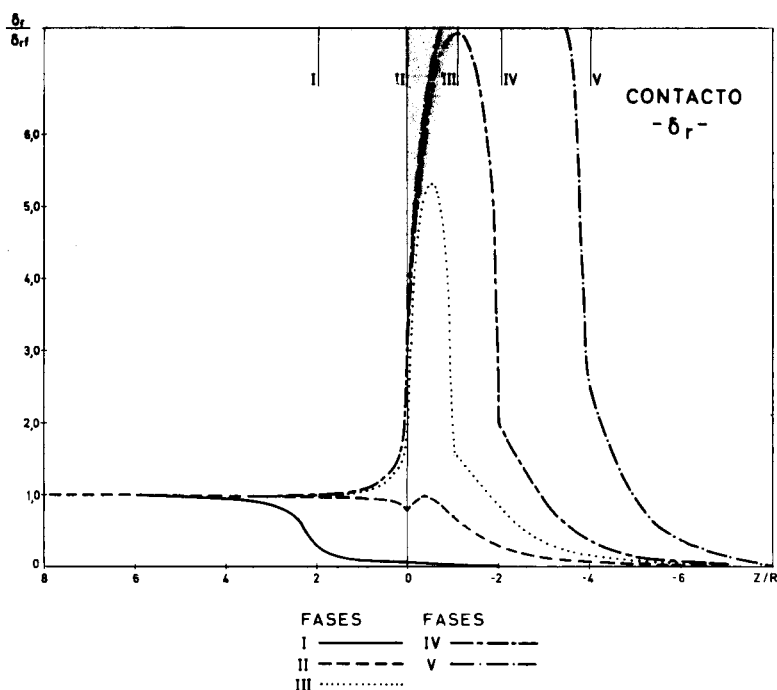


Fig. 9 — Deslocamentos na parede de túnel circular na transposição de contacto entre formações

Admitiu-se para a zona altamente deformável uma espessura igual ao raio do túnel,  $\gamma = 0,25$  e um módulo de elasticidade  $E' = E/10$  sendo  $E$  o do maciço adjacente. A transposição do acidente foi efectuada em seis avanços sucessivos, com comprimentos adequados à natureza dos maciços encontrados. Na fig. 10, retrata-se o campo de deslocamentos, na vizinhança da frente, para as seis fases. Para a fase I (frente à distância de um diâmetro da falha) os deslocamentos apresentam uma expressão praticamente análoga à do meio homogêneo inicial, onde se encontra a frente. Na fase II, assiste-se a um acréscimo intenso dos deslocamentos da frente, enquanto a parede, permanecendo na zona mais rígida, não revela incremento significativo dos deslocamentos. Esta circunstância evidencia, consequentemente, a dificuldade de se detectar a aproximação de acidente geológico que ocorra bruscamente, através da medição de convergências no interior da abertura, ainda que junto à frente.

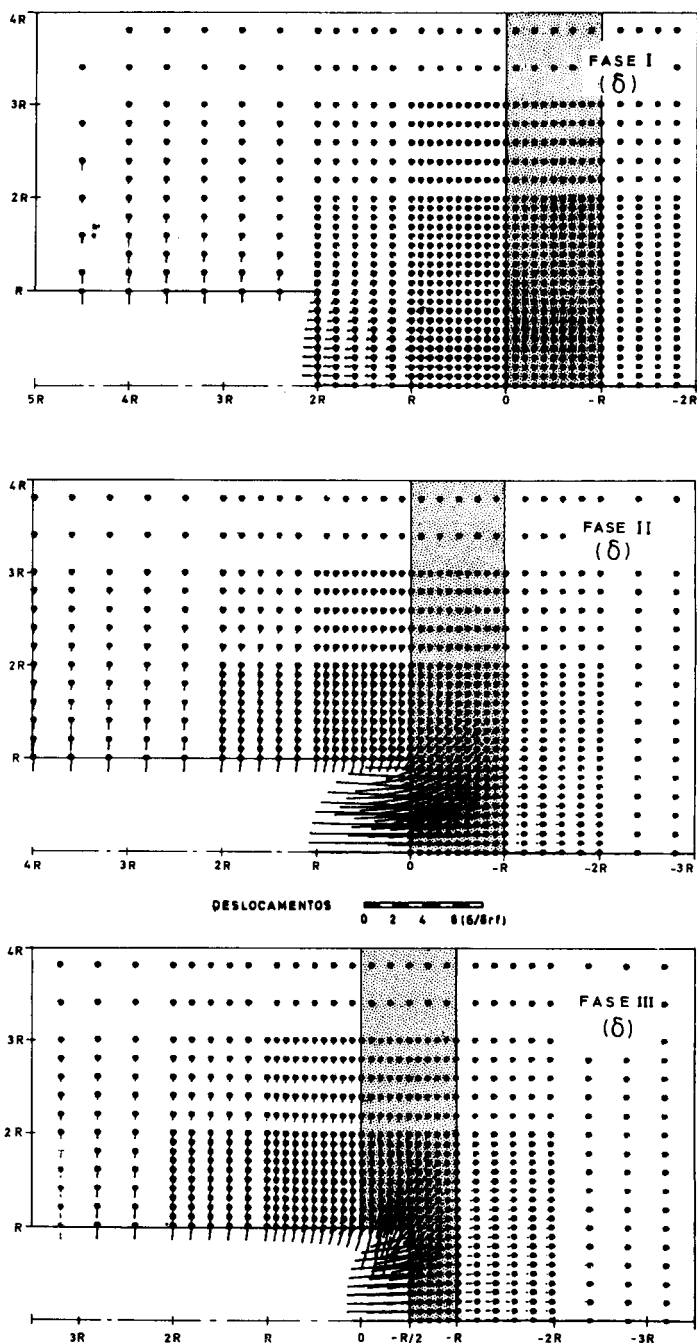


Fig. 10 — Evolução dos deslocamentos na vizinhança da frente na transposição de acidente geológico

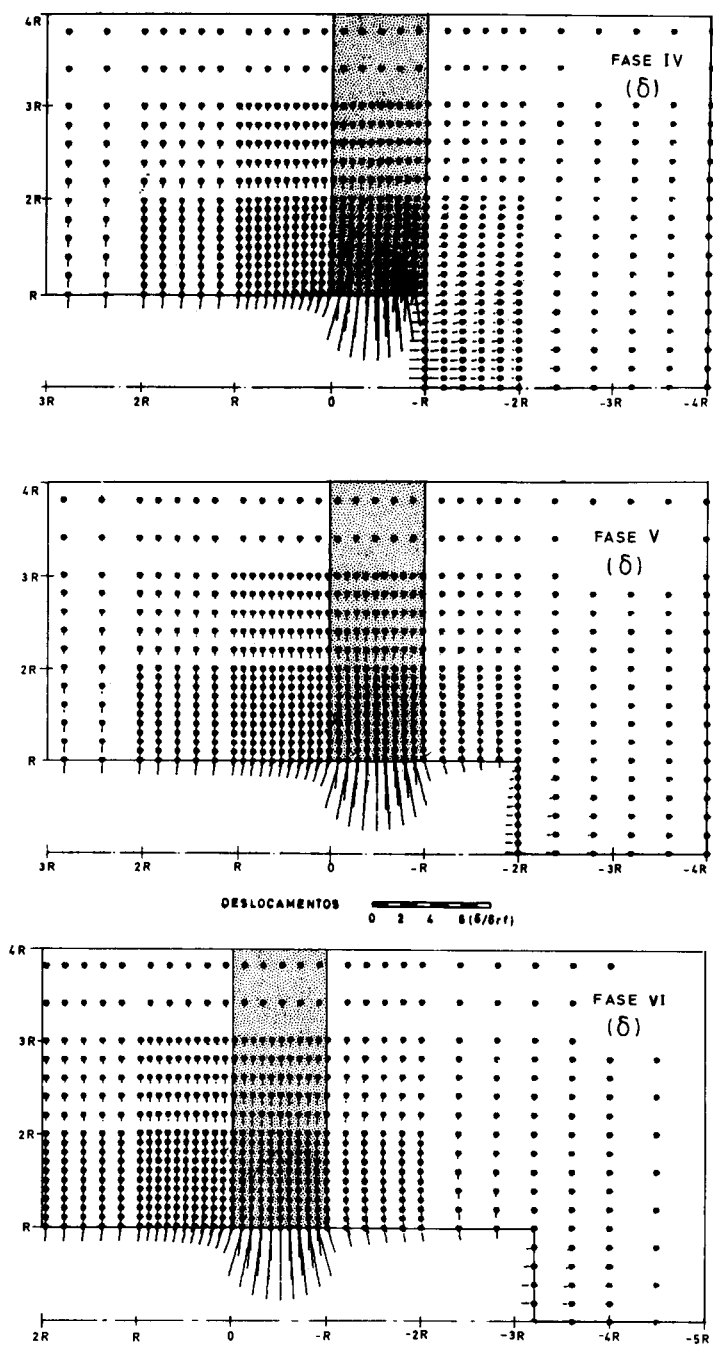


Fig. 10 — (continuação)

Ao longo dos avanços seguintes, quer a frente quer a parede manifestam uma expressão de deslocamentos variando de acordo com a deformabilidade dos meios em que se situam.

Desse facto decorre a significativa expressão visual em forma de leque dos deslocamentos na parede na zona do acidente transposto, sugerindo a deformada de uma viga apoiada nas suas extremidades — as zonas rígidas adjacentes.

Na fig. 11 apresentam-se os deslocamentos radiais da parede para as sucessivas fases de avanço, notando-se que os valores assintóticos dos deslocamentos, para um e outro lado do acidente, tendem para o valor máximo compatível com o módulo de elasticidade do meio homogéneo adjacente à zona muito deformável. Por seu turno os valores máximos de  $\delta_r$  nesta zona não chegam, dada a sua largura restrita, a atingir os valores máximos característicos deste meio, embora apresentem um considerável incremento.

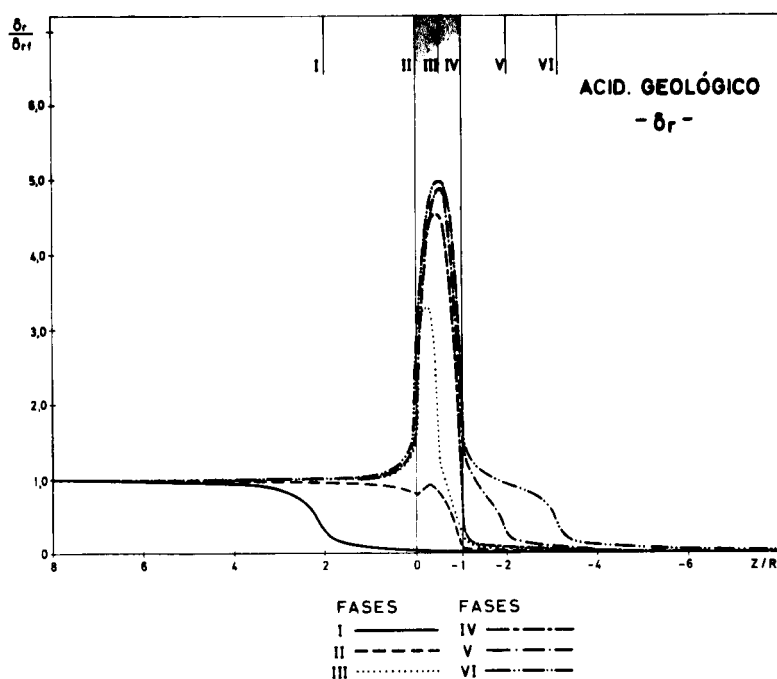


Fig. 11 — Deslocamentos na parede de túnel circular na transposição de acidente geológico

Nas figs. 5 e 6 são ainda apresentados os deslocamentos radiais e longitudinais da parede para a fase II, com distribuições espaciais que corroboram na íntegra as conclusões anteriores. Em ambas as figuras a amplitude máxima dos deslocamentos, verificada, naturalmente, na zona mais deformável, não chega a atingir a expressão máxima correspondente a um túnel da mesma secção aberto neste meio e o mesmo se passa quanto aos deslocamentos da frente (fig. 7).

O diagrama inferior desta figura, onde se representam os deslocamentos da frente para as várias fases do cálculo, evidencia uma apreciável semelhança quanto aos deslocamentos correspondentes às fases I e IV, V, VI, tendendo para a deformação característica do meio homogéneo onde se situa, nessas fases, a frente de escavação. À fase II, em que todo o acidente geológico contribui para a deformação da frente, corresponde a deformabilidade máxima (embora inferior à de um meio homogéneo com  $E' = 0,1E$ ) e à fase III, logicamente, uma situação intermédia.

## 7 — AVANÇO COM COLOCAÇÃO DE SUPORTE JUNTO À FRENTE

Considerando o maciço isótropo, homogéneo e elástico (módulo de elasticidade  $E$ ), estudou-se o efeito da colocação de um suporte anelar de betão, na vizinhança da frente de escavação de um túnel de raio  $R$ , sujeito a estado inicial de tensão uniforme e hidrostático  $p_i$ . Admitiu-se para o suporte espessura  $e = 0,1R$  e comportamento elástico, com um módulo de elasticidade  $E_s = 20E$ , de modo a acentuar o efeito da instalação do suporte, relativamente à situação de túnel não revestido. A relação entre módulos de elasticidade adoptada corresponde, para um valor comum  $E_s = 20\,000$  MPa, a atribuir-se ao maciço envolvente  $E = 1000$  MPa, o que identifica um maciço rochoso de baixa resistência, alterado e fracturado, e portanto correspondendo à representação contínua adoptada.

Considerou-se a colocação do suporte imediatamente junto da frente, com o objectivo de maximizar as cargas no mesmo.

A análise das figs. 5 (deslocamentos radiais da parede) e 7 (deslocamentos longitudinais da frente) permite concluir que a colocação do suporte reduz acentuadamente os deslocamentos do maciço em torno da parede, enquanto a frente de escavação, muito menos influenciada pelo suporte, continua a manifestar deslocamentos apreciáveis, com valores máximos pouco inferiores aos do túnel não revestido.

Com a colocação do suporte reduz-se neste caso também a cerca de um diâmetro, para cada lado, a extensão da zona tridimensional na vizinhança da frente, em que se fazem sentir os efeitos da escavação.

Em termos de esforços no suporte, tem-se que são desprezáveis os momentos flectores no mesmo, dada a natureza do estado de tensão inicial considerado no cálculo e o facto de o suporte anelar aplicado corresponder, pela sua relação  $e/R$ , à condição de tubo cilíndrico de parede fina. Quanto ao esforço normal  $N$ , ele pode ser calculado em cada elemento do suporte por  $N = \int_0^e \sigma_\theta de = \sigma_\theta \times e$ , dada a pequena espessura.

A fig. 12 reproduz a evolução, com a distância à frente, do esforço normal  $N$  no suporte, expresso adimensionalmente em valores de  $p_i \times R$ . Da figura ressalta que  $N$  cresce gradualmente, desde um valor mínimo, junto à frente, até um valor máximo, atingido nos limites da zona tridimensional de influência da frente de escavação, a qual não excede, como se viu, um diâmetro.

Os resultados do cálculo efectuado mostram que a pressão  $p$  de interacção na zona estabilizada, fora da influência da frente, se pode obter a partir do valor de  $\sigma_\theta$  no suporte, pela conhecida expressão, relativa a cilindros de parede fina  $p = e \sigma_\theta / R$ .

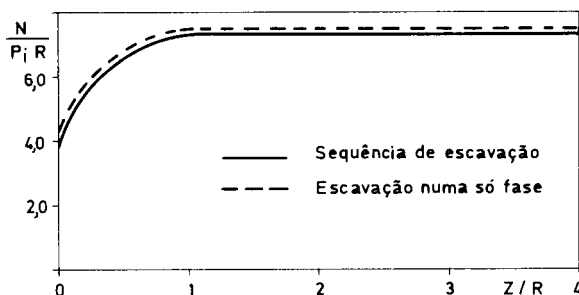


Fig. 12 — Evolução do esforço normal no suporte com a distância à frente

## 8 — MACIÇO COM COMPORTAMENTO NÃO-LINEAR

A fim de estudar a influência da não-linearidade física do maciço envolvente sobre o comportamento, na vizinhança da frente, de túnel circular não revestido, em maciço homogéneo e isótropo, considerou-se sucessivamente o maciço como elastoplástico e com resistência residual, e compararam-se os resultados obtidos com os relativos a comportamento elástico.

Na fig. 13 é apresentado o evanescimento dos deslocamentos radiais com a distância à parede, em secções transversais ao túnel, para os comportamentos lineares e não-lineares admitidos.

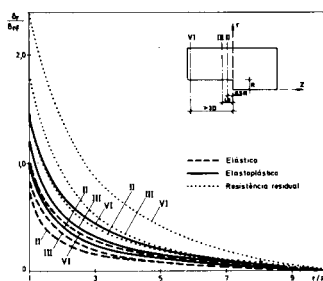


Fig. 13 — Evolução dos deslocamentos com a distância à parede, em secções transversais ao túnel, para comportamento linear e não-linear



A figura evidencia um acréscimo gradual dos deslocamentos radiais, para cada tipo de comportamento do material, com a distância da frente a que se encontram as secções consideradas, e, para cada secção, um incremento dos deslocamentos, acompanhando o decréscimo das características resistentes do material do maciço, desde o comportamento elástico até ao comportamento com queda brusca de resistência (residual).

A fig. 14 reproduz a distribuição de tensões na parede e em secções concêntricas, para regime elastoplástico. Dado que não existe revestimento, tem-se ao longo da parede escavada  $\sigma_r = 0$ . As maiores diferenças, relativamente ao regime elástico, dizem respeito à evolução de  $\sigma_\theta$  (Cunha, 1981).

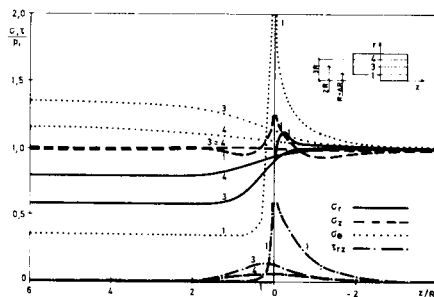


Fig. 14 — Tensões na parede e em secções longitudinais de túnel circular (comportamento elastoplástico)

A comparação entre os deslocamentos radiais ao longo da parede mostra (fig. 15) um significativo incremento da amplitude dos deslocamentos, com o agravamento de características mecânicas correspondente aos três tipos de comportamento reológico considerados.

Conquanto muito diversa a amplitude dos deslocamentos  $\delta_r$ , eles têm, se expressos adimensionalmente para cada curva, em função do respectivo deslocamento máximo  $\delta_{r0}$ , valor muito semelhante, para cada ponto da parede, definido pela sua distância  $Z$  à frente, o que permite alargar a comportamentos não-lineares a metodologia pseudotridimensional da determinação aproximada da interacção maciço-suporte pelo método das curvas características, que será abordada em próximo capítulo.

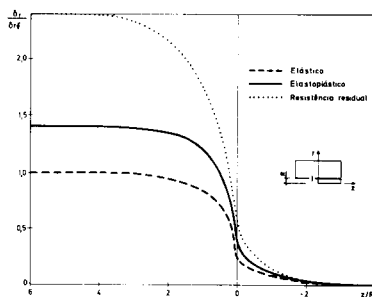


Fig. 15 — Deslocamentos radiais normalizados ao longo da parede (comportamento elástico, elastoplástico e com resistência residual).

## 9 — SÍNTESE DE ESTUDOS SOBRE O COMPORTAMENTO DE TÚNEIS NA VIZINHANÇA DA FRENTE

O estudo do complexo comportamento de túneis na vizinhança da frente de escavação tem sido abordado por diversos autores. Assim, Daemen e Fairhurst (1972) apresentam, pela primeira vez, com base num cálculo axissimétrico por elementos finitos, a curva de evolução dos deslocamentos longitudinais com a distância à frente, para estado de tensão hidrostático, realçando o facto de uma parcela importante dos deslocamentos associados à escavação ocorrer, numa dada secção, antes de a frente de escavação atingir essa mesma secção.

Em 1974, Descoedres apresenta no 3.º Congresso da ISRM os primeiros resultados sobre o campo de deslocamentos associado à frente de escavação, para estado de tensão não-hidrostatico, mediante a utilização de um modelo tridimensional de elementos finitos (embora, por razões de capacidade computacional, perfeitamente compreensíveis para a época, a discretização utilizada deixasse muito a desejar).

Ranken e Ghaboussi (1975) efectuaram, por sua vez, uma análise paramétrica bastante extensa, envolvendo comportamentos lineares e não-lineares, do equilíbrio de túneis junto à frente de avanço, recorrendo a um modelo de cálculo axissimétrico de elementos finitos.

No LNEC, é a vez de Cunha (1981) consagrar um capítulo da sua tese à análise do comportamento de túneis na vizinhança da frente de escavação. Os seus trabalhos são de algum modo prosseguidos por Lopes (1989), que desenvolvendo um novo programa axissimétrico, que contempla a representação de solicitações não-simétricas por meio de harmónicas, apresenta na sua dissertação de Mestrado resultados de muito interesse, no que respeita à descrição do equilíbrio na vizinhança da frente, para estado de tensão não-hidrostatico. Na fig. 16 apresentam-se resultados obtidos por esta autora relativamente aos deslocamentos na parede em planos horizontal ( $\theta = 0$ ) e vertical ( $\theta = 90^\circ$ ) para diversos valores de  $K = \sigma_H / \sigma_v$ . Observa-se que tensões horizontais iniciais muito elevadas ( $K = 3$ ) provocam não só deslocamentos radiais importantes no plano horizontal mas chegam mesmo a inverter o sentido dos deslocamentos radiais no plano vertical, os quais acusam divergências em vez das convergências habituais.

## 10 — CONVERSÃO DO EQUILÍBRIO TRIDIMENSIONAL EM PLANO

Dadas as limitações inerentes à realização de análises tridimensionais para estudo do comportamento de túneis, julga-se oportuna uma reflexão sobre o significado e o interesse da efectivação de análises bidimensionais como alternativa para o estudo do comportamento destas estruturas.

Para o maciço homogéneo, túnel circular escavado em secção total, sem revestimento, e estado inicial de tensão hidrostático, foi demonstrado (Cunha, 1981) que as soluções analíticas e numéricas planas retratavam, de forma muito aproximada, o equilíbrio final, atingido em

secções fora da zona de influência da frente. No caso de haver lugar à colocação de suporte, o equilíbrio final depende, porém, das características deste e da distância à frente a que é colocado, tornando-se necessária a definição de uma via que permita representar mediante análises planas, e ainda que de forma aproximada, a influência do momento de colocação do suporte. A metodologia proposta por Rocha (1976) para dimensionamento do suporte em túneis de secção circular e maciço elástico, e que consiste em relacionar a distância à frente  $d$  a que é feita a colocação deste com os deslocamentos  $\delta_d$  ocorridos no maciço antes da colocação, através da curva de deslocamentos radiais na parede ao longo do avanço, expressa de forma adimensional em termos do deslocamento  $\delta_f$  final —  $\frac{\delta}{\delta_f} = g\left(\frac{d}{D}\right)$  — onde  $D$  representa o diâmetro, afigura-se ainda adequada.

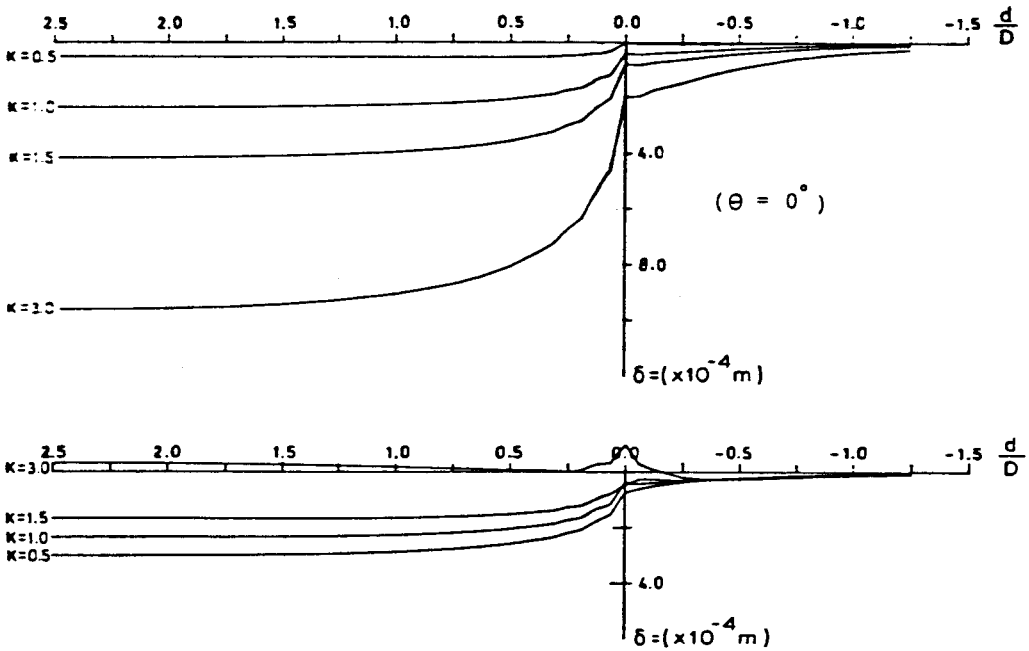


Fig. 16 — Deslocamentos na parede do túnel ( $\theta = 0^\circ, 90^\circ$ )

Nesse método, substitui-se o efeito resistente do núcleo de rocha adiante da frente, que será removido nos avanços seguintes, e que impede que a deformação final da parede ocorra de imediato junto à frente, por uma pressão radial fictícia  $p$ , aplicada na parede escavada e variável com a distância à frente, por forma tal que em cada ponto da parede o deslocamento aí verificado seja idêntico ao do equilíbrio tridimensional. O efeito da escavação seria então descrito pela retirada gradual de  $p$ , desde o seu valor inicial  $p_i$  até se anular, quando é atingido

o deslocamento máximo do maciço (curva característica do maciço). O acoplamento a esta curva da que descreve o incremento da carga no suporte com a respectiva deformação (curva característica do suporte) permite determinar pelo seu cruzamento a pressão de interação (fig. 17).

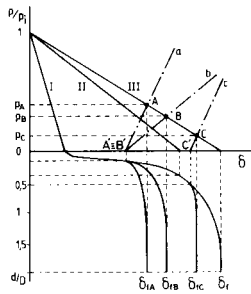


Fig. 17 — Interação maciço-suporte

A semelhança verificada (Cunha, 1981) entre as curvas de deslocamentos na parede com a distância à frente, para maciço homogêneo sem suporte, com comportamento linear ou não-linear, desde que expressas adimensionalmente com os deslocamentos finais, permite que a metodologia exposta possa ser generalizada a comportamentos não-lineares, desde que se disponha de um método capaz de definir a variação incremental  $p(\delta)$ , correspondendo ainda a interação maciço-suporte à intersecção das respectivas curvas características.

Para a situação de suporte anelar de parede fina, colocado na zona de influência da frente de escavação, em túnel circular em maciço isótropo, homogêneo, elástico e estado de tensão inicial hidrostático, pode deduzir-se facilmente, igualando os deslocamentos entre maciço e suporte, desde a colocação deste, a pressão de equilíbrio  $p_e$  (Rocha, 1976).

$$p_e = \frac{\alpha}{1 + \frac{R}{e} \frac{E_m}{E_s(1+\nu_m)}} p_i \tag{1}$$

onde  $\alpha = 1 - \delta_a / \delta_f$  e  $\delta_a / \delta_f$  é a fracção do deslocamento final na parede correspondente à distância  $d$  da frente a que foi colocado o suporte.

A expressão põe em evidência (fig. 17) que a pressão no suporte é tanto maior quanto maiores são a sua rigidez, o estado de tensão inicial e a deformabilidade do maciço e menor a distância à frente a que o suporte é colocado. Para suportes de parede espessa, Daemen e Fairhurst (1972) determinaram como valor da pressão de interação

$$p_e = \frac{\alpha}{1 + \frac{1+\nu_s}{1+\nu_m} \frac{E_m}{E_s} \frac{(1-2\nu_s) + (1-e/R)^2}{\frac{e}{R}(2-\frac{e}{R})}} p_i \tag{2}$$

cujo valor tende para (1) à medida que a rigidez do suporte  $e/R$  diminui.

Para túnel em maciço homogéneo sem suporte, escavado em secção total, e quaisquer geometrias da secção, estados de tensão inicial, solicitações, comportamentos não diferidos do maciço, o método dos elementos finitos permite, através de análises de equilíbrios planos, a determinação aproximada do equilíbrio final. O mesmo acontece ainda no caso da existência de anisotropias e heterogeneidades, desde que as mesmas se repitam identicamente nas sucessivas placas perpendiculares ao eixo em que é decomposto o comprimento do túnel, representado pela secção-tipo analisada.

Havendo lugar à colocação de suporte, se a forma da secção é diferente da circular ou, sendo circular, o estado de tensão inicial não é hidrostático, os deslocamentos  $\delta_a$  e  $\delta_f$  variam em cada ponto da parede da secção transversal, e, portanto, as curvas de deslocamentos com a distância à frente não são unívocas, correspondendo uma curva diferente a cada ponto da parede. A metodologia anteriormente exposta para estado hidrostático não é directamente aplicável, acrescentando de forma notória as dificuldades da simulação dos fenómenos através duma aproximação de equilíbrio plano. Um processo, necessariamente menos rigoroso, mas por vezes aceitável, face às indeterminações associadas à análise (em particular as que se prendem com o conhecimento das características mecânicas do maciço), foi igualmente proposto por Rocha (1976) e consiste em: *i*) determinação do estado de tensão inicial  $\bar{t}_i$  ao longo do contorno, o que constitui fase corrente dos cálculos por elementos finitos; *ii*) fixação da distância  $d$  a que é colocado o suporte, relativamente à frente, e determinação do correspondente valor de  $\alpha = 1 - \delta_a / \delta_f$ , utilizando a curva adimensional dos deslocamentos para secção circular e estado de tensão inicial hidrostático, adoptando como diâmetro equivalente  $D = (A + L)/2$  em que  $A$  e  $L$  são, respectivamente, a altura e o vão da secção transversal; *iii*) libertação de tensões no contorno, desde  $\bar{t}_i$  a  $\alpha \bar{t}_i$ , que corresponderá ao estado de tensão fictício na parede, no momento de aplicação do suporte, à distância  $d$  da frente, admitindo que a grandeza das tensões diminui, mantendo-se a direcção; *iv*) colocação do suporte e libertação das tensões  $\alpha \bar{t}_i$ , o que conduzirá à solicitação final no suporte.

No caso de escavação em secção parcial pode ainda propor-se um esquema semelhante, apesar de as secções parciais serem, em regra, bastante diferentes da forma circular, adoptando para  $D = (A + L)/2$  em que  $D$ ,  $A$ ,  $L$  se reportam agora à secção parcial.

Referiram-se até agora situações em que é possível, embora de forma mais ou menos aproximada, a determinação do equilíbrio final, com recurso a análises de equilíbrios planos. Existem, todavia, outras situações que não podem, com um mínimo de verosimilhança, ser objecto senão de análises tridimensionais ou, quando muito, axissimétricas. Tal é o caso de situações em que nenhuma das direcções principais de anisotropia ou ainda do estado de tensão inicial coincida com o eixo do túnel, ou ainda de situações de heterogeneidade, localizadas ao longo do avanço, e que se não repetem em sucessivas placas normais ao eixo, ao longo de uma zona de grande comprimento relativamente à dimensão transversal. São exemplos paradigmáticos de tal condição os casos de transposição de acidente geológico e de contacto entre formações, descritas no presente trabalho.

Como nota final, salienta-se que a reflexão feita acerca do significado dos estudos de túneis, por modelos numéricos, põe em causa a fiabilidade do seu dimensionamento prévio e aponta a necessidade do entendimento da observação das obras subterrâneas como parte integrante do respectivo projecto.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CUNHA, A. P. (1981) — *Aplicação de modelos matemáticos ao estudo de túneis em maciços rochosos*. Tese para Especialista, LNEC, Lisboa.
- CUNHA, A. P. (1983) — *Analysis of advancing tunnels in rock*. 5th ISRM Congress, Melbourne, Austrália.
- DAEMEN, J.; FAIRHURST, C. (1972) — *Rock failure and tunnel support loading*. Int. Symp. on Underground Openings, Luzern, Suíça.
- DESCOEUDRES, F. (1974) — *Three dimensional analysis of tunnel stability near the face in an elasto-plastic rock*. 3rd ISRM Congress, Denver, USA.
- LOPES, A. (1989) — *Estudo de túneis de secção circular em meios com simetria elástica de revolução*. Dissertação de Mestrado, U. N. Lisboa.
- RANKEN, R.; GHABOUSSI, J. (1975) — *Tunnel design considerations — analysis of stresses and deformations around advancing tunnels*, Univ. Illinois, USA.
- ROCHA, M. (1976) — *Estruturas subterrâneas*. LNEC, Lisboa.