

# **O MÉTODO DAS CURVAS CARACTERÍSTICAS COMO INSTRUMENTO DE DIMENSIONAMENTO DE TÚNEIS**

## **THE CHARACTERISTIC CURVES METHOD AS A TOOL FOR TUNNEL DESIGN**

COSTA E SILVA, MARIA MATILDE, *CEGEO, IST, Lisboa, Portugal, matilde.horta@ist.utl.pt*

### **RESUMO**

Descreve-se o método das curvas características aplicado ao dimensionamento de túneis abertos em maciços rochosos, de forma a conseguir uma representação aproximada do seu comportamento estrutural.

Tecem-se algumas considerações sobre a facilidade de compreensão dos mecanismos de interacção maciço/suporte que a metodologia em questão permite e realça-se a sua utilidade nas fases de ante projecto, onde possibilita o estudo e a escolha económica de um conjunto de hipóteses operacionais, assim como na etapa de execução, em que faculta ajustamentos operacionais relativos à eficácia dos sistemas de suporte dos túneis e ainda, na manutenção da sua integridade ao longo do tempo de serviço.

### **ABSTRACT**

The characteristic curves method applied to the design of tunnels opened in rock masses is described, with the purpose of obtaining an approximate representation of their structural behaviour.

Considerations are presented on the understanding of the rock mass/support interaction mechanisms allowed by this methodology and its utility in the tunnel design phase, where analysis and economic evaluations of alternatives are sought, as well as in the selection of operating adjustments for tunnel supports and, also, for the maintenance of their integrity along time.

## **1. INTRODUÇÃO**

A metodologia apresentada permite uma representação aproximada do comportamento estrutural de um maciço rochoso onde foi aberta uma cavidade de geometria circular.

O método das curvas características é um método analítico de dimensionamento relativamente simples, que permite uma abordagem pseudo tridimensional, uma vez que permite ter em conta o efeito da distância à frente e a natureza hiperestática da interacção maciço/suporte (Panet, 1995.)

Estudam-se uma série de placas perpendiculares ao eixo do túnel que se admite estarem em equilíbrio plano, a uma certa distância da frente para um e outro lado desta.

O método foi desenvolvido para escavações subterrâneas de secção circular, para estado de tensão inicial hidrostático e maciço isotrópico, pelo que a sua generalização para situações que envolvam heterogeneidades, anisotropias, descontinuidades, estados de tensão não hidrostáticos

e secções não circulares apresenta dificuldades que não se encontram ainda completamente ultrapassadas.

Na escavação de túneis em maciços de baixa qualidade, a interacção entre os diferentes suportes utilizados com o intuito de contribuir para a estabilização da obra antes do seu revestimento final e o maciço, assume um papel preponderante no sucesso da estabilização das cavidades. De facto, torna-se imprescindível o conhecimento exacto destas interacções afim de determinar a melhor combinação possível quer técnica quer economicamente.

A metodologia em questão permite assim, numa óptica qualitativa, a compreensão destes mecanismos de interacção, facto que realça a importância desta utilização na fase de execução.

Efectivamente, o método, que se baseia no conhecimento da curva convergência confinamento, poderá permitir uma utilização mais realista se se estabelecer como prática corrente a medição das pressões instaladas entre o maciço e o revestimento. Esta actuação possibilitaria a correcção de quaisquer alterações no sistema de suporte de acordo com as condições reais do terreno no devido tempo.

Nesta perspectiva, analisa-se o caso de um túnel de secção circular, aberto num maciço de fraca qualidade, bastante alterado, sujeito a um estado de tensão hidrostático  $p$  (onde a componente vertical depende apenas do peso do recobrimento e  $\sigma_h$ , componente horizontal do estado de tensão, é igual à vertical) e estudam-se os efeitos, na estabilidade do sistema maciço/suporte, da colocação de sistemas de suporte misto.

Julga-se ainda interessante referir, que o conhecimento reológico do maciço, adquirido durante a fase de execução, fruto da utilização do método em questão, pode ajudar a estabelecer de uma forma mais racional quaisquer planos de manutenção que se venham a implementar para estas obras numa fase subsequente de exploração.

## **2. MÉTODO DAS CURVAS CARACTERÍSTICAS**

### **2.1 A curva característica do maciço**

Se se considerar que um estado de tensão é consequência de deslocamentos impedidos, pode admitir-se a instalação de uma pressão radial nas paredes da cavidade, variável com a distância à frente da frente e simulando a acção estabilizadora do núcleo resistente de rocha, situado adiante da frente de avanço. Esta assunção explica a evolução dos deslocamentos radiais com a distância à frente, que apresentam um incremento substancial no início da zona escavada, só se maximizam a determinada distância da frente, de acordo com o comportamento reológico do maciço.

Assume-se, pois, com a utilização desta metodologia, que a escavação provoca um variação decrescente no estado de tensão observado nas paredes, variando desde o estado de tensão inicial,  $p$ , até 0, situação que representa o deslocamento máximo a observar nas paredes da escavação (Fig.1).

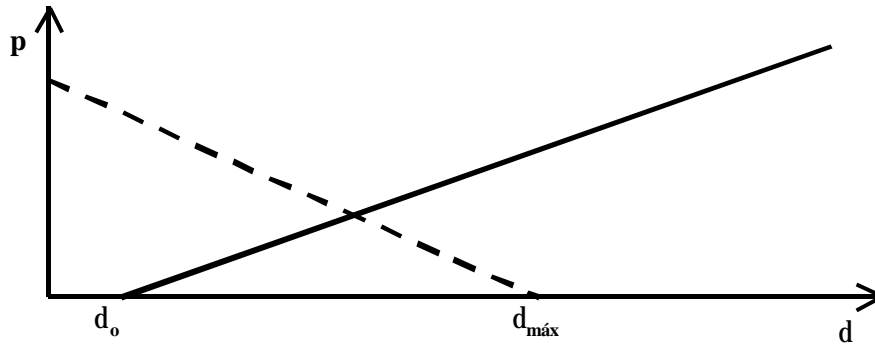


Figura 1- Curvas características do maciço e do suporte considerando o maciço elástico.

De acordo com o comportamento reológico do maciço, admitindo que este é elástico e assumindo um estado de tensão hidrostático, poder-se-ão calcular as tensões instaladas em qualquer ponto da parede da escavação e o respectivo deslocamento máximo, pelas expressões (1), (2) e (3) (Brady e Brown, 1985).

$$\sigma_r = p(1 - a^2/r^2) \quad (1)$$

$$\sigma_\theta = p(1 + a^2/r^2) \quad (2)$$

$$\delta = (1 + \nu)ap/E \quad (3)$$

onde  $p$  é a componente vertical da tensão que depende apenas do peso do recobrimento,  $a$  é o raio da escavação,  $\nu$  é o coeficiente de Poisson,  $E$ , módulo de deformabilidade do maciço e  $r$  é a distância onde se pretendem determinar as grandezas atrás referidas.

Se o maciço tiver um comportamento elastoplástico (Fig2), então para a determinação das tensões, usam-se, como é do conhecimento geral, as expressões (Brady e Brown, 1985):

$$\sigma_r = (p+T)(r/a)^{k-1} - T \quad (4)$$

$$\sigma_\theta = k(p+T)(r/a)^{k-1} - T \quad (5)$$

onde  $T = \sigma_c/k$ ,  $\sigma_c$  representa a resistência à compressão uniaxial e  $k = (1 + \sin\phi)/(1 - \sin\phi)$ .

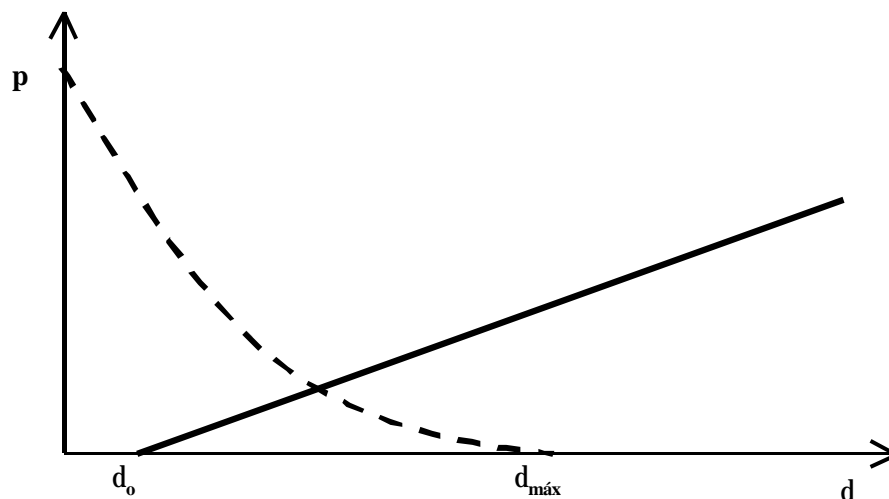


Figura 2- Curvas características do maciço e do suporte considerando o maciço elastoplástico.

## 2.2 A curva característica do suporte

As curvas características do suporte relacionam as pressões, que lhe são aplicadas pelo maciço escavado, com as deformações que lhe são impostas.

Admite-se que não deverá ser ultrapassado o limite elástico, pelo que as curvas são representadas por rectas (Fig.1 e Fig.2).

A curva característica do suporte é definida com base no conhecimento da rigidez do sistema e do deslocamento observado quando da instalação deste. O estabelecimento desta distância é difícil pois para além desta depender de constrangimentos operacionais, ligados directamente à execução da obra, depende de parâmetros técnicos como as características mecânicas do terreno, da rigidez do suporte e do ponto de equilíbrio, pelo que Oreste (2003) aconselha um estudo paramétrico desta grandeza.

A determinação do ponto de equilíbrio permite conhecer o valor da pressão de interacção, ponto de intersecção das curvas características do maciço e do suporte, onde quer a pressão na parede quer a pressão no suporte são iguais. Esta última é comparada com a pressão admissível do suporte e assim se iniciam o estudo da eficiência do suporte.

O estudo da eficiência do suporte pode determinar a necessidade de suportes mais rígidos pelo que frequentemente se usam sistemas de suporte mistos. Considerando que se encontram sempre no domínio elástico, e que estes se podem assemelhar a materiais elásticos colocados em paralelo, para determinação da rigidez destes é comum somar a rigidez dos diferentes sistemas que os compõem (Fig3).

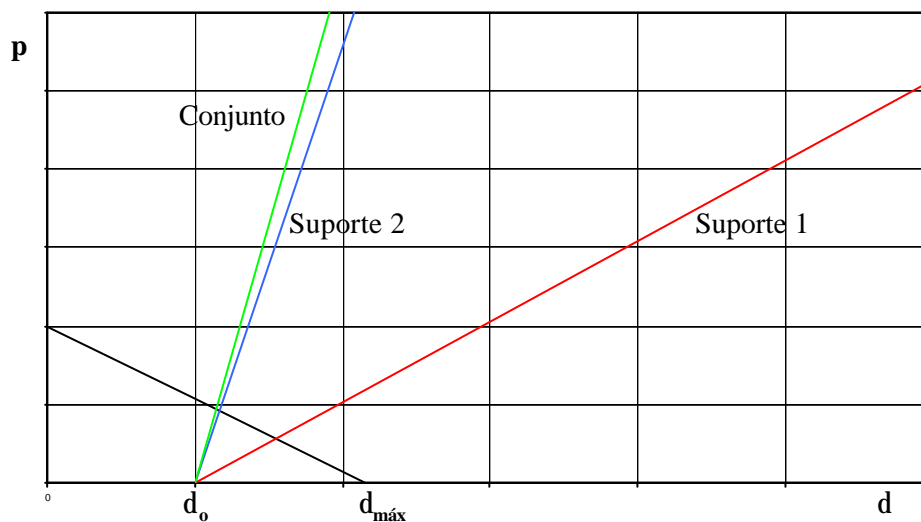


Figura 3- Curvas características de dois tipos de suporte (betão e cambotas) e sistema misto.

## 2.3 Interacção maciço suporte

O estudo da interacção maciço suporte é muitíssimo importante, pois como se disse, é através dele que se avalia a eficiência dos suportes projectados e ou colocados.

A eficiência é apurada de acordo com um determinado factor de segurança no que respeita à pressão admissível para o suporte e aquela que se estima estar aplicada sobre o sistema, ou

através da análise dos deslocamentos observados na parede relativamente aqueles que se estabeleceram como valores admissíveis.

No âmbito do estudo da eficiência dos suportes deve ainda recordar-se que frequentemente se usam sistemas mistos actuando alguns como sistemas temporários e outros com carácter permanente. Nestes casos, a eficiência do sistema encontra-se condicionada entre outros factores à distância à frente a que foi colocado o sistema primário, por outras palavras, depende da deformação observada no maciço à data da colocação do primeiro suporte. Assim, a eficiência do segundo sistema diminuirá com a distância da sua instalação à frente, o que significa um aumento do deslocamento final nas paredes do túnel e um correspondente decréscimo de carga aplicada ao sistema misto. Tal pode ser facilmente observado na fig.4.

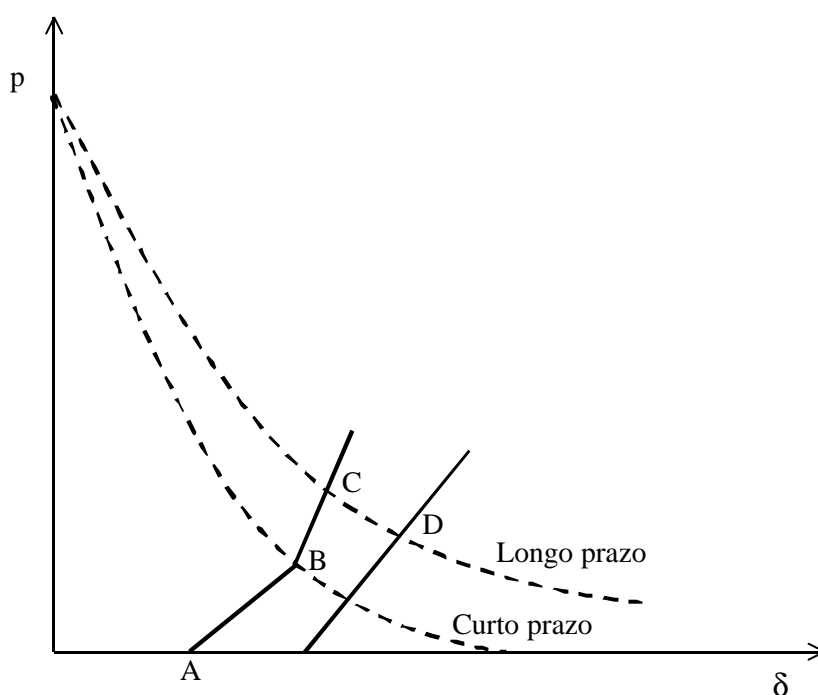


Figura 4- Interação entre sistema de suporte temporário e sistema final misto. Adaptado de Oreste (2003).

Quando se utilizam numa primeira fase, técnicas de tratamento do maciço como cabos, técnicas de congelamento de terrenos, injeções, jet-grouting, etc., juntamente com outros tipos de suporte que constituirão os sistemas finais de suporte, a determinação da eficiência do conjunto torna-se cada vez mais complexa, porquanto são alteradas as características mecânicas do maciço rochoso que face ao segundo sistema de suporte apresenta um comportamento reológico distinto daquele que vinha servindo para o estudo em questão.

Torna-se pois pertinente, sobretudo nestes últimos casos, utilizar instrumentação que preveja a determinação da variação do estado de tensão aplicado às paredes, por exemplo através da colocação de células de tensão, ou outros sistemas de determinação de tensões bem como a leitura dos deslocamentos observados à data das leituras anteriores, de forma a tornar realista a determinação do comportamento reológico do maciço agora melhorado. Sendo então conhecida verdadeiramente a curva convergência/ confinamento que suporta a aplicação do método das curvas características.

## 2.4. Aplicação do método

Analisa-se o caso de um túnel de secção circular (de diâmetro,  $D=12\text{m}$ ), sujeito a um estado de tensão hidrostático  $p$  (a componente vertical,  $\sigma_v = \gamma H$ , depende apenas do peso do recobrimento e  $\sigma_h$ , componente horizontal do estado de tensão, é igual à vertical) e estudam-se os efeitos, na estabilidade do sistema maciço/suporte, da colocação de um suporte constituído por cambotas espaçadas de  $1\text{m}$ . O sistema de suporte integra ainda um anel de betão projectado com uma espessura de  $20\text{cm}$ , que se supõe ter uma acção eficaz na limitação da zona plástica que se instala em torno do contorno, fruto da descompressão gerada pela escavação.

Supõe-se na parede do túnel um estado de tensão inicial igual a  $0,4\text{MPa}$  ( $\gamma = 20\text{ kN/m}^3$  e  $h=20\text{m}$ , altura média do recobrimento), que diminui até se anular quando é atingido o deslocamento máximo. No caso de se assumir um comportamento elástico na parede o deslocamento, calculado pela expressão (3), seria para o caso em análise, de  $2\text{cm}$  no máximo.

Admitiram como parâmetros de deformabilidade do maciço rochoso, que foi sujeito a um tratamento prévio por jet-grouting, os seguintes valores: módulo de elasticidade  $E = 150\text{MPa}$  e coeficiente de Poisson  $\nu=0,35$ .

Admite-se que não deverá ser ultrapassado o limite elástico dos sistemas de suporte, pelo que as curvas são representadas por rectas. Assumiram-se os valores de catálogo referentes às cambotas: Limite elástico,  $\sigma_a = 140\text{MPa}$ ; módulo de elasticidade,  $E=200\text{GPa}$ ; secção,  $s= 37\text{cm}^2$ . Para o anel de betão admitiu-se uma espessura de  $20\text{cm}$ ,  $E=20\text{GPa}$ ,  $\nu= 0,2$  e  $\sigma_b = 20\text{MPa}$ .

Analisa-se a hipótese do maciço apresentar um comportamento elastoplástico e fazem-se algumas simulações considerando este comportamento. Esta aproximação foi assegurada com a utilização do programa SOSTENIM (1998), que recorre ao critério de Hoek-Brown. Traçam-se as curvas características do maciço (tecto, soleira e hasteais) e a curva que representa o conjunto formado pela cambota e pelo anel de betão com espessura de  $20\text{cm}$  (Fig.5).

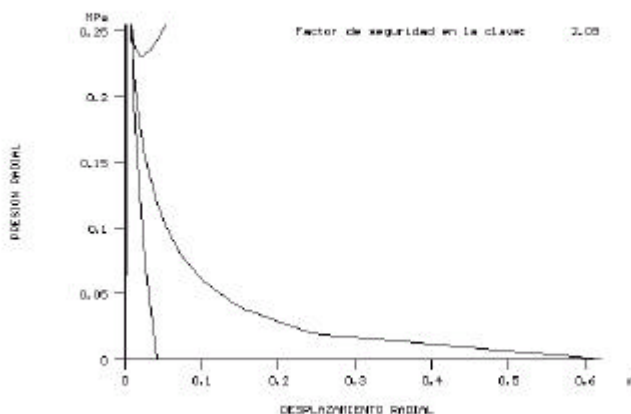


Figura 5- Curvas características do maciço rochoso e do suporte obtidas com o programa SOSTENIM.

Na figura pode observar-se que o valor do deslocamento correspondente à pressão de interacção é da ordem  $5\text{cm}$ , valor este claramente ultrapassado pelas leituras de convergência.

Esta circunstância coloca a hipótese de não ter sido possivelmente bem caracterizado o maciço rochoso. Efectivamente, utilizando os parâmetros de deformabilidade do maciço que se obtiveram após a realização de alguns ensaios “in situ”, ou seja, não estabelecendo quaisquer melhorias nas características mecânicas do material em consequência da aplicação de jet-grouting,  $E=5,8\text{MPa}$ , e  $\nu=0,35$ , verificam que o sistema de suporte adoptado é absolutamente desaconselhado para qualquer gama de deformações.

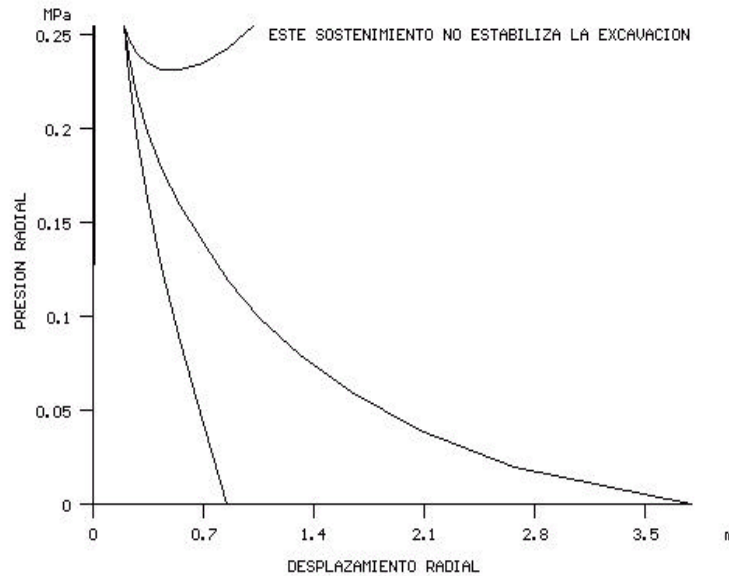


Fig.6- Traçado das curvas características, admitindo um maciço muito mais deformável ( $E=5,8\text{ MPa}$ ).

Verifica-se assim, para as condições estudadas, que o sistema maciço /suporte se encontra instável, mesmo considerando o comportamento do maciço elastoplástico.

Surge daqui provada a necessidade, para o caso presente, da leitura das pressões no contorno da escavação, ao longo das diferentes fases da obra, incluindo os períodos em que se verificam interrupções. Estas leituras permitiriam de forma fiável estabelecer a curva convergência vs. confinamento e para o maciço em questão permitiriam certamente ter optado pela melhor solução técnico económica no devido tempo.

### 3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O método das curvas características afigura-se como um bom instrumento de dimensionamento de suportes para escavações de geometria circular, caso dos túneis.

Todavia, sobretudo em materiais de fraca qualidade geotécnica, onde na maior parte dos casos se desenvolvem vários tipos de estabilização dos maciços, este método pode efectivamente desempenhar um papel importante, na medida em que permite fazer uma análise qualitativa da

interação dos diferentes tipos de suportes adoptados ou a assumir para um determinado maciço numa perspectiva de optimização da melhor solução técnico económica.

Esta escolha pode ser levada a cabo quase em tempo real, se houver um bom conhecimento do comportamento reológico do maciço.

Uma das fragilidades da metodologia pode ser a exigência de um bom conhecimento da curva confinamento convergência do maciço. Esta pode ser conhecida assumindo certos comportamentos (elástico, elastoplástico), ou através de simulações, utilizando modelos numéricos, para os maciços fracturados, algo complexos, ou ainda através da medição das pressões geradas na interface maciço/suporte, à medida que se registam as deformações, neste caso convergências. Este tipo de instrumentação, apesar de não ser frequente na abertura de túneis, assume importância acrescida quando se encara a monitorização da estabilidade a longo prazo dos túneis.

#### **4. BIBLIOGRAFIA**

[1] Brady, B. H. G. & Brown, E.T. (1985)- Rock mechanics for underground mining. George Allen & Unwin, ltd. London.

[2] Oreste, P.P. (2003)- Analysis of structural interaction in tunnels using the convergence- confinement approach. Tunneling and Underground Space Technology, 18. Pergamon. pp 347-363.

[3] Panet, M. (1995)- Le calcul des tunnels par la méthode convergence-confinement. Presses de L' École Nationale des Ponts et Chaussées. Paris.

[4] Sostenimiento de Excavaciones Subterráneas (1998)- Programa para el cálculo de curvas características. Geotecnia Minera. Instituto Geológico y Minero de España. Madrid.