
ESTRUTURAS SUBTERRÂNEAS

Algumas imagens retiradas de:
C. Derek Martin – Site Investigation II
Nadir Plasência – tese de mestrado IST

Estruturas subterrâneas

- Diversas finalidades
- Tipos de estruturas
 - Lineares
 - Localizadas
- Dados importantes para o estudo geológico-geotécnico:
 - Finalidade
 - Secção
 - Perfil longitudinal
 - Traçado
 - Pendente
 - Escavações adjacentes
 - Emboquilhamentos
 - Acessos intermédios

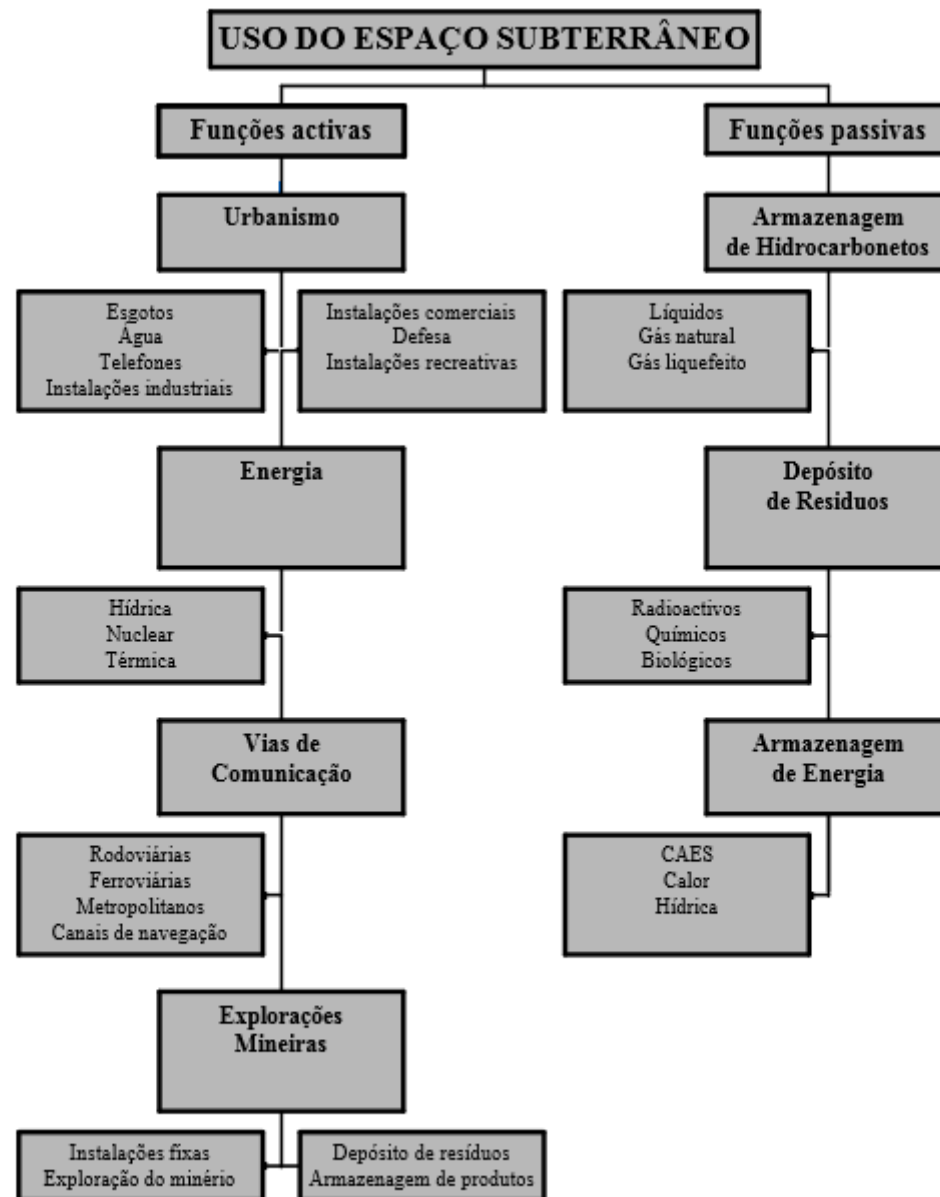


Figura 1. Domínios de aplicação no uso do espaço subterrâneo

Estruturas subterrâneas



Estruturas subterrâneas



Estruturas subterrâneas

Terzaghi's 1946 Classifications

Intact rock	contains neither joints nor hair cracks. Hence, if it breaks, it breaks across sound rock. On account of the injury to the rock due to blasting, spalls may drop off the roof several hours or days after blasting. This is known as a spalling condition. Hard, intact rock may also be encountered in the popping condition involving the spontaneous and violent detachment of rock slabs from the sides or roof.
Stratified Rock	consists of individual strata with little or no resistance against separation along the boundaries between the strata. The strata may or may not be weakened by transverse joints. In such rock the spalling condition is quite common.
Moderately jointed Rock	contains joints and hair cracks, but the blocks between joints are locally grown together or so intimately interlocked that vertical walls do not require lateral support. In rocks of this type, both spalling and popping conditions may be encountered.
Blocky and Seamy Rock	consists of chemically intact or almost intact rock fragments which are entirely separated from each other and imperfectly interlocked. In such rock, vertical walls may require lateral support.
Crushed Rock	chemically intact rock has the character of crusher run. If most or all of the fragments are as small as fine sand grains and no recementation has taken place, crushed rock below the water table exhibits the properties of a water-bearing sand.
Squeezing Rock	slowly advances into the tunnel without perceptible volume increase. A prerequisite for squeeze is a high percentage of microscopic and sub-microscopic particles of micaceous minerals or clay minerals with a low swelling capacity.
Swelling Rock	rock advances into the tunnel chiefly on account of expansion. The capacity to swell seems to be limited to those rocks that contain clay minerals such as montmorillonite, with a high swelling capacity.

Estruturas subterrâneas

- Objectivos do estudo geológico-geotécnico:
 - Definir as condições geológico-geotécnicas e hidrogeológicas
 - Identificação de zonas de maior complexidade
 - Definir traçado, escavação e estabilidade dos emboquilhamentos
 - Tratamento de terrenos
 - Tensão no sustimento – determinação do estado de tensão
- Critérios geomecânicos que condicionam:
 - **Zonamento geotécnico**
 - **Método de escavação**
 - **Sustimento**

 - **Projecto adequado**
 - **Evitar aumento de custos**
 - **Evitar atrasos e acidentes**

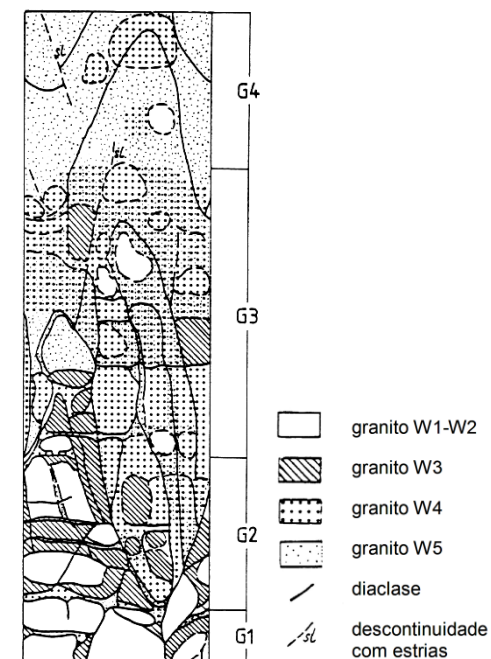
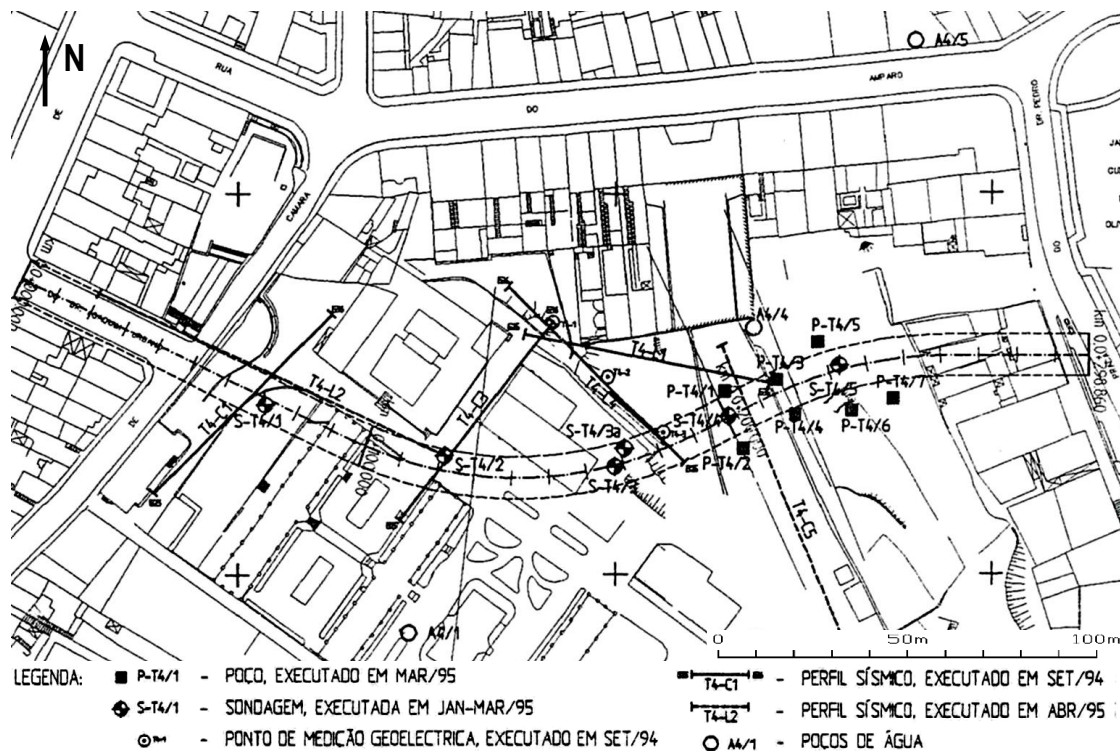
Estruturas subterrâneas

- Métodos de prospecção devem estar de acordo com as fases de projecto
- Estudo prévio deve abranger uma faixa de 1 a 2 km de largura
- Sondagens devem intersectar o maior número de formações com o menor comprimento
- Devem ser programadas prevendo realização de ensaios in situ
- Dependendo da complexidade, devem realizar-se 3 ou mais sondagens nos emboquilhamentos
- Para túneis pouco extensos (1 a 2 km) o comprimento total de furação deve ser da ordem de grandeza do túnel
- A distância entre sondagens pode ir de 50 a 500 metros dependendo das características do maciço e do túnel
- Ensaios de permeabilidade fazem-se numa extensão de 3 ou 4 vezes o diâmetro do túnel
- Galerias piloto

Para túnel de dificuldade média, comprimento total das sondagens superior a 50% da dimensão longitudinal do túnel (Galera Fernández, 2000)

São mais os casos de obra em que após construção se considera que mais prospecção teria permitido uma diminuição dos custos e dos prazos, do que os casos em que se considerou a prospecção excessiva

Estruturas subterrâneas

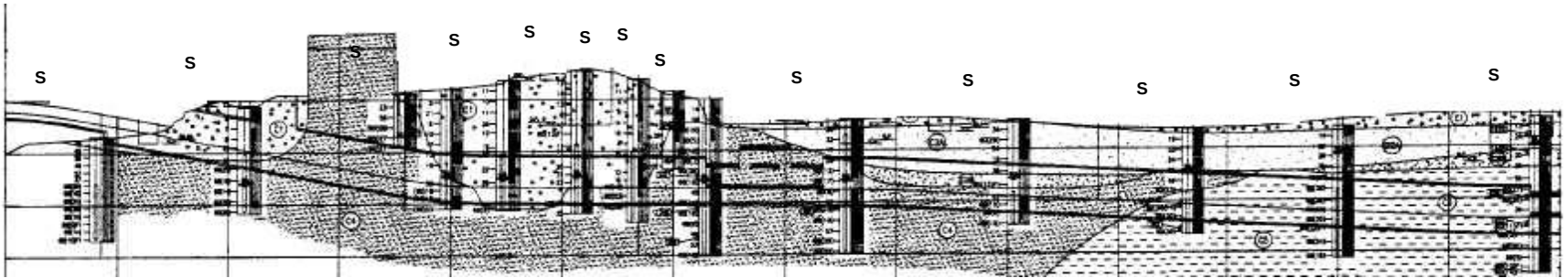


Modelo do perfil de meteorização

Sondagens realizadas correspondem a 85% do comprimento total do túnel.

Permitiram o enquadramento do túnel no modelo do perfil de meteorização típica dos granitos.

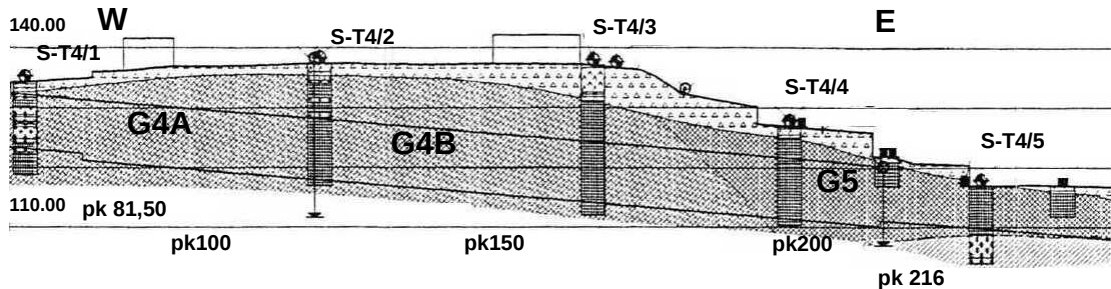
Estruturas subterrâneas



- coberturas mais reduzidas dos túneis urbanos, é normalmente possível que as sondagens ultrapassem a soleira do túnel

Parâmetros de projecto		Zonas Geotécnicas		
		ZG1	ZG2	ZG3
γ_d (kN/m ³)	peso volúmico	25	20	19
c' (MPa)	coesão efectiva	0.3	0	0
ϕ' (°)	ângulo de atrito efectivo	30	40	34
E (GPa)	módulo de elasticidade	10	0,1	0,03
ν	coeficiente de Poisson	0,30	0,35	0,30

Estruturas subterrâneas



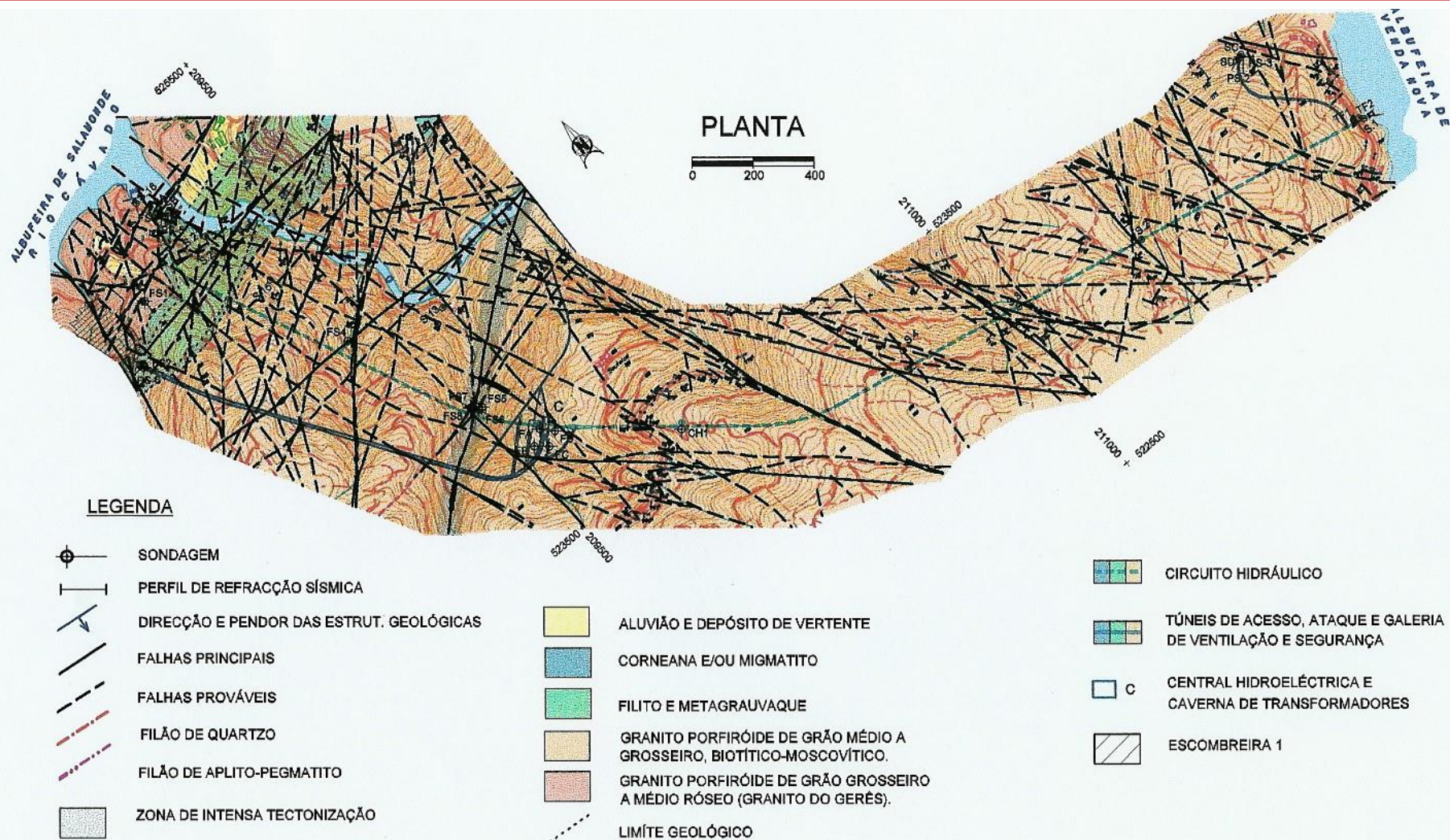
A prospecção concluiu que o maciço seria mais resistente junto à boca Oeste.

NATM

Perfil geológico-geotécnico pelo eixo do túnel, realizado no estudo prévio.

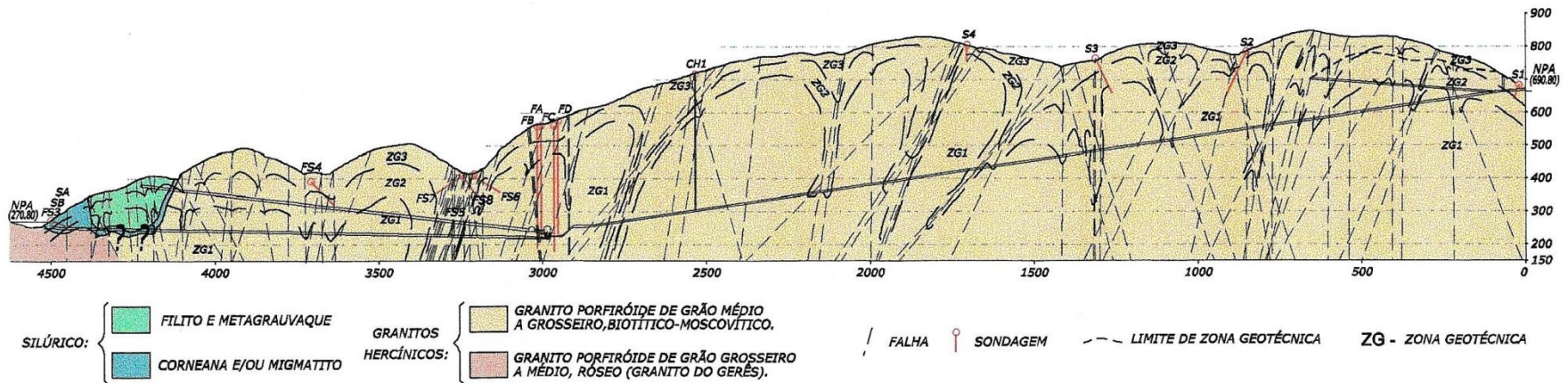
Unidades Geotécnicas	Características geotécnicas	Condições específicas	Método de escavação	Suporte tipo (1)
G4 (G4A) pk81,5-101,5	Bolas de tamanho variável inseridas no W5, W4. Instabilidade devido ao desprendimento de bolas e à rotura ao longo de estrias preservadas no granito W5. Deformação potencial elevada.	Cobertura reduzida Estruturas à superfície	Escavação mecânica. Muito pouco provável a utilização de explosivos.	IIId
G4 (G4A/G4B) pk101,5-120	Bolas de tamanho variável inseridas no W5, W4. Instabilidade devido ao desprendimento de bolas e à rotura ao longo de estrias preservadas no granito W5. Deformação potencial elevada.	-----	Escavação mecânica. Muito pouco provável a utilização de explosivos.	IIId
G4 (G4B) pk120-170	Algumas bolas de tamanho variável inseridas no W5, W4. Instabilidade devido ao desprendimento de bolas e à rotura ao longo de estrias preservadas no granito W5. Deformação potencial elevada.	Cobertura relativamente reduzida Estruturas à superfície	Escavação mecânica. Muito pouco provável a utilização de explosivos.	IIId
G4/G5 (G4B/G5) pk170-216,7	Raras bolas de tamanho variável inseridas no W5, W4. Pode aumentar a quantidade de W4-W3 no lado Sul. Instabilidade devido ao desprendimento de bolas e à rotura ao longo de estrias preservadas no granito W5. Deformação potencial elevada.	Cobertura reduzida	Escavação mecânica.	IIId

Estruturas subterrâneas



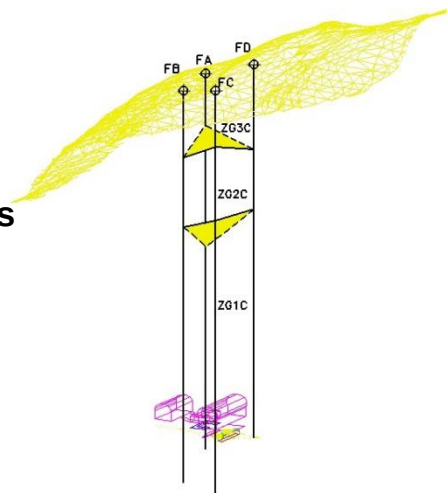
A prospecção foi dimensionada de forma a permitir particularmente a identificação da geometria e características da falha da Botica, do maciço da zona das cavernas e das bocas.

Estruturas subterrâneas

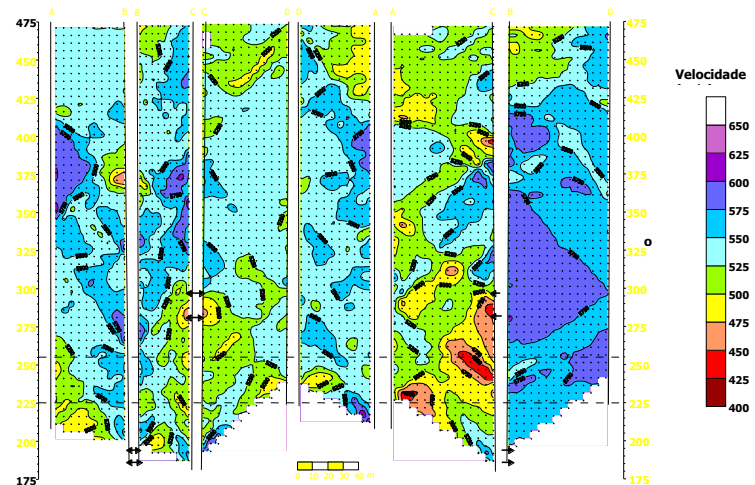


Perfil longitudinal com zonamento geológico-geotécnico do circuito hidráulico de Venda Nova II, com a informação adicional dos túneis de acesso e da prospecção complementar realizada na tomada de água em bombagem.

Nas sondagens profundas da zona das cavernas foram feitas tomografias sísmicas. De uma forma geral não atingiram as cotas das escavações. As sondagens corresponderam a cerca de 60% da extensão dos túneis.



TOMOGRAFIAS SÍSMICAS DE VELOCIDADE DAS ONDAS



Estruturas subterrâneas

ZONA	ROCHA	ALTERAÇÃO e FRACTURAÇÃO	RQD (%)	VEL. PROPAG. ONDAS SÍSM. (Vp) (m/s)	Er (GPa)	UCS (MPa)	PERMEABILIDADE (U. L.)			
							>10	10-2	2-1	<1
ZG3	Granito	W5, F5 a W2-W3, F4	0 - 70	800 - 2 800	< 15	-	36%	29%	9%	26%
ZG2	Granito	W2-W3,F3-F4 a W2,F1-2	70-95	3 000 - 4 600	15,5 - 25,4	25,7 - 47,8	1%	27%	9%	63%
ZG1	Granito	W1-2,F2-F3 a W1,F1	95-100	> 4 800	24,6 - 78,8	54,0 - 89,0	2%	2%	4%	92%
	Migmatito	W1-2,F2-F3 a W1, F1	95-100	> 4 800	26,6 - 78,8	43,2 - 66,1	-	-	25%	75%

Estruturas subterrâneas

OBRAS SUBTERRÂNEAS	URBANAS Pouco profundas	NÃO URBANAS Médias a grandes profundidades
Tipo Predominante de Formações	Solos ou maciço rochoso com comportamento de solo.	Maciço rochoso com descontinuidades.
Geofísica por Métodos Sísmicos	•dificultada pela malha urbana e pelas infraestruturas •mais proveitosa se realizada entre furos, com a possibilidade de obter parâmetros geomecânicos •ruído urbano é condicionante •método de refração oferece melhores resultados que a reflexão	•dificultada pelas coberturas vegetais •ajuda dimensionamento de sondagens •utilizada entre furos permite caracterização do maciço •métodos de reflexão possibilitam a prospecção a grande profundidade
Sondagens e Poços	• poços podem ser adequados nas bocas • é exequível atingir com sondagens profundidades que ultrapassem a <u>soleira</u> dos túneis • <u>localização</u> das sondas é dificultada pelo <u>tecido urbano</u> poderá ter interesse o uso das sondagens direccionadas	• pode ser <u>complicado o acesso das sondas</u> • <u>dispendioso e moroso</u> prospectar até às <u>cotas de implantação das obras</u> • sondagem direccionada poderá vir a ser útil para ultrapassar algumas dificuldades
Galerias de reconhecimento	•não é frequente a realização de galerias de reconhecimento	•galerias de reconhecimento são principalmente realizadas para prospecção em locais de cavernas, no entanto, só é possível a sua realização após execução de túneis de acesso

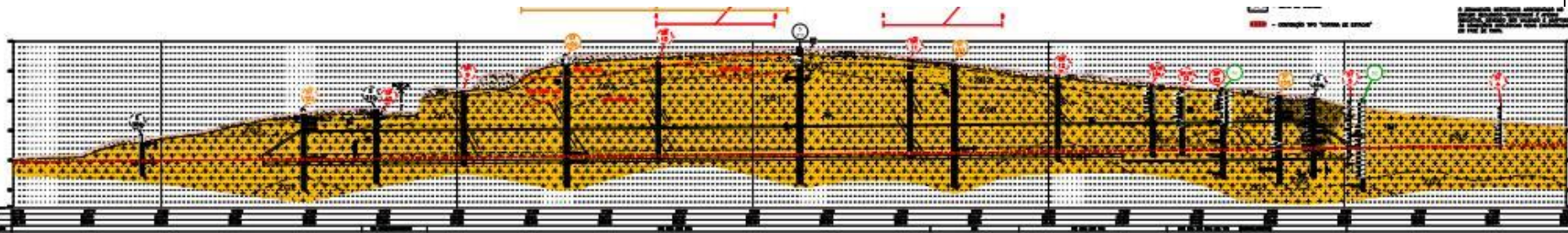
Estruturas subterrâneas

- Classificações de maciços:
 - Objectivo: obter parâmetros de resistência e deformabilidade que permitam estimar sustimento a aplicar
 - Qualidade é quantificada com base em ensaios e observações simples
 - Permitem prever o comportamento e recomendar tipos de suporte
 - Período auto-portante
 - Distância de avanço/vão livre
 - Mais utilizadas:
 - RMR
 - Q system

Estruturas subterrâneas

OBRAS SUBTERRÂNEAS	URBANAS Pouco profundas	NÃO URBANAS Médias a grandes profundidades
Tipo Predominante de Formações	Solos ou maciço rochoso com comportamento de solo.	Maciço rochoso com descontinuidades.
Classificações de Maciços	• <u>profundidade e meteorização</u> do maciço condicionam a utilização das classificações • classificações usadas mais a título indicativo e no sentido de permitir o <u>zonamento</u> • o sistema Q, como considera a cobertura pode ser interessante • classificação do <u>NATM</u> será a <u>mais indicada</u> quando perante maciço intensamente meteorizado	• são aplicáveis, de modo geral, <u>todas as classificações</u> (NATM, RMR, Q e GSI)
Condições Geológicas Singulares	• blocos resistentes em solos ou rochas alteradas (associadas à heterogeneidade do maciço) • no caso de maciços ricos em argilas expansivas, poderão surgir fenómenos de expansibilidade • não está excluída a presença de falhas	• zonas de falha mais ou menos tectonizadas • fenómenos de expansibilidade devido a afluições de água • fenómenos de fluência devido à acção de tensões.

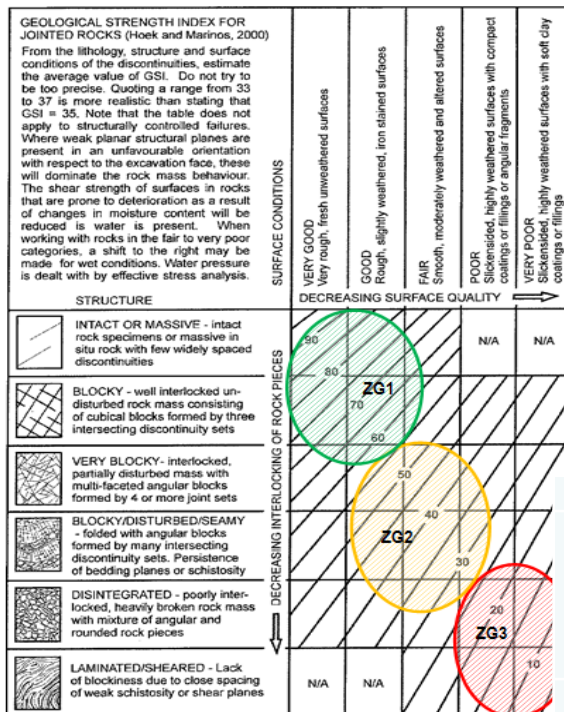
Estruturas subterrâneas



Estruturas subterrâneas

Do ponto de vista geológico, o túnel de Águas Santas **localiza-se exclusivamente em terrenos do denominado "Granito do Porto"**. Trata-se de um maciço de idade hercínica, constituído por um granito alcalino, leucocrata, de grão essencialmente médio a grosseiro, de duas micas, apresentando textura não porfiróide

Classificação Geotécnica RMR (Bieniawski, 1989) e GSI (Hoek & Marinos 2000)
 * valores indicativos de referência, por definição os resultados do índice são expressos em gama de valores.

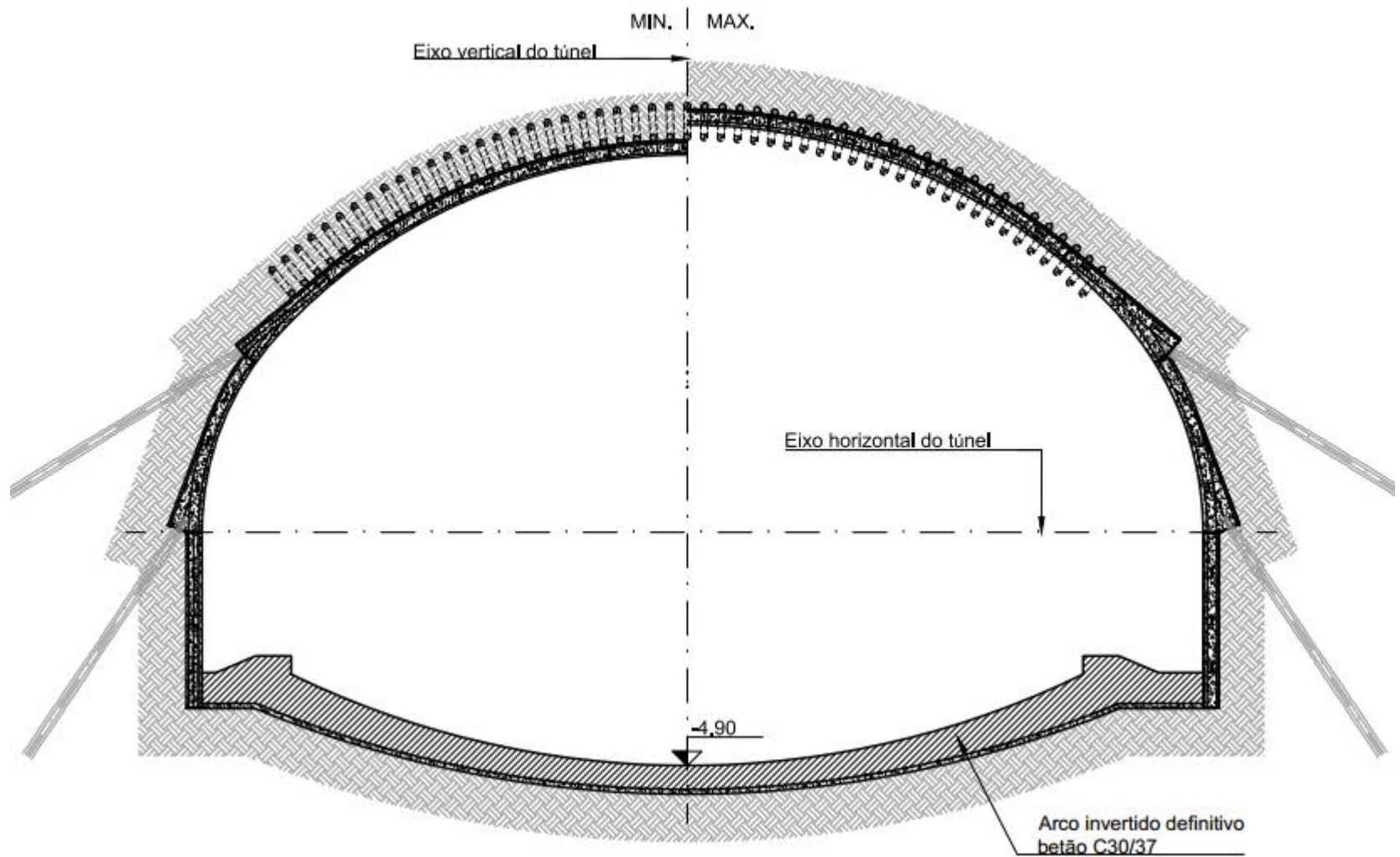


ZONA	RMR Básico	GSI*	Classe	Descrição
ZG3	<30	<25	IV	Maciço fraco
ZG2	30-60	25-55	IV - III	Maciço fraco a razoável
ZG1	>60	>55	II	Maciço bom

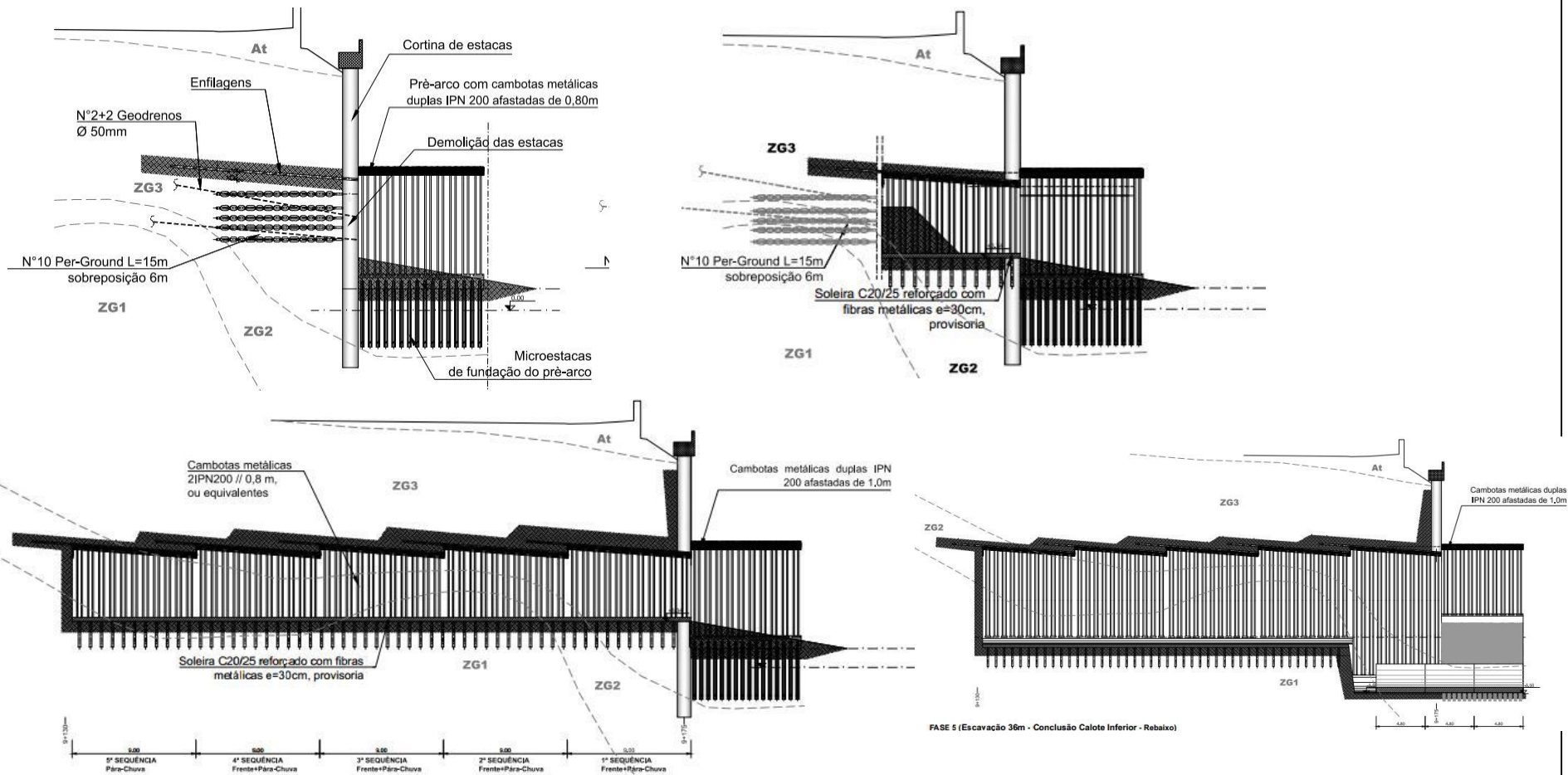
Tabela 8.4: Parâmetros Geomecânicos Adoptados para os Túneis

Zona geotécnica	Litologia	N _{spt}	Túnel							
			Parâmetros de resistência segundo o critério de Mohr-Coulomb			Parâmetros de resistência segundo o critério de Hoek/Brown			Parâmetros de Deformabilidade	
			g (KN/m ³)	c' (kpa)	f(°)	m _b	s	a	Em (Gpa)	v
ZG3	Granito	>50	20	20	36	-	-	-	0.07	0.25
ZG2		-	24	75	45	3.520	0.0013	0.5	0.3	0.20
ZG1		-	25	175	55	6.014	0.0067	0.5	6	0.20

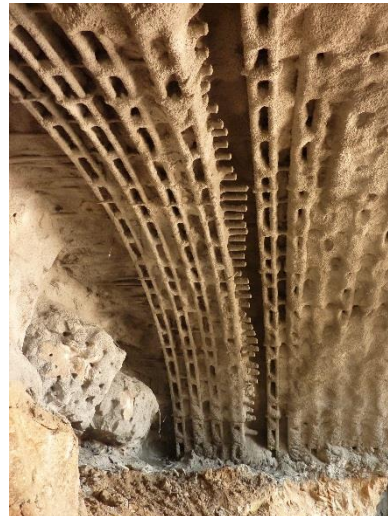
Estruturas subterrâneas



Estruturas subterrâneas



Estruturas subterrâneas

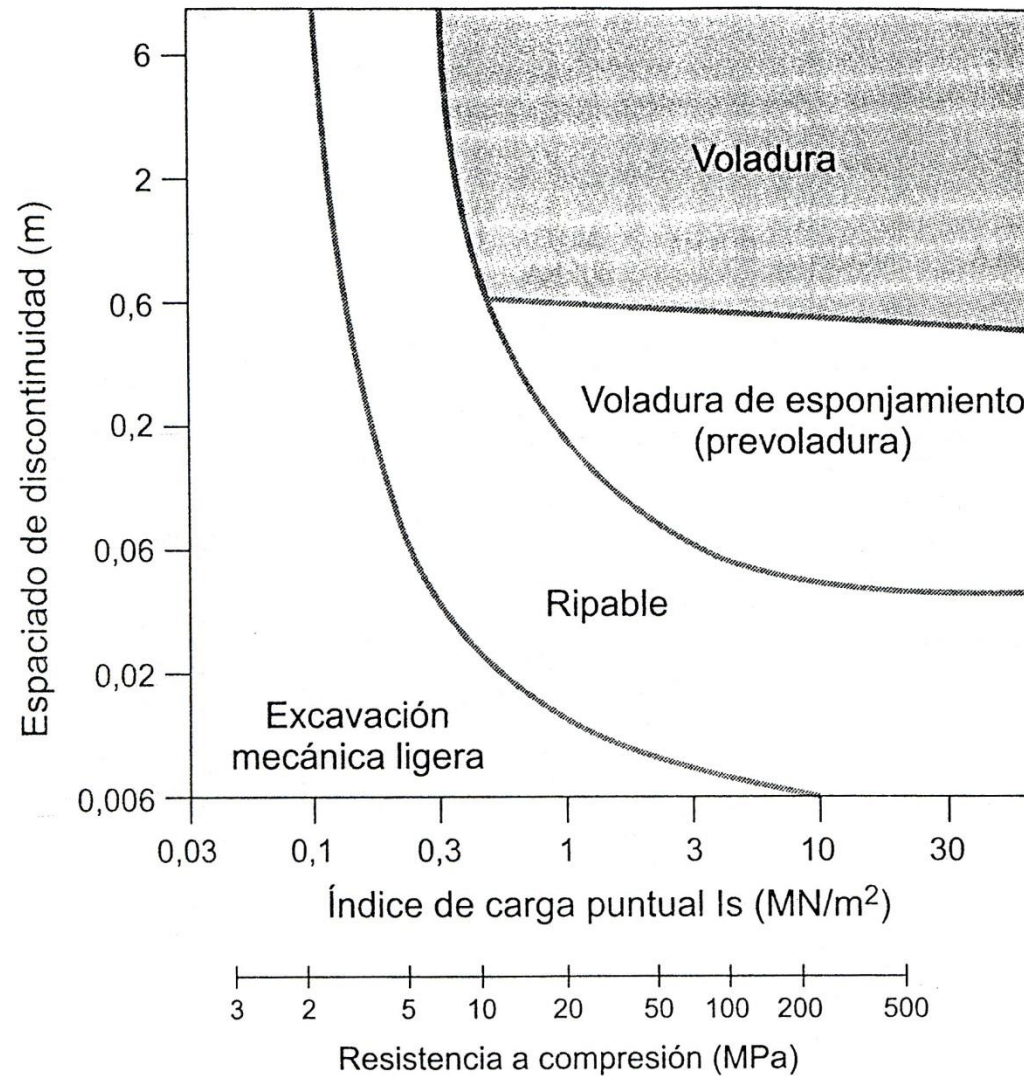


Estruturas subterrâneas

- Critérios de escavabilidade:
 - Resistência do material rocha
 - Dureza e abrasividade
 - Fracturação
 - Índices de qualidade geomecânica

- Métodos de sustimento:
 - Betão projectado ou gunito
 - Malha electrosoldada
 - Pregagens
 - Aduelas ou perfis metálicos

Estructuras subterráneas



Estruturas subterrâneas

Quadro 2-8 - Métodos de desmonte em túneis em maciços rochosos (Bastos, 1998; Silva, 2009b; adaptados).

Método	Fundamento	Vantagens	Limitações
Explosivos	Perfuração do maciço, enchimento dos furos com material detonante e sua ulterior detonação; possibilidade de uso de microretardos e/ou pré-corte.	Método muito flexível; facilidade em executar sondagens de avanço e diagrfias a partir da frente de escavação; cominuição da rocha facilita a sua remoção e transporte.	Baixo rendimento; eventual sobreescavação; vibrações induzidas; ruídos, gases, poeiras e projecção de material (partículas e/ou blocos); eventual perturbação do maciço remanescente por sobrefracturação.
Tuneladoras	Máquinas de escavação que consiste numa coroa de corte ajustável à face do túnel, que ao rodar a uma velocidade constante e ao ser empurrada contra a frente da escavação, vai desmontando o maciço.	Elevados rendimentos (até 5 vezes superiores aos métodos convencionais); diversos tipos de cortadores adaptáveis a diversos materiais.	Elevados custos iniciais, sendo rentável em túneis longos; caso de túneis abaixo do nível freático poderá haver problemas de estabilidade importantes; implicam uma grande área de estaleiro junto aos emboquilhamentos; maciço deve ser pouco heterogéneo, em especial no que respeita à deformabilidade; desgastes anormais das peças de corte implicam paragens de substituição.
Roçadoras	Máquina de escavação pontual por recurso a uma cabeça de corte, a adequar consoante o material a escavar, situada num braço com relativa amplitude de movimentos.	Melhor eficácia em rochas brandas; tipos de cabeça adaptáveis aos diversos materiais rochosos.	Escavação de terrenos rochosos apenas com resistência à compressão média, no máximo.

Estruturas subterrâneas

Índice de Schimazek:

$$F_{\text{Schim}} = Q \cdot d_{50} \cdot \sigma_t \quad (\text{eq. 2.1})$$

sendo,

F_{Schim} – coeficiente de abrasividade (N/mm);

Q – conteúdo em quartzo equivalente dos minerais abrasivos (%);

d_{50} – diâmetro médio do grão de quartzo (mm);

σ_t – resistência à rotura por tracção, ensaio brasileiro (N/mm², ou seja MPa).

Quadro 2-9 – Abrasividade das rochas a partir do índice de Schimazeck (Vallejo, 2002, adaptado).

Abrasividade - F (kPa/cm)	Roçagem
0,2 – 0,3	Muito Boa
0,3 – 0,4	Boa
0,4 – 0,5	Moderada
0,5 – 0,6	Regular
0,6 – 0,8	Fraca
0,8 – 1,0	Muito fraca

Estruturas subterrâneas

- Factores de risco durante a construção (descontinuidades, tensões, água):
 - Cruzamento de falhas e zonas de fractura
 - Contacto entre formações muito diferentes
 - Instabilidade de cunhas e terrenos brandos
 - Existência de tensões importantes
 - Presença de cavidades
 - Fluxos de água elevados
 - Solos e rochas expansivos
 - Rockburst

Estruturas subterrâneas

- Tuneladoras:

- Vantagens

- Maior ritmo de construção
 - Menor sobreperfil de escavação
 - Menor perturbação do maciço
 - Menor revestimento e tratamento de terrenos
 - Maior simplicidade e eficácia na colocação de suporte
 - Melhores condições de trabalho e segurança

- Limitações

- Depende das condições locais
 - Depende do traçado (pendente, curvatura, comprimento)
 - Implica um elevado investimento inicial
 - Implica rigoroso conhecimento do maciço

Estruturas subterrâneas

- Instrumentação
 - Medição sistemática de deformações e tensões devidas à escavação e sustimento (diariamente no início e depois mais espaçada no tempo)
 - Controlo do movimento do sustimento
 - Controlo de caudais
 - Medição de deslocamentos à superfície e no interior do túnel (extensómetros e inclinómetros)
 - Controlo de movimentos em edifícios vizinhos (p. ex. assentamentos)
 - Controlo de pressões sobre o túnel (células de carga)

Estructuras subterráneas

