

# A INFLUÊNCIA DOS ESTUDOS GEOLÓGICO-GEOTÉCNICOS NO PROJECTO E NO CUSTO DE CONSTRUÇÃO DE TUNEIS\*

## SITE INVESTIGATIONS, DESIGN AND CONSTRUCTION — A TUNNEL CASE HISTORY

por

J.A. RODRIGUES-CARVALHO\*\*

J.M. DA CONCEIÇÃO DAVID\*\*\*

RESUMO — Para um conjunto de três túneis foram elaborados dois projectos (1977 e 1980), apenas o último sendo baseado em adequado programa de estudos geológicos e geotécnicos. Os autores discutem a influência destes estudos no projecto e no custo da construção e apresentam o valor da relação benefício/custo respectivamente aos trabalhos realizados.

SYNOPSIS — The existence of two different designs (with and without site investigation) allowed to discuss the influence of the S.I. on both design and cost of construction, for a group of three tunnels. The savings on the cost of construction as well as the cost of the S.I. were assessed and a benefit/cost ratio was derived for the S.I. performed.

### 1 — CONSIDERAÇÕES GERAIS

Os benefícios dos estudos geológico-geotécnicos para obras de construção civil podem ser considerados sob dois aspectos — o geotécnico e o financeiro.

Os benefícios geotécnicos podem definir-se como o conhecimento das condições do terreno obtidas através de tais estudos e às quais o projecto deve adequar-se. À medida que aumenta este conhecimento (através dos estudos e trabalhos realizados) o risco de projectos inadequados às condições reais do terreno diminui, com implicações nos aspectos de segurança e custos (benefícios financeiros). Do exposto pode concluir-se que, na prática, benefícios geotécnicos e benefícios financeiros estão relacionados (RODRIGUES-CARVALHO e OLIVEIRA, 1982).

No caso de um dado projecto os benefícios geotécnicos podem ser avaliados empiricamente pelos especialistas envolvidos nos estudos geológico-geotécnicos (RODRIGUES-CARVALHO, 1981). No entanto, os benefícios financeiros de tais estudos

---

\* Trabalho recebido em Abril de 1985. A discussão do trabalho está aberta por um período de três meses.

\*\* Doutor em Geologia de Engenharia (Universidade de Londres). Professor da Universidade Nova de Lisboa.

\*\*\* Engenheiro Civil — COBA, SARL, Lisboa.

raramente podem ser quantificados. Para que tal pudesse ser conseguido seria necessário dispor de três valores: a) o custo dos estudos geológico-geotécnicos, b) o custo da obra projectada com base naqueles estudos e c) o custo da mesma obra cujo projecto fosse elaborado sem os referidos estudos. O que acontece normalmente é que apenas os valores a + b ou c estão disponíveis.

A dificuldade em quantificar os benefícios financeiros e, portanto, a ausência de exemplos na literatura é uma das razões pelas quais alguns donos de obras ainda se mostram relutantes em aceitar dispêndios com a realização dos estudos apropriados à elaboração dos projectos. Não existe dúvida, no entanto, que aqueles que estão cientes da sua importância esperam uma compensação para o dinheiro investido. Essa seria, no melhor, a constatação de que graças aos resultados dos estudos geológico-geotécnicos se havia produzido um projecto seguro e conseguido uma poupança em termos de custo da obra.

Neste trabalho os autores apresentam um caso para o qual se descreve a influência dos estudos geológico-geotécnicos no projecto e se quantificam os benefícios financeiros assim conseguidos.

O túnel denominado Funcho-Benaciate é, na realidade, um grupo de três túneis contíguos que estão integrados na adução entre a futura barragem do Funcho e as proximidades de Banaciate, no Algarve.

Para estes túneis foi elaborado em 1977 um projecto baseado em informação muito restrita no tocante às condições geológico-geotécnicas, a qual se resumia à obtida através de estudo de gabinete e de um reconhecimento.

Posteriormente, em 1980, e por razões hidráulicas, foi necessário refazer o projecto tendo então havido a oportunidade de realizar um adequado programa de estudos em cujos resultados se viria a basear o novo projecto.

Os três túneis são aqui referidos como inicial (460 m), intermédio (175 m) e final (988 m). No projecto de 1977 os túneis intermédio e final tinham os comprimentos de, respectivamente, 150 m e 800 m.

## 2 – CARACTERÍSTICAS DO MACIÇO

### 2.1 – *Litologia*

Os túneis inicial e intermédio serão escavados em xistos e grauvaques (flysh). Quanto ao túnel final atravessará, na sua maior parte, calcários, havendo a referir a presença de um dique de dolerito com a possança de 190 m. Entre este dolerito e o calcário ocorrem ainda uma formação brechóide e outra de argila margosa. Nos últimos 60 m o túnel final interessará marga calcária atravessada por dois filões doleríticos com 5 m e 12 m de possança (ver Fig. 1).

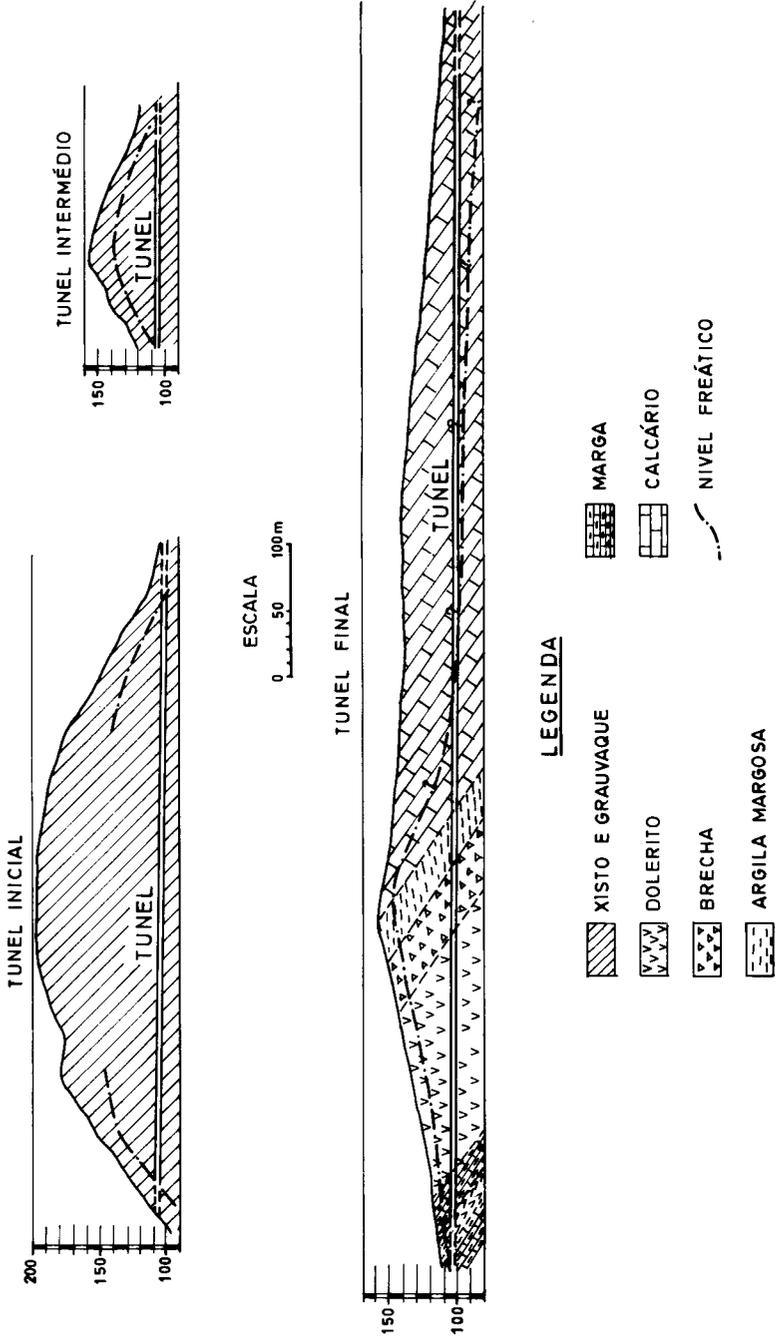


Fig. 1

## 2.2 – Estrutura

A atitude da xistosidade apresenta-se N(40°W-5°E); (45°-65°)E no caso do túnel inicial e N(20°-30°)W; (40°-60°)E no do intermédio. Os eixos destes dois túneis fazem ângulos de, respectivamente, 30° a 50° e cerca de 40° com a xistosidade.

A atitude da formação principal do túnel final é de N(45°-55°)E; (15°-30°)S.

Os xistos e grauvaques apresentam-se altamente deformados mostrando uma sucessão de dobras por vezes isoclinais, e são atravessados por várias zonas de esmagamento e filões de quartzo.

## 2.3 – Estado de alteração

De acordo com os estudos realizados os túneis inicial e intermédio interessarão um maciço que se apresenta muito alterado a decomposto ( $W_{4-5}$ ) até profundidade de cerca de 10 m, ocorrendo medianamente alterado ( $W_3$ ) daí até próximo dos 30 m e são a pouco alterado ( $W_{1-2}$ ) daí em diante. Nas zonas de esmagamento, em profundidade, o maciço apresenta-se muito alterado a decomposto ( $W_{4-5}$ ).

O maciço que interessará o túnel final ocorre muito alterado a decomposto até cerca de 15 m de profundidade a partir da qual passa a medianamente alterado ( $W_3$ ) ou é são a pouco alterado ( $W_{1-2}$ ). Na brecha a alteração atinge, no entanto, maiores profundidades.

## 2.4 – Água

A posição do nível freático encontra-se indicada na Fig. 1.

As sondagens realizadas foram acompanhadas da execução de ensaios de absorção de água sob pressão (Lugeon) utilizando patamares de pressão de 0.5; 1; 0.5 MPa. Eles permitiram concluir que, excepto para as zonas próximas dos emboquilhamentos e para os calcários do túnel final, as absorções eram menores que 1 U.L. às profundidades a que a escavação terá lugar.

Para os calcários verificou-se perda total de água durante os ensaios.

## 3 – OS ESTUDOS REALIZADOS E SEUS CUSTOS

No QUADRO I são apresentados o tipo e quantidade dos trabalhos de prospecção e ensaios realizados para o projecto de 1980.

QUADRO I — TIPO E QUANTIDADE DOS TRABALHOS DE PROSPECÇÃO E ENSAIOS REALIZADOS

TÚNEIS	SONDAGENS			PERFIS SÍSMICOS DE REFRACÇÃO		ENSAIOS COM DILATÓMETRO		ENSAIOS DE LABORATÓRIO	
	N.º	Comp. total (m)	N.º de ensaios Lugeon	N.º	Comp. total (m)	Número de horizontes ensaiados		Tipo e número de amostras	
INICIAL	4	151	12	2	240	Grauvaque	6	Comp. uniaxial (E, $\sigma_{ult}$ , $\nu$ )	4
INTERMÉDIO	4	143	17	2	152	Xisto	22	Carga pontual (point load)	19
FINAL	7	290	21	4	370	Dolerito	8	Velocidade de ultrasons	29
						Calcário	12		
						Brecha	4		
CUSTO (% DO CUSTO TOTAL DOS ESTUDOS)		50.6		1.5		26.9		1.9	

Os números inseridos na última linha do quadro somam apenas 80,9%. A diferença para 100% diz respeito ao custo referente ao corpo de geólogos de engenharia, que procedeu aos necessários estudos de gabinete e de campo, planeou, acompanhou e interpretou os resultados da prospecção e ensaios e que, finalmente, elaborou os respectivos relatórios.

O custo total dos estudos foi de  $3.7 \times 10^6$  Escudos, isto é, cerca de 1.2% do custo da construção, de acordo com a estimativa orçamental apresentada no projecto. Como quer o projecto quer a realização dos estudos tiveram lugar em 1980 não há lugar, para o cálculo daquela percentagem, a nenhuma correcção relacionada com eventuais erros que pudessem ser introduzidos devido à inflacção.

4 — DIFERENÇAS ENTRE OS PROJECTOS DE 1977 E DE 1980

Como já foi referido, para o projecto de 1977 os estudos resumiram-se a um reconhecimento de campo. O relatório geológico-geotécnico então elaborado sugeria para o comportamento mecânico do maciço rochoso valores extrapolados dos ensaios de caracterização mecânica que haviam sido executados no vizinho local da futura barragem do Funcho.

Os estudos realizados para o projecto de 1980 viriam a indicar que aqueles valores eram, em alguns casos, bastante diferentes especialmente no tocante ao tunel final. No QUADRO II isto é ilustrado tomando como exemplo a deformabilidade do maciço.

QUADRO II — DEFORMABILIDADE DO MACIÇO: VALORES SUGERIDOS (1977) E OBTIDOS ATRAVÉS DE ENSAIOS (1980).

TÚNEIS	TIPO DE ROCHA	1977 VALORES SUGERIDOS (MPa)	1980 RESULTADOS DOS ENSAIOS (MPa)*
INICIAL + INTERMÉDIO	Xisto e	8 000	7 000
	Grauvaque	15 000	36 000
FINAL	Dolerito	15 000	10 000
	Calcário	20 000	3 000
	Brecha	—	6 000

\* Módulo dilatométrico

Os estudos geológico-geotécnicos levados a cabo para o projecto de 1980 permitiram a zonamento geotécnico do maciço. Procedeu-se de seguida à aplicação das classificações de ROCHA (1975), BIENIAWSKI (1978) e WICKHAM et al. (1974), e à comparação dos seus resultados para cada zona, o que conduziu ao projecto do suporte. O QUADRO III mostra as diferenças entre os projectos de 1977 e 1980 no que respeita à espessura do suporte (e) e áreas de aço adoptadas (C).

	PROJECTO DE 1977			PROJECTO DE 1980		
		e (m)	$\Delta C$ (cm <sup>2</sup> /m)	ZONAS GEOTEC.	e (m)	$\Delta C$ (cm <sup>2</sup> /m)
TÚNEIS INICIAL + INTERMÉDIO	EMBOQUIL.	0.35	30	Z G 3	0.35	30
	OUTRAS ZONAS	0.25	25	Z G 1	0.25	14
TÚNEL FINAL	EMBOQUIL.	0.35	30	Z G 3	0.35	30
	OUTRAS ZONAS	0.25	25	Z G 2	0.35	19
				Z G 1	0.35	14

No projecto de 1977 foi utilizada uma densidade de aço de 130 kg/m<sup>3</sup> de betão enquanto que no de 1980 aquele valor desceu para 80 kg/m<sup>3</sup>.

## 5 — COMPARAÇÃO DE CUSTOS

As modificações introduzidas no projecto de 1980 conduziram a uma redução de custos da obra (estimativa de projecto) relativamente àqueles que se obteriam segundo os critérios adoptados no projecto de 1977. Tal redução foi inteiramente devida ao melhor conhecimento das características do maciço, o que foi conseguido através dos resultados dos estudos realizados.

Os números que a seguir se apresentam evidenciam a poupança conseguida e foram obtidos com base nos preços referidos pelo projectista no projecto de 1980. Esta poupança foi alcançada pela possibilidade de utilização de um reforço mais ligeiro no suporte: densidade de ferro de 130 kg/m<sup>3</sup> no projecto de 1977 contra 80 kg/m<sup>3</sup> no de 1980. O facto de a espessura do suporte ter aumentado de 0,25 m para 0,35 m num trecho de túnel final (ver QUADRO III) foi devidamente considerado.

	Custo de acordo com o projecto de 1980 (80 kg/m <sup>3</sup> )	Custo de acordo com o projecto de 1977 (130 kg/m <sup>3</sup> )	Montante economizado	
AÇO	Túneis inicial + interm.	10.6 × 10 <sup>6</sup> Esc.	17.3 × 10 <sup>6</sup> Esc.	6.7 × 10 <sup>6</sup> Esc.
	Túnel final	23.1 × 10 <sup>6</sup> Esc.	37.5 × 10 <sup>6</sup> Esc.	14.4 × 10 <sup>6</sup> Esc.
BETÃO	Túnel final	Aumento de volume devido ao aumento de espessura do suporte		<u>- 4.2 × 10<sup>6</sup> Esc.</u>
ECONOMIA TOTAL			16.9 × 10 <sup>6</sup> Esc.	
CUSTO TOTAL DOS ESTUDOS (1980)			3.7 × 10 <sup>6</sup> Esc.	
CUSTO ESTIMADO DA CONSTRUÇÃO (1980)			300 × 10 <sup>6</sup> Esc.	

## 6 — CONCLUSÃO

Os números apresentados permitem concluir que, com os estudos geológico-geotécnicos realizados para o projecto de 1980, se dispendeu o equivalente a 1.2% do custo estimado para a construção da obra e que os mesmos permitiram reduzir de 5.6% aquele mesmo custo.

Neste caso concreto, é simples obter um valor para a relação benefício/custo dos referidos estudos:

$$\frac{\text{BENEFÍCIO/CUSTO DOS ESTUDOS GEOLÓGICO-GEOTÉCNICOS}}{\text{BENEFÍCIO/CUSTO DOS ESTUDOS GEOLÓGICO-GEOTÉCNICOS}} \times \frac{16.9 \times 10^6 \text{ Esc.}}{3.7 \times 10^6 \text{ Esc.}} \times \frac{5.6\%}{1.2\%} \times 4.6$$

O exemplo apresentado pelos autores evidencia a importância dos estudos geológico-geotécnicos para a elaboração de um projecto adequado às condições naturais do terreno e ainda a economia a que tais estudos podem conduzir. De igual modo, permite concluir que as vantagens das classificações de maciços utilizadas para casos desta natureza se tornam efectivas apenas quando são baseadas em informação apropriada obtida através de estudos criteriosos.

É importante salientar que o coeficiente de segurança utilizado num projecto é elaborado com base em características do maciço assumidas, devido à inexistência de estudos geológico-geotécnicos adequados. A estrutura poderá resultar subdimensionada no caso de as características do terreno serem piores do que as assumidas. Pelo contrário, a inexistência daqueles estudos pode conduzir a um projecto sobredimensionado implicando custos desnecessariamente mais elevados.

Na opinião dos autores, os projectos baseados em características ou valores de parâmetros assumidos tendem a ser sobredimensionados em ordem a evitar riscos devido a desconhecimento das condições realmente ocorrentes. Isto não significa, de modo algum, que as estruturas projectadas possuam segurança exagerada ou que sejam, sequer, seguras.

## AGRADECIMENTOS

Os estudos geológico-geotécnicos para o túnel Funcho-Benaciate foram conduzidos pelo geólogo de engenharia A. Machado Leite. Os autores agradecem ao dono da obra (Direcção Geral dos Recursos e Aproveitamentos Hidráulicos) e à firma projectista (COBA, SARL) os elementos que tornaram possível este trabalho.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BIENIAWSKI, Z.T.(1974) — *Geomechanics classifications of rock masses and its application in tunneling*. Proceed, 3<sup>rd</sup> Congress ISRM. Denver.
- ROCHA, M. (1976) — *Estruturas subterrâneas. Notas de aula*. Universidade Nova de Lisboa, (não publicado).
- RODRIGUES-CARVALHO, J.A. (1981) — *Site investigation: its cost and benefit in Portugal*. PhD Thesis, University of London.
- RODRIGUES-CARVALHO, J.A. and OLIVEIRA, R. (1982) — *Cost and Benefit of site investigation for tunneling in Portugal*. Proceed, IV Intern. Congr. IAEG, Sect. IV, pp 167-173, New-Delhi, Dec.
- WICKHAM, G.E.L., TIEDMAN, H.R. and SKINNER, E.H. (1974) — *Ground support prediction model - RSR concept*. Rapid Excavation and Tunneling Conference, S. Francisco.
- OLIVEIRA, R. (1979) — *Engineering geological problems related to the study of dam foundations*. Panel Report, Theme I. Intern. Symposium on Engineering Geological Problems related to Hydrotechnical Construction Tbilisi (URSS).
- OLIVEIRA, R. and J. MOURA ESTEVES (1980) — *Geophysical exploration at the Ruhr — Neger tunnel*. LNEC internal report. Lisboa.
- OLIVEIRA, R. (1982) — *Obras subterrâneas*. Notas de aulas. Curso de Mestrado de Geologia de Engenharia. Universidade Nova de Lisboa.
- OLIVEIRA, R., C. COSTA and J. DAVID (1983) — *Engineering Geological studies and design of Castelo do Bode tunnel*. Theme I. Proceedings Int. Symposium on Engineering Geology an Underground Construction, vol. 2. Lisboa.
- OLIVEIRA, R. and J.G. CHARRUA GRAÇA (1985) — *In situ tests in rock masses*. Chapter 26, Ground Engineer's Reference Book. Edited by F. Bell, under publication by Butterworth, England.
- PINTO DA CUNHA, A. (1980) — *Aplicação de modelos matemáticos ao estudo de túneis em maciços rochosos*. Tese para especialista. LNEC. Lisboa.
- ROCHA, M. (1976) — *Estruturas Subterrâneas*. Lições dos Cursos de Mestrado em Geologia de Engenharia e Mecânica dos Solos. Universidade Nova de Lisboa.
- RODRIGUES CARVALHO, J. and RICARDO OLIVEIRA (1982) — *Cost and benefit of site investigation for tunneling in Portugal*. Proceedings IV Congress Int. Association of Engineering Geology, vol. IV, Theme 2. New Delhi.
- TERZAGHI, K (1946) — *Rock defects and loads on tunnel supports*. Introduction to Tunnel Geology.
- WICKAM, G.E., H.R. TIEDMAN and E.H. SKINNER (1974) — *Ground support prediction model - RSR Concept*. Proceedings Rapid Excavation and Tunnelling Conference, vol. 1. S. Francisco.