

MÉTODOS EMPÍRICOS DE DIMENSIONAMENTO DE TÚNEIS*

Empirical Tunnelling Design Methods

por

ANTÔNIO PINTO DA CUNHA**

RESUMO — A despeito dos inegáveis progressos conseguidos nos últimos anos no domínio da caracterização geotécnica dos maciços e dos métodos de cálculo de estruturas subterrâneas, a experiência continua a desempenhar um papel fundamental, no projecto e na execução das mesmas.

As numerosas dificuldades e indeterminações associadas, em regra, ao projecto dessas estruturas, como consequência da precaridade do conhecimento disponível sobre os múltiplos parâmetros de que depende o seu comportamento, têm originado o aparecimento de métodos empíricos de dimensionamento de suportes, cuja larga utilização prática justifica a sua abordagem no presente artigo.

SYNOPSIS — Empirical tunnel design methods are still of major importance, owing to the several uncertainties about the parameters governing the behaviour of underground structures one always has to deal with in design phase.

In the paper, an analysis is presented of modern empirical methods commonly used in tunnel design.

1 — INTRODUÇÃO

Pode dizer-se que em todo o mundo se assiste a um incremento significativo da utilização do geoespaço, como resposta às necessidades de desenvolvimento comunitárias e à crescente saturação do espaço superficial. Nos mais diversos domínios — ligações ferroviárias e rodoviárias, abastecimento de águas, esgotos e outros serviços urbanos, aproveitamentos hidroeléctricos, armazenamento de pro-

* Trabalho recebido em Dezembro de 1981. A sua discussão está aberta durante um período de três meses.

** Engenheiro Civil, Especialista do Núcleo de Obras Subterrâneas, LNEC

duetos, urbanismo subterrâneo, instalações militares, explorações mineiras, etc. — há que recorrer à construção de túneis, poços e cavernas como elementos essenciais ou acessórios dos projectos. A crescente ambição e dificuldade das obras projectadas e a necessidade de as realizar com economia, segurança e rapidez, têm vindo a constituir um autêntico e permanente desafio à capacidade tecnológica e ao engenho humanos.

A despeitos dos inegáveis progressos registados nos últimos anos no domínio das obras subterrâneas, nomeadamente no que respeita à evolução das técnicas de caracterização dos maciços e ao refinamento dos métodos de cálculo, a previsão das condições de estabilidade destas estruturas constitui um dos problemas de mais difícil solução, no âmbito da engenharia civil. As numerosas indeterminações em regra associadas ao projecto das estruturas subterrâneas, como consequência da precaridade do conhecimento disponível acerca da complexa influência dos múltiplos parâmetros que condicionam o seu comportamento, exigem aqui, mais do que em qualquer outro campo, que pela capacidade de julgamento e pela experiência, seja compensada a ausência de regras precisas, seguras e universais, a utilizar no seu dimensionamento.

Continuando a experiência a desempenhar um papel fundamental na execução e projecto de qualquer obra subterrânea, não surpreenderá que se hajam desenvolvido métodos essencialmente empíricos para o dimensionamento deste tipo de obras. Tais métodos, baseados na utilização de classificações geotécnicas de maciços, consistem, de um modo geral, na apreciação de um reduzido número de parâmetros geotécnicos relativos aos maciços escavados — em geral susceptíveis de serem obtidos à custa ensaios simples em laboratório, ou definidos a partir de observações de superfície, ou de sondagens — a partir dos quais realizam um julgamento da qualidade geotécnica dos maciços, fazendo em regra recomendações, face ao tipo de obra em apreço, acerca das características dos suportes julgados mais adequados, para as condições estimadas para o maciço envolvente (Cunha, 1979).

Qualquer classificação geotécnica para obras subterrâneas deverá basear-se numa terminologia bem definida e de aceitação universal, para que diferentes utilizadores dela retirem idêntico significado, quando aplicada às mesmas situações; ser de fácil entendimento e de manejo simples; utilizar parâmetros geotécnicos de obtenção acessível, no laboratório ou no campo, nem em número tão excessivo, que dificulte a possibilidade da sua determinação, nem em número tão restrito que deixe de contemplar a influência de factores fundamentais para o comportamento das obras; referenciar os parâmetros que utiliza por conjunto re-

duzido de estados típicos, com significado bem definido; apresentar com clareza as hipóteses em que se baseia e os objectivos que presidem à sua elaboração; definir, enfim, uma metodologia que permita, a partir de uma apreciação do problema geotécnico, a definição de correspondentes soluções. (Cunha, 1980).

Convém notar que, apesar de tudo, uma classificação geotécnica envolve sempre uma dose apreciável de subjectividade, ao reflectir a experiência dos seus autores e respectiva opinião acerca da importância relativa dos diferentes parâmetros que utiliza, para o comportamento das obras a que se destina. A sua utilização exige, por consequência, uma cuidada leitura dos seus textos introdutórios, uma correcta apropriação das suas hipóteses de base e uma clara noção dos seus limites de aplicação.

2 — CLASSIFICAÇÕES GEOTÉCNICAS PARA TÚNEIS

Sem deixar de referir as já históricas classificações de Terzaghi (1946) e Lauffer (1958), passam-se em revista em seguida, algumas das mais recentes classificações geotécnicas para obras subterrâneas, apontando-se, de forma muito sintética, as suas hipóteses fundamentais e a metodologia da sua utilização.

2.1 — *Classificação geomecânica de maciços rochosos para túneis (Bieniawski, 1974)*

Nesta classificação, a qualidade do maciço é apreciada segundo seis aspectos que reflectem as características da rocha e da fracturação: resistência da rocha em compressão uniaxial, RQD, espaçamento entre fracturas, condições físicas e geométricas das fracturas, presença de água e orientação das descontinuidades relativamente à obra. Dada que é diferente a importância relativa dos vários parâmetros, a classificação define os respectivos critérios de ponderação, fixando valores para situações típicas (entre parêntesis na fig. 1).

O somatório dos pesos atribuídos define, para cada secção-tipo da obra, um número (rock mass rating — RMR), entre zero e cem, tanto mais elevado quanto melhor a qualidade do maciço em apreço, o qual permite integrar o maciço numa de cinco classes, cuja terminologia abrange as designações de maciço de muito má, má, razoável, boa e muito boa qualidade.

Numa 2.^a fase, entrando num ábaco (fig. 2) com o vão livre — definido como o menor dos valores correspondentes à largura da secção transversal da obra ou à distância à frente a que é colocado o suporte — e com o RMR obtido,

RESIST. EM COMP. UNIAxIAL (MPa)	> 250 (15)	100-250 (12)	50-100 (7)	25-50 (4)	< 25 (2-0)
R.Q.D. (%)	90-100 (20)	75-90 (17)	50-75 (13)	25-50 (8)	< 25 (3)
ESPACAMENTO ENTRE FRACTURAS (m)	> 2 (20)	0,6-2 (15)	0,2-0,6 (10)	0,06-0,2 (8)	< 0,06 (5)
CONDIÇÃO DAS FRACTURAS	Muito rugosas, fechadas, sem alteração	Pouco alteradas, pouco rugosas, abertura < 1 mm (25)	Muito alteradas, pouco rugosas, abertura < 1 mm (20)	Enchimento argil. espessura < 5 mm ou abertura 1-5 mm diapl. contínuas (10)	Enchimento argil. espessura > 5 mm ou abertura > 5 mm diapl. contínuas (0)
ÁGUA SUBTERRÂNEAS (caudal/10 m túnel)	Seco (15)	< 10 l/min (10)	10-25 l/min (7)	25-125 l/min (4)	> 125 l/min (0)
ORIENTAÇÃO DAS DESCONTINUIDADES	Muito favorável (0)	Favorável (-2)	Razoável (-5)	Desfavorável (-10)	Muito desfavorável (-12)
CLASSE	I	II	III	IV	V
DESCRIÇÃO DA QUALIDADE	Muito boa (100-81)	Boa (80-61)	Razoável (60-41)	Má (40-21)	Muito má (≤ 20)
COESÃO DO MACIÇO ROCHOSO (K Pa)	> 400	300-400	200-300	100-200	< 100
ÂNGULO DE ATRITO INTERNO (°)	> 45	45-35	35-25	25-15	< 15
PERÍODO MÉDIO DE ESTABILIDADE SEM REVESTIMENTO	10 anos para um vão de 15 m	6 meses para um vão de 8 m	1 semana para um vão de 5 m	10 horas para um vão de 2,5 m	30 minutos para um vão de 1,0 m

Fig. 1 — Classificação geomecânica para túneis.

é definido, o período de estabilidade sem revestimento, prazo limite dentro do qual haverá que instalar o suporte, sob pena de colapso previsível da abertura não suportada. Por último definem-se, face às características estimadas para o maciço, alternativas de suporte primário a serem adoptadas na secção em apreço.

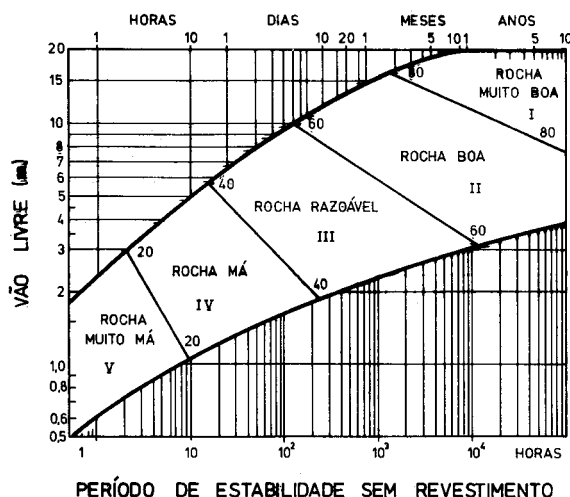


Fig. 2 — Definição do período de estabilidade sem revestimento.

A classificação tem em conta o papel essencial da fracturação no comportamento das obras subterrâneas em maciços rochosos e também a influência do material rochoso e da água. Não atende, porém, a factores como a profundidade da obra e o processo construtivo. Não pode deixar de referir-se, por outro lado, uma mutação acentuada dos pesos fixados para os parâmetros intervenientes, em sucessivos artigos do autor.

2.2 — Classificação geotécnica para túneis (Pacher-Rabcewicz, 1974)

Destinada a obras subterrâneas com secções transversais tipo da ordem dos 80 m², — caso das modernas autoestradas — reflecte experiência colhida com o método austríaco de escavação de túneis, nomeadamente no âmbito de obras profundas, em que se dispõe, em regra, de informação geotécnica altamente precária.

CLASSES DOS MACIÇOS	I	II	III	IV	Va	Vb
DESCRICÃO	SÃO OU POUCO FRACTURADO	FRACTURADO	MUITO FRACTURADO	TOTALMENTE FRACTURADO	POUCO COERENTE	INCOERENTE
COMPORTAMENTO	SEM FRACTURAS OU POUCO FRACTURADO	FRACTURADO DIACL. COM ARGILA	FRACTURAÇÃO INTENSA ESMAGAMENTOS DIACL. COM ARGILA	TECTONIZADO COM FALHAS ROCHA COM COESÃO	MILONITIZADO COESÃO FRACA	SOLTO INCOERENTE
	$\sigma_c > \sigma_g$; AUTOPORTANTE OU NECESSITANDO DE: SUPORTE PONTUAL	REFORÇO NO TECTO	$\sigma_c < \sigma_g$; SUPORTE CONTÍNUO SISTEMÁTICO, EXCLUINDO EVENTUALMENTE A SOLEIRA	$\sigma_c < \sigma_g$; COMPORTAMENTO PLÁSTICO; MODERADAMENTE PRESSÃO LATERAL; ELEVACÃO DA SOLEIRA		
INFLUÊNCIA DA ÁGUA	NENHUMA	MÍNIMA	NAS DIACLASES	NÍTIDA		INTENSA
ESCAVAÇÃO	SECÇÃO TOTAL	SECÇÃO TOTAL	SEC. PARCIAL (I, II)	SEC. PARCIAL (I-IV)	SECÇÃO PARCIAL (I-VI)	
SUPORTE	ANCORAGENS ESPORÁD.	ANCORAGEM TECTO	CONTÍNUO NO TECTO E HASTEIAIS	CONTÍNUO, FECHADO	CONTÍNUO, FECHADO	
FUNÇÃO DO SUPORTE	PROTECÇÃO DE ZONA LOCALIZADAS OU GOLPES TERRENO	PROT. SISTEMÁTICA DO TECTO E EVENTUAL DOS HASTEIAIS	PROTECÇÃO CONTÍNUA, QUEDA BLOCOS	PROT. SEÇÕES PARCIAIS; LIMITAÇÃO MOVIMENTO TERRENO NECESSIDADE ANEL FECHADO; APROV. CAPAC. RESISTENTE TERRENO		
PRazo DE APLICAÇÃO	SEM CONDIÇÕES ESPECIAIS (GOLPES DE TERRENO)	APÓS DESMONTE		PROTECÇÃO IMEDIATA SEÇÕES PARCIAIS COM FECHO DO ANEL		

Fig. 3 — Classificação geotécnica para túneis.

A partir da identificação do maciço com uma das seis classes da classificação (fig. 3), com base no julgamento dos elementos geotécnicos disponíveis sobre aquele, é feita uma previsão do comportamento do maciço e da influência da água, são definidos o método de escavação mais adequado (secção parcial ou total), o tipo e funções a desempenhar pelo suporte primário em tais condições e o prazo em que o mesmo deverá ser aplicado, sob pena de colapso da obra.

2.3 — *Classificação geotécnica de maciços rochosos para o projecto de suportes de túneis (Barton et al, 1974)*

Com base numa análise do comportamento de cerca de 200 obras subterrâneas existentes, foi estabelecido um sistema de classificação de maciços rochosos, para túneis, assente na definição de um índice de qualidade do maciço rochoso Q (rock mass quality), cujos valores oscilam entre 10^{-3} , para maciços de qualidade extremamente fraca, tipo squeezing-ground, e 10^3 para maciços de excepcional qualidade, praticamente não fracturados. O parâmetro Q é definido pela expressão

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF}$$

onde

RQD — rock quality designation (0-100)

J_n — factor do número de famílias de fracturas (0,5-20)

J_r — factor de rugosidade da fracturação (0,5-4)

J_a — factor do grau de alteração das fracturas (0,75-20)

J_w — factor de condições hidrológicas (0,05-1)

SRF — factor de redução de tensões (0,5-20)

Entre parêntesis figuram os pesos limites de cada parâmetro, cujos critérios de atribuição são afixados na classificação. Pela natureza dos factores que envolvem, os três quocientes da expressão que define Q representam, respectivamente, a influência do tamanho dos blocos do maciço rochoso, das características de corte ao longo das superfícies de compartimentação inter-blocos e do estado de tensão no maciço.

Correlações empíricas entre Q e as pressões sobre o suporte, a nível do tecto e nascenças, e o período de estabilidade sem revestimento, são estabelecidas na classificação. Finalmente, é definido um factor ESR, relacionado com a finalidade da obra e as suas exigências de segurança — entre 0,8 para centrais nucleares

e 5 para aberturas temporárias no âmbito mineiro — obtendo-se da relação entre o vão, altura ou diâmetro L da secção e ESR, a “dimensão equivalente” da obra, cuja correlação com Q permite definir uma classe de suporte (fig. 4).

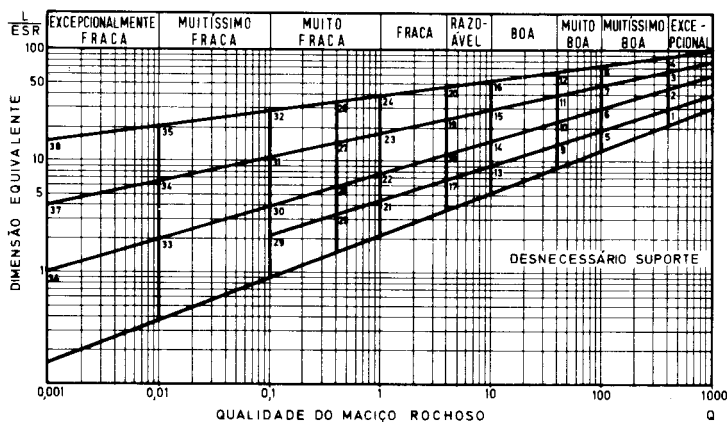


Fig. 4 — Definição das classes de suporte.

Distinguem-se secções autoportantes e secções necessitando de suporte permanente, estimando-se para estas, em função da respectiva classe, as características do suporte adequado (diâmetros, espaçamento e comprimento de ancoragens, espessuras de betão projectado e moldado).

À classificação apresentada pode apontar-se, apesar do meritório esforço que representa, uma complexidade e sofisticação, que tornam por vezes difícil, senão mesmo pouco precisa, a sua aplicação.

2.4 — Classificação RSR para escolha de suportes de obras subterrâneas (Wickham et al, 1974)

Com vista à previsão, em fase de projecto, dos suportes necessários à estabilidade de obras subterrâneas em maciços rochosos, a partir de dados sumários de carácter geológico normalmente disponíveis nessa fase, desenvolveram os autores citados, com base na experiência colhida em várias dezenas de projectos por si realizados, um conceito que designaram por Rock Structure Rating (RSR).

O valor de RSR, entre zero e cem, é obtido para um dado maciço pela quantificação de três parâmetros, designados A, B, C e que reflectem, respectivamente, o tipo de rocha e a estrutura geológica do maciço (A), a geometria da

fracturação e a direcção do avanço da obra face a esta (B) e as características hidro-lógicas do maciço, apreciadas em confronto com as condições de preenchimento das fracturas e a qualidade do maciço (C).

O somatório dos pesos correspondentes a A, B, C, fixados por critérios definidos na própria classificação, e cujo valor máximo é respectivamente de 30, 45 e 25, determina para o maciço rochoso em apreço o respectivo RSR, sendo estabelecida correlação entre este índice e as necessidades de suporte constituído por cintas metálicas (tipo e espaçamento) através de um parâmetro adimensional característico das cintas (rib ratio). Finalmente, correlações semelhantes, para um dado diâmetro de túnel, são estabelecidas (fig. 5) entre o RSR e suportes constituídos quer por ancoragens (diâmetro e espaçamento) quer por betão projectado (espessura).

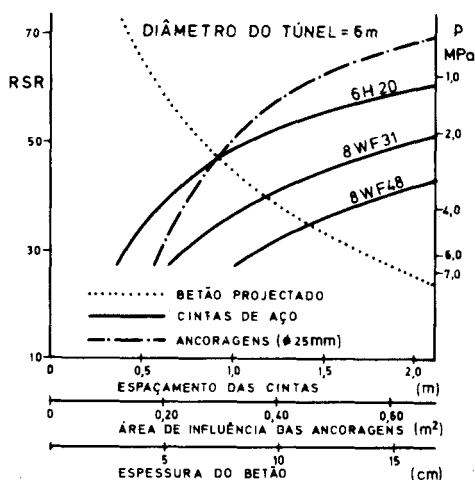


Fig. 5 — Definição de suportes a partir do RSR.

2.5 — Recomendações relativas à escolha do suporte para túneis (AFTES, 1976)

Com o objectivo de racionalizar a escolha do suporte, através da consideração dos principais factores que condicionam o comportamento de uma obra subterrânea, propôs a Association Française de Travaux en Souterrain (AFTES,

1976), a 2ª versão de um texto provisório de recomendações, cuja metodologia se expõe sucintamente:

A partir da determinação de um coeficiente de resistência f do terreno

$$f = \operatorname{tg} \varphi + \frac{c}{\sigma_c} \quad (\text{solos})$$

$$\text{ou } f = \frac{\sigma_c}{100} \quad (\text{rochas})$$

onde c representa a coesão, φ o ângulo de atrito e σ_c a resistência à compressão uniaxial, o maciço é integrado numa das classes I a X de uma classificação (fig. 6), em que as seis primeiras classes respeitam as rochas, as três últimas a solos e a sétima à transição solo-rocha.

CATEGORIA	DESIGNAÇÃO	EXEMPLOS	f
I	Rocha de muito elevada resistência	Quartzitos e basaltos	20
II	Rochas de grande resistência	Granitos, grés, calcários	13-19
III	Rochas de boa resistência	Granitos, grés, calcários, mármore, dolomias, conglomerados compactos	7-13
IV	Rochas resistentes	Grés, xistos	5-7
V	Rochas de média resistência	Xistos argilosos, grés, calcários, margas compactas, conglomerados	3-5
VI	Rochas de fraca resistência	Xistos, calcários, grés, margas compactas, conglomerados, argilas duras	1,3-3
VII	Rochas esmagadas. Solos muito consolidados	Argilas, areias argilosas consolidadas, areias compactas	0,9-1,3
VIII	Solos medianamente consolidados	Areias argilosas. Areias medianamente compactas	0,7-0,9
IX	Solos pouco consolidados	Aterros plásticos. Areias ou seixos saturados	0,5-0,7
X	Terreno sem consistência	Lodos e outros solos plásticos saturados	0,5

Fig. 6 — Definição das classes do terreno.

Para túneis com um vão inferior a 10 metros, escavados por métodos tradicionais, é dada uma primeira indicação sobre os suportes adequados (fig. 7), desde a não necessidade de suporte (classe I) até ao escudo com dispositivo para co-

GUIÃO P/ ESCOLHA DO SUPORTE										TERRENO ENCAIXANTE										OBRA			EFEITOS A SUPERFÍCIES									
TIPO DE SUPORTE										COMPORTAMENTO MECÂNICO										ALTERABILIDADE				HIDROLOGIA			COBERTURA			DIMENSÕES (m)		
SEM SUPORTE										CLASSIFICAÇÃO										R.O.D.			COM ÁGUA			PERM. PERM. FRAÇA FONTE			PROD. SENS. VCS			
GUNITÉ										ROCHAS										L.O. < L.O. FRAÇA MÉDIA FONTE			PERM. PERM. FRAÇA FONTE			PROD. SENS. VCS						
										I II III IV V VI VII VIII IX X										L.O. < L.O. FRAÇA MÉDIA FONTE			PERM. PERM. FRAÇA FONTE			PROD. SENS. VCS						
BETÃO PROJETADO	SIMPLES										R.O.D.										L.O. < L.O. FRAÇA MÉDIA FONTE			PERM. PERM. FRAÇA FONTE			PROD. SENS. VCS					
	C/ ANCORAGENS DE FIXAÇÃO CONTÍNUA										> R.O.										L.O. < L.O. FRAÇA MÉDIA FONTE			PERM. PERM. FRAÇA FONTE			PROD. SENS. VCS					
	C/ CINTAS LIGEIRAS										> R.O.										L.O. < L.O. FRAÇA MÉDIA FONTE			PERM. PERM. FRAÇA FONTE			PROD. SENS. VCS					
ANCORAGENS	FIXAÇÃO PONTUAL										R.O.D.										L.O. < L.O. FRAÇA MÉDIA FONTE			PERM. PERM. FRAÇA FONTE			PROD. SENS. VCS					
	FIXAÇÃO CONTÍNUA										> R.O.										L.O. < L.O. FRAÇA MÉDIA FONTE			PERM. PERM. FRAÇA FONTE			PROD. SENS. VCS					
	PREGAGENS										> R.O.										L.O. < L.O. FRAÇA MÉDIA FONTE			PERM. PERM. FRAÇA FONTE			PROD. SENS. VCS					
CINTAS	C/ MALHA SOLDADA										R.O.D.										L.O. < L.O. FRAÇA MÉDIA FONTE			PERM. PERM. FRAÇA FONTE			PROD. SENS. VCS					
	C/ CINTAS LIGEIRAS										> R.O.										L.O. < L.O. FRAÇA MÉDIA FONTE			PERM. PERM. FRAÇA FONTE			PROD. SENS. VCS					
	DESIZANTES OU RÍGIDAS										> R.O.										L.O. < L.O. FRAÇA MÉDIA FONTE			PERM. PERM. FRAÇA FONTE			PROD. SENS. VCS					
PLACAS PRÉ-FABRICADAS	DE RECOMPRESSÃO										R.O.D.										L.O. < L.O. FRAÇA MÉDIA FONTE			PERM. PERM. FRAÇA FONTE			PROD. SENS. VCS					
	C/ PLACAS DE BLINDAGEM										> R.O.										L.O. < L.O. FRAÇA MÉDIA FONTE			PERM. PERM. FRAÇA FONTE			PROD. SENS. VCS					
	SIMPLES										> R.O.										L.O. < L.O. FRAÇA MÉDIA FONTE			PERM. PERM. FRAÇA FONTE			PROD. SENS. VCS					
TUBO CRAVAO	COM CINTAS										R.O.D.										L.O. < L.O. FRAÇA MÉDIA FONTE			PERM. PERM. FRAÇA FONTE			PROD. SENS. VCS					
	ESCUDO										> R.O.										L.O. < L.O. FRAÇA MÉDIA FONTE			PERM. PERM. FRAÇA FONTE			PROD. SENS. VCS					
	PREABÓBADA										> R.O.										L.O. < L.O. FRAÇA MÉDIA FONTE			PERM. PERM. FRAÇA FONTE			PROD. SENS. VCS					
CONSOLIDAÇÃO DO TERRENO	INJEÇÕES										R.O.D.										L.O. < L.O. FRAÇA MÉDIA FONTE			PERM. PERM. FRAÇA FONTE			PROD. SENS. VCS					
	AR COMPRIMIDO										> R.O.										L.O. < L.O. FRAÇA MÉDIA FONTE			PERM. PERM. FRAÇA FONTE			PROD. SENS. VCS					
	CONGELAÇÃO										> R.O.										L.O. < L.O. FRAÇA MÉDIA FONTE			PERM. PERM. FRAÇA FONTE			PROD. SENS. VCS					
ESCAVAÇÃO	PRÉCORTE										R.O.D.										L.O. < L.O. FRAÇA MÉDIA FONTE			PERM. PERM. FRAÇA FONTE			PROD. SENS. VCS					
	TUNELADORA										> R.O.										L.O. < L.O. FRAÇA MÉDIA FONTE			PERM. PERM. FRAÇA FONTE			PROD. SENS. VCS					
	A REJEITAR										> R.O.										L.O. < L.O. FRAÇA MÉDIA FONTE			PERM. PERM. FRAÇA FONTE			PROD. SENS. VCS					

Fig. 7 — Recomendações relativas à escolha de suporte para túneis.

locação imediata de aduelas, ou à necessidade de tratamentos especiais de consolidação (classe X).

São em seguida analisados, em pormenor, outros aspectos fundamentais relativos ao maciço escavado (grau de fracturação, alterabilidade, hidrologia) e à própria obra (profundidade de escavação, dimensões da secção transversal do túnel, método de escavação, consequências eventuais à superfície), concluindo-se, com base nessa apreciação, da vantagem da utilização preferencial de certos tipos de suporte, face a condições particulares existentes, como a fracturação ou alterabilidade do maciço, a presença de água, a natureza superficial ou profunda da obra, etc.

É especialmente significativo, no que respeita a maciços rochosos, e tomando como referência a classificação inicial do terreno (fig. 6), formulada para escavação tradicional, a fogo, que a utilização de uma técnica de explosivos aperfeiçoada, que limite a perturbação induzida sobre o maciço ("smooth blasting", pré-corte) possibilita, de acordo com as recomendações, o ganho de uma classe na classificação e a escavação com tuneladoras, o ganho de duas classes.

Na fig. 7, é apresentado um quadro sinóptico das conclusões contidas nas recomendações, designando os quadrados mais escuros os tipos de suporte especialmente apropriados à natureza e condições do terreno e da obra, os quadrados brancos suportes utilizáveis, embora não particularmente recomendados e, finalmente, os quadrados de tom intermédio os tipos de suporte que, nessas condições, devem, em absoluto, ser rejeitados.

A classificação constitui assim um guião para selecção de suportes, proporcionando uma reflexão sobre a adequação dos diferentes tipos de sustimento às diferentes condições das obras.

2.6 — *Dimensionamento empírico de suportes em maciços rochosos (Rocha, 1976)*

Para além das situações extremas de maciços rochoso intacto e intensamente fracturado, em que é aceitável a idealização do maciço como meio contínuo, os maciços rochosos em que o espaçamento entre fracturas não é pequeno relativamente às dimensões da obra experimentam dificuldades quanto à sua adequada simulação, por incapacidade de representação nos modelos da totalidade das fracturas existentes e, bem assim, da propagação destas através da rocha, face ao novo estado de tensão associado à escavação. Para estes maciços, o autor propõe um dimensionamento essencialmente empírico, assimilando a solicitação sobre o

suporte ao peso de volumes do maciço, susceptíveis de se destacarem, em consequências das atitudes da fracturação e do vazio criado pela escavação. Admite-se um volume envolvente susceptível de carregar o suporte, com a forma indicada na fig. 8, definido pelas espessuras no coroamento h_c e nas nascenças h_n .

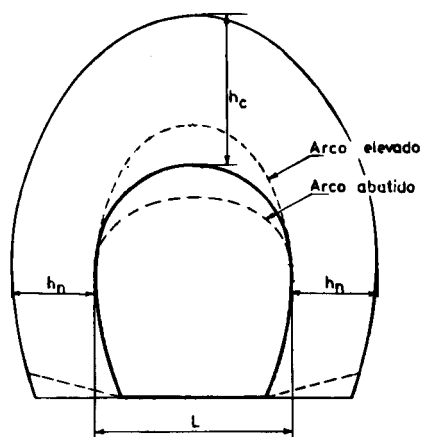


Fig. 8. — *Solicitação devida ao maciço envolvente.*

A fim de definir a constante K que relaciona h_c com o vão L do túnel, $h_c = K L$, a qual só depende das características do maciço rochoso, é este analisado segundo quatro parâmetros (fig. 9), susceptíveis de serem conhecidos, ou pelo menos estimados, em fase de projecto: espaçamento linear entre fracturas, sistema de fracturas, resistência ao corte das fracturas e influência da água no maciço. Atribuído um peso a cada um dos aspectos apreciados — por ordem, P_e , P_s , P_r , P_p , — de acordo com os critérios expressos na mesma figura, define-se para o maciço rochoso, um índice de qualidade $MR = P_e + P_s + P_r + P_p$, que permite determinar o valor de K e enquadrar o maciço numa de cinco classes, a que correspondem necessidades de suporte diferenciadas, que a classificação também indica (fig. 10). Determinadas dimensões h_c e h_n do volume, cujo peso constituirá a envolvente da solicitação sobre o suporte — o que não dispensa a verificação deste para cargas assimétricas parciais representadas pelo peso de outros volumes do maciço, tornados cinematicamente viáveis pelas atitudes da fracturação e pela escavação criada — pode então ser dimensionado, com base em métodos numéricos, o suporte do maciço por ancoragens, cintas, betão e suas combinações.

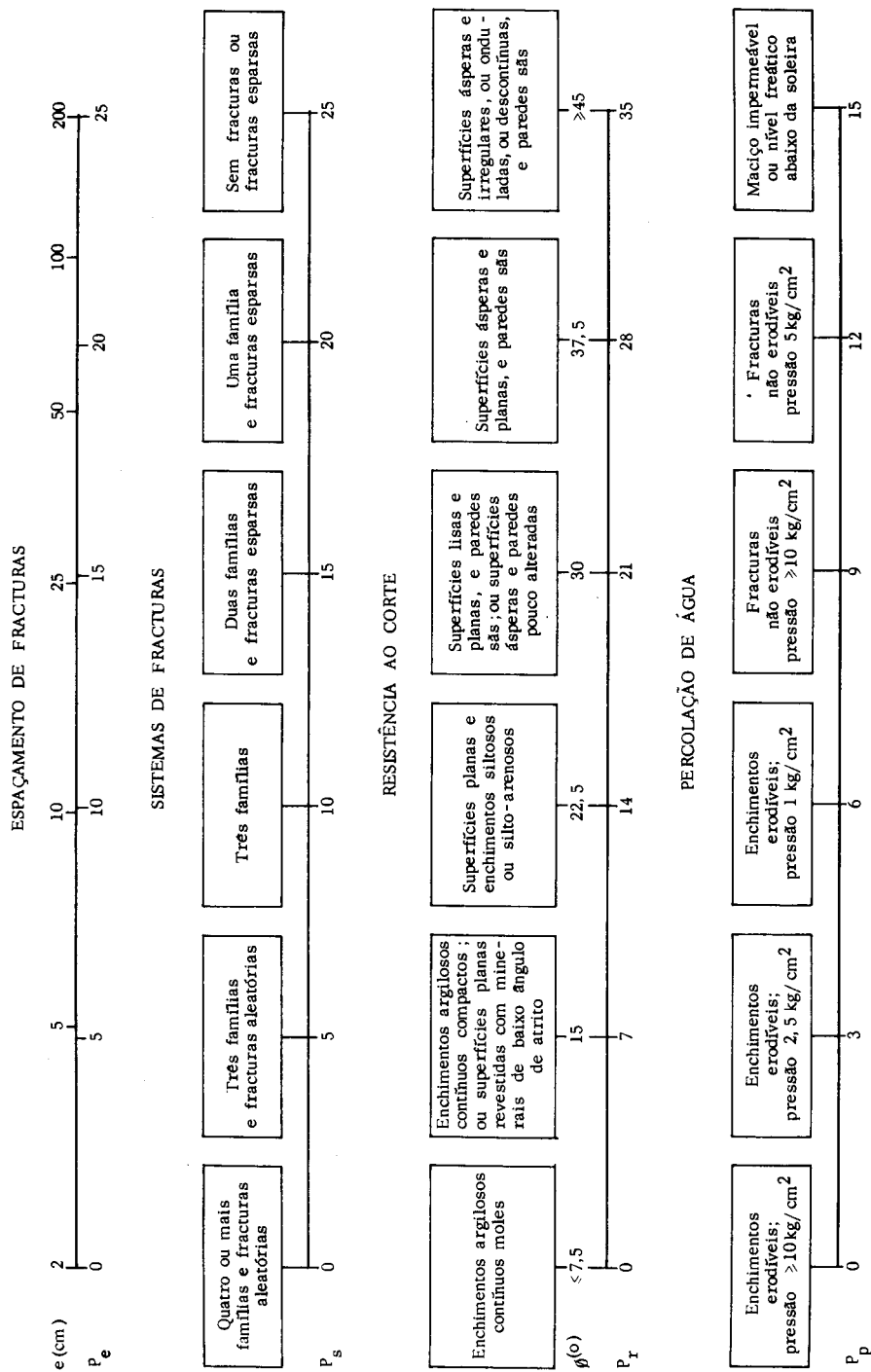


Fig. 9 — Dimensionamento empírico de suportes: apreciação do maciço rochoso.

CLASSE	MR	K	Necessidade de suporte
I	80-100	0-0,05	ESPORÁDICO NO TECTO (EX. ANCORAGENS)
II	60-80	0,05-0,3	SISTEMÁTICO NO TECTO
III	50-60	0,3-0,6	SISTEMÁTICO NO TECTO ESPORÁDICO NOS PÉS-DIREITOS
IV	30-50	0,6-0,9	SISTEMÁTICO NO TECTO
V	0-30	0,9-1	E PÉS-DIREITOS

Fig. 10 — *Classes do maciço e necessidades de suporte.*

A classificação apresentada contempla deliberadamente só aspectos relativos à fracturação — condicionante fundamental do comportamento dos maciços rochosos a que se destina — e baseia-se, também de forma intencional, em número restrito de parâmetros, por forma a ser utilizável em situações comuns de informação geotécnica muito limitada.

3 — CONCLUSÕES

Divulgadas algumas das mais importantes classificações geotécnicas para o projecto de túneis, importa notar que, apesar do esforço de sistematização e de objectivação de critérios que cada uma delas encerra, não deixam contudo de envolver sempre uma dose apreciável de subjectividade, ao reflectir a experiência dos seus autores e a respectiva opinião acerca da importância relativa dos diferentes parâmetros que utiliza, para o comportamento das obras a que se destina. A utilização de qualquer classificação exige, por consequência, uma cuidada leitura dos seus textos introdutórios, uma correcta apropriação das suas hipóteses de base e uma clara noção dos seus limites de aplicação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AFTES — “Texte provisoire des recommandations relatives au choix d'un type de soutènement en galerie”. Tunnels et Ouvrages Souterrains, n.º especial, 1976.
- BARTON, N.; LIEN, R.; LUNDE, J. — “Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support”. Rock Mechanics n.º 6, 1974.

- BIENIAWSKY, Z. T. — “Geomechanics classification of rock masses and its application in tunneling”. Tunneling in Rock, cap. 6, Pretoria, 1974.
- CUNHA, A. P. — “Algumas notas sobre classificação geotécnica de maciços rochosos”. Curso de Escavações em Maciços Rochosos. LNEC, Lisboa, 1979.
- CUNHA, A. P. — “Aplicação de modelos matemáticos ao estudo de túneis em maciços rochosos”. Tese para Especialista, LNEC, Lisboa, 1980.
- PACHER, F.; RABCEWICZ, L.; GOSLER, J. — “Zum derzeitigen stand der gebergs-kallsifizierung in stollen— und tunnelbau”. Proc. XXII Salzburg Geom. Colloquium, Viena, 1974.
- ROCHA, M. — “Estruturas Subterrâneas”. LNEC, Lisboa, 1976.
- WICKHAM, G. E.; TIEDEMAN, H. R.; SKINNER, E. H. — “Ground support prediction model — RSR concept”. Rapid Excavation and Tunneling Conference, S. Francisco, 1974.