



**As características geotécnicas de um maciço como factores preponderantes na planificação e organização de obras de escavação subterrâneas – uma perspectiva sobre a produção.**

**João Rodrigo de Oliveira Vilela**





**Instituto Superior de Engenharia do Porto**  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA

**As características geotécnicas de um maciço como factores preponderantes na planificação e organização de obras de escavação subterrâneas – uma perspectiva sobre a produção.**

**João Rodrigo de Oliveira Vilela**

**1030449**

*Relatório de projecto apresentado ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Geotécnica e Geoambiente, realizada sob a orientação do Eng<sup>o</sup> Carlos Galiza, Professor adjunto do Departamento de Engenharia Geotécnica do ISEP, do Dr. Paulo Meixedo, Professor adjunto do Departamento de Engenharia Geotécnica do ISEP.*



## **Júri**

### **Presidente**

Doutor Helder Gil Iglésias de Oliveira Chaminé  
*Professor Coordenador, Instituto Superior de Engenharia do Porto*

Doutor José Augusto de Abreu Peixoto Fernandes  
*Professor Coordenador, Instituto Superior de Engenharia do Porto*

Doutor João Paulo Meixedo dos Santos Silva  
*Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto*

Engenheiro António Carlos Reis Galiza Carneiro  
*Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto*

Engenheiro António Rodrigues Vieira  
*Equiparado a Assistente, Instituto Superior de Engenharia do Porto*



## **Agradecimentos**

À administração da D.L.O.E. A.C.E., e direcção da obra, pela oportunidade que me deram para desenvolver este estudo e de complementar a minha aprendizagem em ambiente profissional, adquirindo assim conhecimentos de carácter prático de inegável importância.

A todos os docentes do departamento de geotecnia, pelos conhecimentos que me transmitiram ao longo da minha vida académica.

Aos meus orientadores Eng<sup>o</sup>. Carlos Galiza, pela orientação que providenciou para o desenvolvimento deste estudo, e pelos conselhos e conhecimentos transmitidos ao longo de todo o curso, ao Dr. João Paulo Meixedo pela ajuda indispensável disponibilizada e ao Eng<sup>o</sup>. Ricardo Oliveira (D.L.O.E.), pelo auxílio e coordenação fornecidos ao longo do meu estágio e pela gentil cedência de elementos técnicos, que auxiliaram o desenvolvimento deste documento.

Ao Dr. Hélder Chaminé, pelos conselhos e apoio fornecidos na fase final da elaboração do documento e pelos ensinamentos transmitidos.

À Dr<sup>a</sup> Salomé Barbosa e Eng. Tânia Ramos da D.L.O.E., pelo acompanhamento e auxílio dispensados durante o estágio, ao Eng<sup>o</sup> Mário Marques (Teixeira Duarte) pela informação disponibilizada, e ainda ao Eng<sup>o</sup> José Torres pela sua amizade, companheirismo, e colaboração.

Os meus agradecimentos também ao Dr. José Augusto Fernandes pela facilitação dos laboratórios de geotecnia e materiais de construção (LGMC) Departamento de Engenharia Geotécnica e Geoambiente do ISEP para efeitos de ensaios laboratoriais a amostras recolhidas e ao técnico responsável, Rogério Pinheiro, pelo auxílio prestado no desenvolvimento dos mesmos, de grande importância para a conclusão deste trabalho.

Aos meus colegas e amigos de curso que me apoiaram e acompanharam ao longo de todo este percurso de aprendizagem.

À minha irmã Sónia pela sua ajuda e amizade sempre presente.

E por fim, e mais importante, aos meus pais pelo apoio indispensável e incondicional que sempre me dispensaram ao longo da minha vida.

Muito Obrigado.



## **Palavras Chave**

Maçiços Rochosos, Geomecânica, Carga pontual, escavação subterrânea, suporte de túneis.

## **Resumo**

Com o presente documento pretende-se abordar e identificar os diferentes factores que influenciam directamente a produção e execução de uma escavação subterrânea, com especial relevo sobre a influência exercida pela geotecnia do maciço intersectado.

Inicialmente são focados os principais aspectos a ter em conta na caracterização geotécnica de um maciço, seguindo-se uma introdução a diferentes métodos de escavação actuais e metodologias de suporte de uma obra subterrânea, com particular realce para os utilizados em maciços brandos.

Depois de tratados estes conceitos, é apresentada uma obra subterrânea em execução que foi acompanhada durante 4 meses para efeitos de desenvolvimento deste estudo.

Assim, são abordados neste documento diferentes aspectos construtivos, no que diz respeito à mão-de-obra utilizada, metodologias e técnicas aplicadas, redes técnicas auxiliares instaladas, produções e rendimentos verificados.

De seguida e de modo a atestar a importância da caracterização geotécnica ao longo da obra, foi feito um estudo do maciço intersectado, relativamente às descontinuidades que o intersectam, litologia, alteração, e resistência à compressão. Para este último parâmetro foram utilizadas técnicas distintas mas complementares, nomeadamente o ensaio de carga pontual (em laboratório), e o esclerómetro portátil (in situ).

Por último, tendo em conta os parâmetros e características presentes e as implicações que uma obra do género acarreta, são propostas de modo sucinto, técnicas alternativas de escavação do maciço cuja viabilidade de implementação seja possível no contexto em questão.



**Keywords**

Rock mass, geomechanics, point load, underground excavation, tunnels support.

**Abstract**

It is intended with this work, to address and identify the different factors that directly influence the production and execution of an underground work, with a special attention to the influence exercised by the geotechnical characteristics of the intersected rock mass.

Initially, focus will be in the main aspects to regard in a geotechnical characterization of a rock mass, followed by an introduction to different methods of excavation and support methodologies in a underground work, with particular relevance given to the ones utilized in soft rock masses.

After these concepts are described, it is introduced the practical case of an underground work which was accompanied throughout 4 months in order to develop this study.

Therefore, utilized labor force, applied techniques and methodologies, installed technical networks, and productivity, are described.

To attest the importance of the geotechnical characterization throughout the work, a study of the intersected mass was made, with the analysis of its discontinuities, lithology, alteration degree, and compressive strength. For this last parameter distinct techniques though complementary, were utilized, namely the point load test ( in laboratory) and the Schmidt hammer (in situ).

Lastly, having in account the parameters and characteristics present in the mass, and the implications that a work of the kind entails, it will be proposed in a succinct way, alternative techniques of excavation whose implementing viability takes into account the context present in the site.



# Índice

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO GERAL .....</b>	<b>3</b>
1.1	ENQUADRAMENTO DO TEMA.....	3
1.2	OBJECTIVOS.....	4
<b>2</b>	<b>MACIÇOS ROCHOSOS: CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA E GEOMECÂNICA.....</b>	<b>7</b>
2.1	INTRODUÇÃO .....	7
2.2	IMPORTÂNCIA E FASEAMENTO DO ESTUDO .....	7
2.3	CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA – GEOTÉCNICA .....	10
2.3.1	<i>Reconhecimento geológico.....</i>	<i>10</i>
2.3.2	<i>Zonamento geotécnico .....</i>	<i>10</i>
2.3.3	<i>Estudo de descontinuidades: caracterização de frentes.....</i>	<i>11</i>
2.3.4	<i>Descontinuidades.....</i>	<i>13</i>
2.3.5	<i>Alteração .....</i>	<i>14</i>
2.3.6	<i>Atitude .....</i>	<i>14</i>
2.3.7	<i>Espaçamento .....</i>	<i>15</i>
2.3.8	<i>Rugosidade .....</i>	<i>16</i>
2.3.9	<i>Abertura.....</i>	<i>16</i>
2.3.10	<i>Enchimento.....</i>	<i>17</i>
2.3.11	<i>Percolação.....</i>	<i>17</i>
2.3.12	<i>Planos de xistosidade .....</i>	<i>17</i>
2.4	ROCK QUALITY DESIGNATION - RQD (%) .....	18
2.5	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO UNIAXIAL.....	19
2.5.1	<i>Esclerómetro portátil.....</i>	<i>19</i>
2.5.2	<i>Ensaio de Carga Pontual.....</i>	<i>22</i>
2.5.2.1	<i>Procedimento do Ensaio .....</i>	<i>23</i>
2.5.2.2	<i>Ensaio diametral.....</i>	<i>23</i>
2.5.2.3	<i>Ensaio axial.....</i>	<i>24</i>
2.5.2.4	<i>Ensaio em blocos e em fragmentos irregulares .....</i>	<i>25</i>
2.5.2.5	<i>Índice de carga pontual.....</i>	<i>26</i>
2.5.3	<i>Cálculo do valor médio .....</i>	<i>28</i>
2.5.4	<i>Cálculo do índice de anisotropia .....</i>	<i>28</i>
2.5.5	<i>Resistência à compressão uniaxial .....</i>	<i>28</i>
2.6	CLASSIFICAÇÕES GEOMECÂNICAS.....	29
2.6.1	<i>Rock Mass Rating .....</i>	<i>29</i>
2.6.2	<i>Geological Strength Index.....</i>	<i>33</i>
2.6.3	<i>Q de Barton.....</i>	<i>34</i>

<b>3</b>	<b>ESCAVAÇÃO E SUPORTE EM OBRAS SUBTERRÂNEAS .....</b>	<b>41</b>
3.1	INTRODUÇÃO .....	41
3.2	NATM - NEW AUSTRIAN TUNNELING METHOD .....	42
3.3	ESCAVABILIDADE DO MACIÇO .....	44
3.4	ESCAVAÇÃO DE TERRENOS EM FACE PARCIAL .....	44
3.5	MÉTODOS DE ESCAVAÇÃO .....	46
3.6	ESCAVAÇÃO MECÂNICA.....	47
3.6.1	<i>Escavação com retro - escavadora</i> .....	48
3.6.2	<i>Escavação com recurso a martelo hidráulico</i> .....	48
3.6.2.1	Características do maciço e a sua influência .....	49
3.6.2.2	Influência da área de escavação.....	50
3.6.3	<i>Escavação com recurso a ataque pontual</i> .....	50
3.6.3.1	Comparação entre as cabeças de corte frontal e lateral .....	53
3.6.3.2	Estabilidade de máquinas.....	53
3.6.3.3	Rendimento da máquina .....	53
3.6.3.4	Perfil de escavação .....	54
3.6.3.5	Critérios de selecção de uma máquina.....	54
3.6.4	<i>Escavação mista</i> .....	58
3.6.4.1	Escavação com explosivos .....	58
3.7	SUSTIMENTO EM MACIÇOS ROCHOSOS .....	62
3.7.1	<i>Auto revestimento de um maciço</i> .....	62
3.7.2	<i>Efeito da tensão “in situ”</i> .....	63
3.7.3	<i>Dimensionamento do suporte primário</i> .....	63
3.7.3.1	Classificações geomecânicas .....	63
3.7.4	<i>Estabilização da escavação subterrânea em maciços brandos</i> .....	65
3.7.4.1	Reforço do maciço rochoso.....	66
3.7.4.2	Suporte secundário .....	67
3.7.4.3	Pré-suporte.....	68
<b>4</b>	<b>CASO DE ESTUDO: TÚNEL DO SEIXO ALVO .....</b>	<b>71</b>
4.1	ENQUADRAMENTO E DESCRIÇÃO DA OBRA .....	71
4.2	ENTIDADES INTERVENIENTES .....	71
4.3	CONDICIONANTES.....	71
4.3.1	<i>Geológico – geotécnicos</i> .....	72
4.3.2	<i>Ocupação de superfície</i> .....	72
4.4	ENQUADRAMENTO GEOLÓGICO E GEOTÉCNICO DO MACIÇO.....	73
4.4.1	<i>Enquadramento geológico geral</i> .....	73
4.4.2	<i>Hidrogeologia</i> .....	74
4.4.3	<i>Prospecção</i> .....	74

4.4.4	<i>Zonamento geotécnico em projecto</i> .....	75
4.4.4.1	Zona Geotécnica 1.....	75
4.4.4.2	Zona Geotécnica 2.....	76
4.4.4.3	Zona Geotécnica 3.....	76
4.4.4.4	Percentagem de ocorrência e outras considerações .....	77
4.5	CARACTERIZAÇÃO DO TÚNEL.....	77
4.5.1	<i>Características gerais</i> .....	77
4.5.2	<i>Características das secções tipo</i> .....	78
4.5.2.1	Secção Tipo 1.....	78
4.5.2.2	Secção Tipo 2.....	79
4.5.2.3	Quadros resumo das características das secções.....	79
4.6	CARACTERIZAÇÃO DAS OPERAÇÕES E ACTIVIDADES.....	80
4.6.1	<i>Trabalhos de Superfície</i> .....	80
4.6.2	<i>Drenagem dos taludes</i> .....	83
4.6.3	<i>Considerações relativas ao processo construtivo</i> .....	83
4.6.4	<i>Parede ancorada</i> .....	84
4.6.4.1	Faseamento construtivo.....	85
4.6.5	<i>Ensaios</i> .....	87
4.6.6	<i>Arranjo paisagístico</i> .....	87
4.7	TRABALHOS SUBTERRÂNEOS.....	88
4.7.1	<i>Faseamento construtivo adoptado</i> .....	88
4.7.2	<i>Em ZG1 e ZG2</i> .....	89
4.7.3	<i>Em ZG3</i> .....	90
4.7.4	<i>Avanços</i> .....	91
4.7.5	<i>Áreas das secções de escavação</i> .....	91
4.8	METODOLOGIAS DE ESCAVAÇÃO, ESCAVAÇÃO MECÂNICA COM RECURSO A MARTELO HIDRÁULICO.....	92
4.8.1	<i>Área de escavação</i> .....	92
4.8.2	<i>Ciclo de operações</i> .....	92
4.8.3	<i>Procedimento de escavação</i> .....	93
4.8.4	<i>Cuidados a ter durante as operações</i> .....	94
4.9	SUPORTE PRIMÁRIO.....	94
4.9.1	<i>Caracterização dos elementos de suporte</i> .....	96
4.9.1.1	Betão projectado.....	96
4.9.1.2	Perfis metálicos .....	99
4.9.1.3	Pregagens.....	102
4.9.2	<i>Caracterização de elementos de pré-suporte</i> .....	104
4.9.2.1	Microestacas .....	104
4.9.2.2	Procedimentos de furação .....	104
4.9.2.3	Colocação das microestacas.....	105
4.9.2.4	Enfilagens .....	106

4.9.2.5	Fibras de vidro .....	107
4.9.3	Revestimento definitivo.....	108
4.10	MÃO-DE-OBRA .....	108
4.10.1	Mão-de-obra directa.....	108
4.10.1.1	Requisitos e caracterização .....	108
4.10.1.2	Recrutamento.....	109
4.10.1.3	Equipas .....	109
4.10.1.4	Tarefas e responsabilidades .....	110
4.11	EQUIPAMENTOS .....	112
4.11.1	Introdução e aspectos técnicos.....	112
4.11.2	Condicionantes da escolha.....	113
4.11.3	Equipamentos utilizados.....	113
4.11.4	Perfuração.....	114
4.11.4.1	Poente .....	114
4.11.4.2	Nascente.....	115
4.11.5	Outros equipamentos .....	117
4.12	REDES E OUTROS ASPECTOS TÉCNICOS.....	123
4.12.1	Ventilação .....	123
4.12.2	Água.....	125
4.12.3	Esgoto .....	125
4.12.4	Rede eléctrica.....	126
4.12.5	Iluminação .....	127
4.12.6	Estaleiro .....	128
4.12.7	Observação e controlo .....	129
4.12.8	Localização.....	129
4.13	ZONAMENTO GEOTÉCNICO DO MACIÇO INTERSECTADO .....	131
4.13.1	Introdução.....	131
4.13.2	Litologia .....	132
4.13.3	Descontinuidades.....	132
4.13.3.1	Galeria poente norte .....	133
4.13.3.2	Galeria nascente norte .....	134
4.13.3.3	Galeria poente Sul .....	135
4.13.4	Alteração.....	136
4.13.5	Fracturação.....	137
4.13.6	Tipos de descontinuidades.....	137
4.13.7	Abertura.....	138
4.13.8	Rugosidade .....	139
4.13.9	Enchimento .....	139
4.13.10	Água.....	139

4.13.11	<i>Outras observações</i> .....	139
4.13.12	<i>Resistência à compressão uniaxial</i> .....	140
4.13.12.1	Martelo SilverSchmidt .....	140
4.13.12.2	Point Load Test.....	141
4.13.13	<i>Classificações</i> .....	144
4.13.14	<i>Considerações finais</i> .....	145
4.13.14.1	Zona geotécnica 3.....	145
4.13.14.2	Zona geotécnica 2.....	145
4.13.14.3	Delimitação das zonas .....	146
4.14	PROPOSTAS DE SUSTIMENTO .....	146
4.14.1	<i>RMR</i> .....	146
4.14.2	<i>Q de Barton</i> .....	147
4.14.3	<i>Comentários finais relativos ao suporte</i> .....	149
4.15	ANÁLISE DE PRODUÇÕES E RENDIMENTOS .....	149
4.15.1	<i>Produção do túnel</i> .....	149
4.15.1.1	Maio .....	150
4.15.1.2	Junho.....	151
4.15.1.3	Julho .....	154
4.15.2	<i>Avarias</i> .....	162
4.15.3	<i>Produção de Taludes</i> .....	162
4.15.4	<i>Mapa de produção da parede ancorada</i> .....	163
4.16	PROPOSTA DE SOLUÇÕES .....	164
4.16.1	<i>Escavação por ataque pontual</i> .....	164
4.16.1.1	Cálculo da potência a instalar na cabeça de corte. ....	164
4.16.1.2	Seleção da Máquina .....	164
4.16.1.3	Seleção do diâmetro das picas .....	165
4.16.1.4	Rendimento da escavação.....	167
4.16.2	<i>Caldeiro</i> .....	169
4.16.2.1	Determinação do diâmetro de furo largo .....	169
4.16.2.2	Critérios de escolha de explosivo .....	170
4.16.2.3	Distância à frente .....	171
4.16.2.4	Cordão detonante .....	175
4.16.2.5	Espaço Anelar .....	175
4.16.2.6	Diâmetros de furação.....	175
4.16.2.7	Acessórios de furação .....	176
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>182</b>
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>186</b>

## Índice de figuras

Figura 1 - Fluxograma do estudo geológico e geotécnico nas diferentes fases de uma obra (adaptado de Jimeno, 2003).....	9
Figura 2 - Ficha tipo de levantamento geológico e geomecânico de frentes (adaptado de ISRM (1978, 1981, 2007), GSE (1995)).....	12
Figura 3 - Representações simples de blocos diagramas esquemáticos indicativos da continuidade de várias famílias de fracturas (adaptado da ISRM, 1981; González de Vallejo et al., 2002). ....	13
Figura 4 - Representação das famílias principais em bloco diagrama (adaptado da ISRM, 1981; González de Vallejo et al., 2002). ....	15
Figura 5 - Perfis de rugosidade, o comprimento dos perfis está entre 1 e 10 metros (adaptado de ISRM, 1981; González de Vallejo et al., 2002).....	16
Figura 6 - Diagramas que ilustram as definições de abertura de descontinuidade (ISRM, 1978). ..	16
Figura 7 - Exemplo de cálculo de valor de RQD (adaptado de Deere, 1989). ....	18
Figura 8 - Esclerómetro portátil Silver Schmidt ( <a href="http://www.proceq.com">www.proceq.com</a> ). ....	20
Figura 9 - Exemplo de ensaio com um martelo Schmidt.....	20
Figura 10 - Ábaco de Miller para o cálculo da resistência a partir do martelo Schmidt (adaptado de González de Vallejo et al., 2002). ....	21
Figura 11 - Equipamento para a execução do Ensaio de Carga Pontual, PLT (Laboratório de Geotecnia e Materiais de Construção, LGMC, do ISEP). ....	23
Figura 12 - Ensaio diametral, $L > 0,5 D$ e ensaios considerados válidos (adaptado da ISRM, 1985). 24	
Figura 13 - Ensaio diametral, ensaio considerado não válido (adaptado da ISRM, 1985). ....	24
Figura 14 - Ensaio axial, dimensão do testemunho equivalente e ensaios considerados válido (adaptado da ISRM, 1985).....	24
Figura 15 - Ensaio axial, ensaio considerado não válido (adaptado da ISRM, 1985). ....	25
Figura 16 - Ensaio provetes irregulares, tamanho do testemunho equivalente (adaptado da ISRM, 1985).....	25
Figura 17 - Gráfico para cálculo de $I_{s(50)}$ , segundo a ISRM (1985).....	26
Figura 18 - Gráfico para correcção do diâmetro segundo a ISRM (1985).....	27
Figura 19 - Gráfico para a correlação entre a resistência à carga pontual e a resistência à compressão, segundo a ISRM (1985). ....	28
Figura 20 - Orientação das descontinuidades relativamente á escavação (adaptado de Hoek, 2007).....	30
Figura 21 - Escavação por fases (adaptado de Galiza, L. Gomes, Vieira 2007/2008).....	44
Figura 22 - Avanço da escavação por fases (adaptado de Hoek 1999). ....	45

Figura 23 - Roçadora de braço (adaptado de Bastos, 1998).....	46
Figura 24 - Gabarito para carga com retroescavadora (adaptado de Galiza et al. 2003/2007). ....	48
Figura 25 - Início da escavação da calote.....	49
Figura 26 - Relação entre a resistência da rocha e a potência da cabeça. (adaptado de Galiza et al. 2007/2008).....	54
Figura 27 - Primeiro quadrado do caldeiro. ....	59
Figura 28 - Segundo quadrado do caldeiro. ....	59
Figura 29 - Relação entre o avanço em % da perfuração e os diferentes diâmetros do furo não carregado (Adaptado de Galiza et. al 2007/2008). ....	60
Figura 30 - Concentração de carga mínima (Kg/m) e máxima distância C-C para diferentes diâmetros do furo não carregado (adaptado de Galiza et. al 2007/2008). ....	61
Figura 31 - Concentração de carga mínima (Kg/m) e máxima distância á frente para diferentes distâncias B (adaptado de Galiza et. al 2007/2008).....	61
Figura 32 - Auto revestimento de uma escavação.....	62
Figura 33 - Variação entre os vãos de cavidades sem suporte e os tempos de auto-sustentação para várias classes de maciço (adaptado de Bieniawski, 1973 in Dinis Gama, 1976).....	64
Figura 34 - Escolha do tipo de sustimento em função da classificação Q (adaptado de Barton, 1995). ....	65
Figura 35 - Cofragem deslizante utilizada para colocação de revestimento provisório na abertura do túnel do Covelo. ....	67
Figura 36 - Avanço de uma escavação sobre a protecção de um chapéu de enfilagens adaptado de (Hoek, 2000).....	68
Figura 37 - Escola EB 2 – 3 – Olival e posto de abastecimento de Gasolina. ....	72
Figura 38 - Extracto das cartas geológicas de Portugal (Esc:1/50000 – adaptado de folhas 13-A Espinho e 13-B Castelo de Paiva). ....	73
Figura 39 - Secção Tipo 1 – medidas em metros (adaptado de Projecto de execução de túnel de Seixo alvo, COBA 2010). ....	78
Figura 40 - Secção Tipo 2 – medidas em metros (adaptado de Projecto de execução de túnel de Seixo alvo, COBA 2010). ....	79
Figura 41 - Trabalhos de escavação e remoção de terras no emboquilhamento de entrada e de saída. ....	80
Figura 42 - Drenos envolvidos em geotêxtil e malha de drenos instalada no talude superior poente.....	83
Figura 43 - – Rede electrosoldada, e furação para pregagens.....	84
Figura 44 - Colocação de uma pregagem Diwidag, colocação de drenos.....	84

Figura 45 - Figura esquemática da parede ancorada de betão (adaptado de projecto de execução Seixo alvo, 2010). .....	86
Figura 46- Vista da parede ancorada de betão desde o talude lateral norte. ....	86
Figura 47 - Equipamento de ensaio de pregagens e folha de anotações de resultados.....	87
Figura 48 - Vista da escavação da calote onde se podem ver as duas fases de escavação (Escavação secção parcial). ....	88
Figura 49 - Vista geral do emboquilhamento de saída com as duas galerias. Martelo hidráulico utilizado para escavação do maciço.....	92
Figura 50 - Sequência de escavação da frente para martelo hidráulico (adaptado de Rock excavation hand Book). ....	93
Figura 51 - Sequência de escavação segundo a orientação das descontinuidades (Rock excavation hand Book). ....	93
Figura 52 - Sequência de escavação segundo a orientação das descontinuidades, fase inicial e fase intermédia. ....	93
Figura 53 - Projecção de betão na galeria Sul do emboquilhamento de saída.....	97
Figura 54 - Dimensões da cambota vista de perfil (adaptado de projecto de execução) e pormenor do reticulado da cambota. ....	100
Figura 55 - Sapatas pré-fabricadas. ....	100
Figura 56 - vista do perfil montado e auxílio do martelo hidráulico na colocação dos perfis. ....	101
Figura 57 - Esquema representativo das uniões entre secções de perfis (Adaptado de projecto de execução) e pormenor do perfil.....	101
Figura 58 - Esquema representativo da expansão do Swellex por acção da água de alta pressão (adaptado de Galiza et al. 2007/2008). ....	102
Figura 59 - Furação para instalação de Swellex. ....	103
Figura 60 - Instalação do Swellex e injeção de água para sua expansão.....	103
Figura 61 - Esquema representativo da instalação manual do Swellex (adaptado de Galiza, L.Gomes, Vieira 2007/2008). ....	103
Figura 62 - Placa plana utilizada e o respectivo esquema representativo (adaptado de Galiza et al.2007/2008). ....	104
Figura 63 - Vista do emboquilhamento de saída do túnel com microestacas instaladas e inicio dos trabalhos de escavação com martelo hidráulico. ....	104
Figura 64 - Medição da altura ao nível da traseira da coluna de furação para furação. ....	105
Figura 65 - Coroa de furação e microestacas utilizadas e colocação da coroa e encaixe com o bit piloto. ....	105
Figura 66 - Operação de colocação de microestacas com auxílio do multifunções.....	106

Figura 67 - esquema representativo do avanço sobre protecção de um chapéu de enfilagens (adaptado de Hoek, 1999) e operação de furação para a colocação de enfilagens. ....	106
Figura 68 - Fibra Y35 pronto a ser colocada e vista de uma frente de escavação ZG3 com fibras de vidro instaladas. ....	107
Figura 69 - – Jumbo Rocket Boomer L2C.....	114
Figura 70 - Dimensões do Jumbo WE3C.....	115
Figura 71 - Dimensões do Jumbo WE3C.....	115
Figura 72 - Tabela resumo das características da CAT 966H (adaptado de catálogos da Caterpillar). .....	116
Figura 73 - CAT 966H e pá carregadora em operações de remoção.....	117
Figura 74 - SIKA PM 500 P Putzmeister (adaptado de catálogos de Putzmeister).....	117
Figura 75 - SIKA PM 500 P Putzmeister em obra e durante operações de projecção. ....	118
Figura 76 - Dimensões da Sika PM500 (adaptado de catálogos de Putzmeister).....	118
Figura 77 - Máxima estabilidade lateral do equipamento e máxima inclinação admitida pelo equipamento (adaptado de catálogos de Putzmeister).....	118
Figura 78 - Diagrama de ângulos que o braço da Sika consegue efectuar (adaptado de catálogos da Putzmeister). ....	119
Figura 79 - Extensão do braço para trabalhos em túneis de grande secção, grande manobrabilidade por parte do braço automático (adaptado de catálogos de Putzmeister). ....	119
Figura 80 - Adaptabilidade do braço a Tuneis de menor secção (adaptado de catálogos de Putzmeister). ....	119
Figura 81 - Multifunções MT 1440. ....	120
Figura 82 - Multifunções Komatsu WH716. ....	120
Figura 83 - Giratória DOOSAN 225 LCV (catálogos DOOSAN).....	121
Figura 84 - Giratória CAT 329 DLN, funções de espalhamento e carregamento de escombro e desmonte com martelo hidráulico (catálogos Caterpillar). ....	121
Figura 85 - Características Giratória DOOSAN 225 LCV (catálogos Caterpillar). ....	121
Figura 86 - Martelo pneumático CAT (catálogos Caterpillar).....	122
Figura 87 - Volvo BL71.....	122
Figura 88 - Equipamento de ventilação, instalado na galeria Norte do emboquilhamento de saída. .....	123
Figura 89 - Escavação sem ventilação vs escavação com ventilação.....	124
Figura 90 - Esquema de funcionamento da ventilação insuflante (adaptado de Rock excavation hand book). ....	124
Figura 91 - Furo de captação na frente poente e depósitos para armazenamento de água.....	125

Figura 92 - Tanques de decantação e vista de uma valeta de escoamento.....	125
Figura 93 - Quadro de distribuição e quadro de frente para alimentação de Jumbo e robô de projecção.....	126
Figura 94 - Lâmpada fluorescentes para iluminação do interior do túnel e holofote de iluminação exterior.....	127
Figura 95 – Mapa ilustrativo da localização de alguns dos principais locais da obra .....	130
Figura 96 - Medição de orientação da descontinuidade numa frente de escavação e ressalto com o martelo SilverSchmidt para avaliação da resistência á compressão.....	131
Figura 97 - Projecção estereográfica das diáclases levantadas na galeria poente norte (n=48) ..	133
Figura 98 - Projecção estereográfica das diáclases levantadas na galeria poente sul (n=12). .....	134
Figura 99 - Projecção estereográfica das diáclases levantadas na galeria nascente norte (n=16).135	
Figura 100 - Percentagem dos diferentes graus de alteração encontrados na galeria Poente Norte. ....	136
Figura 101 - Percentagem dos diferentes graus de alteração encontrados na galeria Nascente Norte. ....	136
Figura 102- Percentagem dos diferentes graus de alteração encontrados na galeria Poente Norte. ....	137
Figura 103 - Percentagem dos diferentes tipos de descontinuidade encontrados na galeria Poente Norte. ....	137
Figura 104 - Percentagem dos diferentes tipos de descontinuidade encontrados na galeria Poente Sul. ....	138
Figura 105 - Percentagem dos diferentes tipos de descontinuidade encontrados na galeria Nascente norte.....	138
Figura 106 - Percentagem dos diferentes tipos de abertura encontrados na galeria Poente Norte. ....	138
Figura 107 - Percentagem dos diferentes tipos de abertura encontrados na galeria poente sul. ....	139
Figura 108 - Percentagem dos diferentes tipos de abertura encontrados na galeria nascente norte. ....	139
Figura 109 – Recolha de amostra na frente de escavação.....	141
Figura 110 - Corte das amostras e amostras e vista das amostras organizadas por galerias e PKs. ....	141
Figura 111 - Colocação do provete e ensaio deste nos laboratórios de Mecânica das rochas do LGMC – ISEP. ....	142
Figura 112 - Ensaio do provete nos laboratórios de Mecânica das rochas do LGMC – ISEP. ....	142
Figura 113 – Zona geotécnica 3.....	145

Figura 114 – Planos de xistosidade visíveis na frente de escavação e vista da falha que separa ZG2 e ZG3. ....	146
Figura 115 - Suporte para escavação (adaptado de Barton, 1995).....	147
Figura 116 - Produção de enfilagens em Maio.....	150
Figura 117 - Avanços na primeira fase e produção de enfilagens na galeria poente norte no mês de Junho. ....	152
Figura 118 - Avanços na primeira fase e produção de enfilagens na galeria nascente norte no mês de Junho. ....	153
Figura 119 - Avanços na primeira fase e produção de enfilagens na galeria poente norte no mês de Julho. ....	155
Figura 120 - Avanços na primeira fase e produção de enfilagens na galeria nascente norte no mês de Julho. ....	156
Figura 121 – Vista do lado nascente com as primeiras micro - estacas instaladas na galeria Nascente Sul.....	157
Figura 122 - Avanços na primeira fase e produção de enfilagens na galeria poente Sul no mês de Julho. ....	158
Figura 123 – Avanços obtidos nas diferentes zonas geotécnicas intersectadas pela escavação. .	159
Figura 124 – Nº médio de cambotas colocadas por dia em cada zona geotécnica. ....	159
Figura 125 – Maciço de 1ª fase escavado na galeria norte.....	160
Figura 126 - Maciço de 1ª fase escavado na galeria Sul.....	161
Figura 127 – Ferramenta de corte quebrada e martelo avariado.....	162
Figura 128 - Pormenor da Cabeça de corte MA520 e cabeça de corte MA520 em acção (adaptado de catálogos Sandvik. ....	164
Figura 129 - Dimensões da cabeça de corte MA520 (adaptado de catálogos Sandvik). ....	165
Figura 130 - Relação entre a compressão uniaxial da rocha, o diâmetro da ponta, o consumo de picas e a eficiência de corte (adaptado de Galiza et al.2007/2008). ....	166
Figura 131 - Relação entre o avanço em % da perfuração e os diferentes diâmetros do furo não carregado (Adaptado de Galiza et al. 2007/2008). ....	169
Figura 132 - Velocidade de detonação e densidade dos explosivos EMULEX .....	170
Figura 133 - Explosivos EMULEX (adaptado de catálogos da MAXAM) .....	171
Figura 134 - Concentração de carga e distância á frente para furos de alargamento (adaptado de Galiza et al 2007/2008). ....	172
Figura 135 Determinação da concentração de carga (Adaptado de Galiza et al. 2007/2008). ....	172
Figura 136 - Exemplo de explosivos Emulex 731 (Adaptado de Galiza et al. 2007/2008). ....	173
Figura 137 - Espaço anelar. ....	175

Figura 138 – União seleccionada (adaptado de catálogos de ATLASCOPCO). ..... 177

## Índice de Tabelas

Tabela 1 - Evolução do grau de alteração do maciço rochoso (adaptado da ISRM, 1981).....	14
Tabela 2 - Terminologia para caracterizar os maciços em função do espaçamento das descontinuidades segundo a ISRM (1978, 1981).....	15
Tabela 3 - Terminologia para caracterizar os maciços em função do RQD (adaptado Deere, 1989). .....	18
Tabela 4 - Classificação do maciço com base na resistência à compressão simples (ISRM, 1978, 1981). .....	22
Tabela 5 - Classificação geomecânica de Bieniawski (1989). .....	31
Tabela 6 - Classificação da condição das descontinuidades (1989). .....	32
Tabela 7 - Efeito da orientação das descontinuidades (Bieniawski, 1989). .....	32
Tabela 8 - Determinação do valor do GSI segundo Hoek (2007), adaptado por Miranda (2003). ..	33
Tabela 9 - Parâmetros do sistema Q da classificação de Barton (adaptado de Barton et al, 1982).35	
Tabela 10 - Parâmetros do sistema Q da classificação de Barton (adaptado de Barton et al, 1982). .....	36
Tabela 11 - Parâmetros do sistema Q da classificação de Barton (adaptado de Barton et al, 1982). .....	37
Tabela 12 - Caixa de ferramentas do NATM (adaptado de Galiza et al. 2007/2008). .....	43
Tabela 13 - Classificação expedita de solos (Galiza et al. 2007/2008). .....	47
Tabela 14 - Diferentes tipos de cabeça de ataque pontual e seu método de aplicação (adaptado de Galiza et al. 2007/2008). .....	52
Tabela 15 Diferenças a nível de estabilidade das cabeças de corte pontual adaptado de Galiza, L. Gomes, Vieira 2007/2008). .....	53
Tabela 16 – Coeficiente de eficiência.....	57
Tabela 17 – Coeficiente de tempo disponível. ....	57
Tabela 18 - Diferentes comportamentos de auto – revestimento. ....	63
Tabela 19 - Proposta de sustimento, (adaptado de Bieniawski1973).....	64
Tabela 20 - Principais parâmetros da zona geotécnica 1 (adaptado de projecto de execução Seixo alvo, 2010).....	75
Tabela 21 - Principais parâmetros da zona geotécnica 2 (adaptado de projecto de execução Seixo alvo, 2010).....	76
Tabela 22 - Principais parâmetros da zona geotécnica 3 (adaptado de projecto de execução Seixo alvo, 2010).....	76

Tabela 23 - Zonamento geotécnico, estimativa das percentagens de ocorrência (adaptado de projecto de execução Seixo alvo, 2010).	77
Tabela 24 - Quadro resumo das principais características do túnel (adaptado de projecto de execução Seixo alvo, 2010).	77
Tabela 25 - Quadros resumo das características das secções.	79
Tabela 26 - Soluções adoptadas para o emboquilhamento de entrada (frente nascente).	81
Tabela 27 - Soluções adoptadas para o emboquilhamento de saída (frente poente).	82
Tabela 28 - Faseamento construtivo das paredes ancoradas.	85
Tabela 29 - Quadro resumo do faseamento construtivo em ZG2 e ZG1 (adaptado de projecto de execução Seixo alvo, 2010).	89
Tabela 30 - Quadro resumo do faseamento construtivo em ZG3 (adaptado de projecto de execução Seixo alvo, 2010).	90
Tabela 31 - Quadro resumo dos avanços para cada uma das fases (adaptado de projecto de execução Seixo alvo, 2010).	91
Tabela 32 – Quadro resumo das áreas de escavação para cada sub - secção na secção Tipo 1.	91
Tabela 33 - Quadro resumo das áreas de escavação para cada sub -secção na secção tipo 2.	91
Tabela 34 - Suporte utilizado em ZG1 (adaptado de projecto de execução Seixo alvo, 2010).	94
Tabela 35 - Suporte utilizado em ZG2 (adaptado de projecto de execução Seixo alvo, 2010).	95
Tabela 36 - Suporte utilizado em ZG3 (adaptado de projecto de execução Seixo alvo, 2010).	95
Tabela 37 - Suporte utilizado em Emboquilhamento nascente (adaptado de projecto de execução Seixo alvo, 2010).	96
Tabela 38 - Suporte utilizado em Emboquilhamento poente (adaptado de projecto de execução Seixo alvo, 2010).	96
Tabela 39 - Tabela resumo de ensaios efectuados adaptado de projecto de execução Seixo alvo, 2010).	99
Tabela 40 - tabela resumo das características do suporte.	107
Tabela 41 - Mão de obra directa.	110
Tabela 42 - Mão de obra indirecta.	112
Tabela 43 – Equipamentos utilizados em cada frente.	113
Tabela 44 - tabela resumo da velocidade de locomoção (adaptado de catálogos da Atlas copco).	116
Tabela 45 - Tabela resumo das principais características técnicas do MT 1440 (adaptado catálogos Manitou).	120
Tabela 46 - Tabela resumo das principais características técnicas do WH716 (www.ritchiespecs.com).	120

Tabela 47 - Características Giratória DOOSAN 225 LCV (catálogos DOOSAN).....	121
Tabela 48 - Quadro resumo das instalações do estaleiro. ....	128
Tabela 49 – Características gerais da geotecnia do maciço intersectado.....	132
Tabela 50- Atitude da xistosidade na galeria poente norte (n=55). ....	133
Tabela 51 - Atitude da xistosidade na galeria nascente norte (n=31). ....	134
Tabela 52 - Atitude da xistosidade na galeria poente Sul (n=36).....	135
Tabela 53 – Valores de resistência á compressão obtidos nas respectivas estações geomecânicas. .....	140
Tabela 54 - Resultados obtidos nos ensaios dos provetes nos laboratórios de Mecânica das rochas do LGMC – ISEP. ....	143
Tabela 55 – Resultados obtidos nos ensaios dos provetes nos laboratórios de Mecânica das rochas do LGMC – ISEP. ....	144
Tabela 56 – Comparação de resultados obtidos em projecto e em obra.....	144
Tabela 57 - Quadro comparativo entre os valores das classificações em ZG3. ....	144
Tabela 58 - Quadro comparativo entre os valores das classificações em ZG2. ....	144
Tabela 59 – Delimitação das zonas geotécnicas nas diferentes galerias escavadas.....	146
Tabela 60 - Proposta de sustimento para diferentes valores de RMR (adaptado de Bieniawski,1989) .....	146
Tabela 61 - ESR em função do tipo de escavação (adaptado de Bieniawski, 1989). ....	147
Tabela 62 - Comparação de resultados entre Barton, Bieniawski e o utilizado em projecto. ....	148
Tabela 63 – Escavação efectuada até finais de Junho. ....	149
Tabela 64 – Produção de mês de Maio. ....	150
Tabela 65 – Produção de mês de Junho para a galeria poente norte.....	151
Tabela 66 - Produção de mês de Junho para a galeria nascente norte. ....	151
Tabela 67 - Produção de mês de Julho para a galeria poente norte. ....	154
Tabela 68 - Produção de mês de Julho para a galeria nascente norte. ....	154
Tabela 69 - Produção de mês de Julho para a galeria Poente Sul.....	157
Tabela 70 - Produção relativa à frente poente. ....	162
Tabela 71 - Produção relativa à frente nascente para o mês de Abril.....	162
Tabela 72 - Mapa de produção do túnel.....	163
Tabela 73 - total dos elementos colocados no mapa de produção. ....	163
Tabela 74 - Características gerais da cabeça de corte MA520 (adaptado de catálogos Sandvik). 165	
Tabela 75 – Factores utilizados para o cálculo do rendimento.....	167
Tabela 76 – Avanços para cada sub - fase de escavação da 1ª Secção tipo 1. ....	167
Tabela 77 – Avanços para cada sub - fase da escavação da Secção tipo 2. ....	167

Tabela 78 – Quadro comparativo de avanços em obra e com máquina de ataque pontual.....	168
Tabela 79 – Cálculo dos dias para varamento da primeira fase de escavação. ....	168
Tabela 80 - Prazo de conclusão previsto da obra recorrendo a uma máquina de ataque pontual. .....	168
Tabela 81 - Velocidade de propagação de ondas sísmicas e densidade do xisto. ....	170
Tabela 82 - Impedâncias dos explosivos EMULEX.....	171
Tabela 83 - Carga de fundo e distâncias á frente.....	174
Tabela 84 - Cargas de coluna.....	174
Tabela 85 - número total de furos e carga total. ....	174
Tabela 86 - Diâmetros de furação. ....	175
Tabela 87 - Selecção de coluna de furação (adaptado de catálogos da ATLAS COPCO).....	176
Tabela 88 - selecção de vara de furação (adaptado de catálogos de ATLAS COPCO).....	176
Tabela 89 - selecção de bit de furação (adaptado de catálogos de ATLAS COPCO). ....	177
Tabela 90 - Volumes movimentados pelo rebentamento de cada um dos furos e a sua relação com o espaço disponível. ....	178

## Índice de fórmulas

[1] Cálculo de RQD .....	18
[2] Cálculo dimensão perpendicular .....	25
[3] Índice de carga pontual .....	26
[4] Índice de carga pontual corrigido .....	26
[5] Índice de carga pontual corrigido .....	27
[6] Correção de diâmetro equivalente .....	27
[7] Distância equivalente em ensaios axiais.....	27
[8] Área equivalente em ensaios axiais.....	27
[9] Cálculo RMR básico.....	30
[10] Cálculo RMR.....	30
[11] Cálculo Q de barton .....	34
[12] Resistência de rocha .....	55
[13] Potência a instalar na máquina de ataque pontua.....	55
[14] Índice de cortabilidade (RMCI) .....	56
[15] Rendimento de corte instantâneo.....	57
[16] Rendimento real .....	57
[17] Dimensão equivalente do túnel.....	147
[18] Cálculo de avanço diário .....	167
[19] Impedância do maciço .....	170
[20] Impedância do explosivo .....	170







# 1 Introdução geral

## 1.1 Enquadramento do tema

O desenvolvimento das sociedades contemporâneas e conseqüente ocupação da superfície terrestre por parte destas leva a uma tendência crescente da procura de espaços “extra” para solucionar os problemas com que estas se deparam. Neste sentido, surge o espaço subterrâneo como primeira e mais evidente resposta a este problema.

Quando se fala por isso na construção de vias de comunicação, os túneis ferroviários/rodoviários surgem como uma estrutura de grande importância e utilidade, e que merece por isso a atenção crescente dos projetistas, sobretudo quando se pretende a implantação de vias em locais de topografia acidentada ou em que a ocupação de superfície conheça problemas de espaço ou de impacto ecológico – paisagístico, ou mesmo como solução para atravessamento de rios ou canais.

A construção de túneis rodoviários surge no entanto como uma actividade de grande complexidade de execução e sujeita a várias condicionantes. Entre elas destaca-se o tipo de formação geológica que é necessário atravessar, pelo que um criterioso conhecimento não só das mais variadas técnicas e processos construtivos, como também do terreno onde se pretende implantar a estrutura, é de grande importância para o sucesso da empreitada. Nesse sentido a Engenharia Geotécnica surge como vertente indispensável numa obra desta natureza, para a solução de problemas de engenharia baseado num conhecimento alargado nas disciplinas de: geologia, geomecânica aplicada, resistência dos materiais, e desmonte e movimentação de rocha. Segundo Hoek a crescente exigência na projecção de estruturas que sejam seguras e económicas irá colocar grande responsabilidade nos engenheiros geotécnicos do futuro e por isso, a disciplina terá que evoluir de forma a responder da melhor forma a essas exigências. Haverá por isso no futuro a necessidade de engenheiros com um adequado conhecimento na área e habilidade de adaptar este conhecimento a problemas reais deste domínio.

Este documento visa assim um estudo e caracterização da geomecânica de um maciço rochoso onde se pretende a escavação e construção de um túnel rodoviário, e nesse sentido verificar a sua influência na produção e avanço de escavação do mesmo. Nesta linha de pensamento o trabalho irá também fornecer um enquadramento sobre as técnicas construtivas utilizadas e identificar e caracterizar ainda os factores que têm influência sobre o planeamento e organização dos trabalhos de escavação e suporte. O objecto de estudo será a construção do túnel de Seixo Alvo localizado no concelho de Vila Nova de Gaia, distrito do Porto.

## 1.2 Objectivos

O presente documento pretende analisar a importância da caracterização geotécnica para uma correcta e adequada escolha e planeamento de métodos de escavação subterrânea. Neste sentido foi feito o acompanhamento do desenvolvimento de uma obra subterrânea, assim como a caracterização geológico - geomecânica e zonamento geotécnico do maciço intersectado, de forma a retirar conclusões válidas e indicadores importantes que auxiliem na procura e definição de soluções de engenharia a adoptar, especialmente tendo em conta a envolvente da obra a executar. O documento pretende ainda caracterizar e analisar os factores que têm importância na planificação e desenvolvimento de um ciclo de trabalho neste tipo de obras, tais como mão-de-obra, equipamentos, metodologias e técnicas aplicadas, produções e rendimentos obtidos. O documento encontra-se estruturado da seguinte forma:

Capítulo 2 – Pretende fornecer uma introdução teórica ao tema da caracterização geológica - geomecânica dos maciços rochosos, a sua importância nas diferentes fases de um projecto de obras subterrâneas, a importância do zonamento geotécnico neste tipo de obras, e a apresentação de classificações geomecânicas propostas por diferentes autores do meio científico como Bieniawsky, Hoek, e Barton.

Capítulo 3 – Neste capítulo pretende-se apresentar uma introdução teórica às diferentes técnicas de escavação e suporte utilizadas, e a importância do maciço na selecção destas. As técnicas de escavação apresentadas neste capítulo centrar-se-ão em maciços de qualidade branda.

Capítulo 4 – Neste capítulo apresenta-se um caso prático de estudo (o já mencionado túnel do Seixo Alvo). O capítulo começará por apresentar um enquadramento do projecto e suas condicionantes, as técnicas construtivas a implementar e uma caracterização dessas mesmas técnicas e equipamentos e mão-de-obra utilizados para a sua implementação. De seguida é apresentada uma análise da produção mensal do túnel desde o seu começo até finais do mês de Julho, o zonamento geotécnico do maciço escavado e sua comparação com o determinado em projecto, e a apresentação de duas propostas de diferentes técnicas de escavação possíveis para o maciço.

Capítulo 5 – O capítulo 5 e final pretende fornecer conclusões referentes ao estudo em questão.

**MACIÇOS ROCHOSOS: CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA E  
GEOMECÂNICA**



## **2 Maciços rochosos: caracterização geológica e geomecânica**

### **2.1 Introdução**

Para o desenvolvimento de um projecto de engenharia, seja a construção de um túnel, obra mineira ou qualquer outro tipo de construção, surge como prioridade fundamental, que se faça um rigoroso estudo do maciço onde se pretende a implantação da obra, relativamente às suas propriedades não só geológicas como também geotécnicas e geomecânicas.

A necessidade de caracterização e de previsão do comportamento do maciço é fundamental para um dimensionamento adequado das estruturas resistentes para a sua sustentação.

Assim, são feitos previamente e em fase de projecto, ensaios de laboratório e de campo, bem como levantamentos e estudos no local, que permitam obter dados, cuja interpretação forneça indicações adequadas relativamente aos problemas que se colocam, e que dessa forma as soluções se obtenham com o maior rigor possível.

Torna-se também importante, por isso, o acompanhamento posterior da obra de forma a auxiliar tomadas de decisão de natureza técnica, quer em aspectos amplos do projecto quer na resolução de problemas pontuais que possam surgir no decorrer da obra.

### **2.2 Importância e faseamento do estudo**

Na execução de uma escavação subterrânea em ambiente rochoso, a importância da geotecnia do maciço é determinante para a definição de soluções de engenharia que se pretendem adoptar aquando da execução do túnel.

A geotecnia local determina toda a organização e desenvolvimento da obra, nomeadamente ao nível de:

- processos construtivos;
- faseamento dos trabalhos;
- selecção dos equipamentos.

O estudo geotécnico - geomecânico do maciço é então, e como já foi referido anteriormente, inicialmente desenvolvido em fase de projecto mediante campanhas de prospecção geotécnica e recolha de sondagens, o que permite uma caracterização aproximada das reais condições que serão possíveis de encontrar ao longo da escavação do túnel.

Posteriormente, no entanto, e à medida que a escavação do túnel avança, é necessária a adaptação dos métodos construtivos e consequente organização de trabalhos, às reais condições deparadas no terreno de forma a:

- garantir que os métodos de escavação sejam os mais adequados relativamente ao maciço, e a respectiva selecção dos equipamentos seja a mais adequada possível de forma a responder da melhor forma às dificuldades impostas;
- garantir que os avanços executados na escavação sejam os mais adequados, conseguindo desta forma a estabilidade temporária da frente de escavação;
- garantir que o suporte utilizado seja o mais adequado e adaptado às reais condições de maciço, garantindo a segurança da escavação, evitando o colapso do túnel e gastos desnecessários em suporte caso este se encontre sobredimensionado;
- prever a ocorrência de cunhas, devido à intersecção das descontinuidades do maciço que possam deslizar na calote e hasteais do terreno, e estabilizar a situação o melhor e mais rapidamente possível;
- prever e caracterizar a ocorrência de outras particularidades geológicas e não só, que sejam de importância para a obra e sua evolução, como sejam falhas geológicas, poços, minas, e cavernas.

A metodologia de caracterização segue em termos gerais a ordem evidenciada no seguinte fluxograma apresentado na Figura 1.

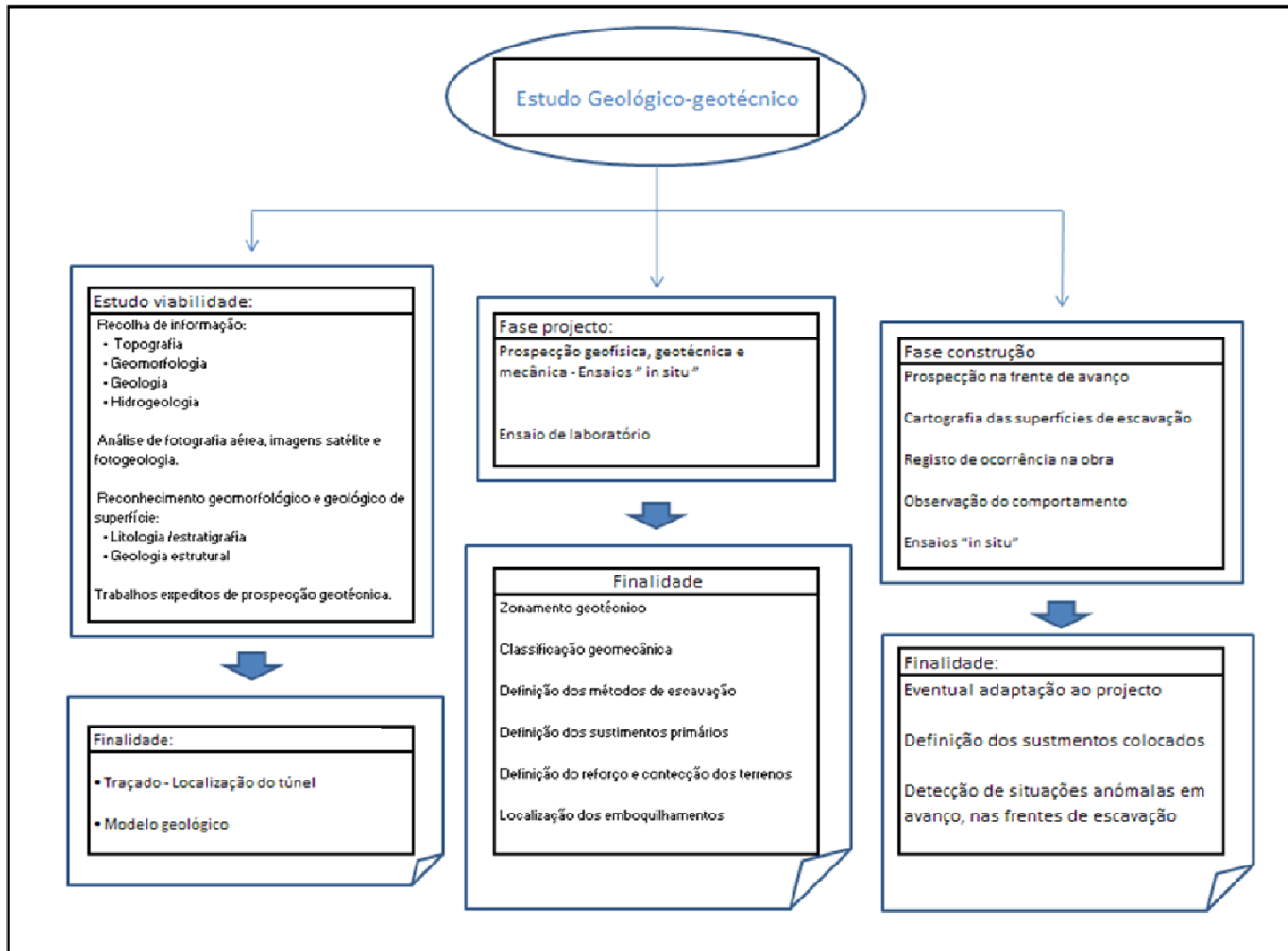


Figura 1 - Fluxograma do estudo geológico e geotécnico nas diferentes fases de uma obra (adaptado de Jimeno, 2003).

## **2.3 Caracterização geológica – geotécnica**

### **2.3.1 Reconhecimento geológico**

A fase de reconhecimento geológico refere-se a uma fase de recolha sistemática de informação da bibliografia regional que contemple a área em estudo, análise da topografia local, fotografias aéreas e imagens de satélite, o estudo de relatórios geológicos e geotécnicos preliminares, o reconhecimento das principais unidades geológicas existentes, a identificação dos acidentes geotectónicos que sejam de importância para o projecto e posterior desenvolvimento da obra, a execução e acompanhamento de uma campanha de prospecção geotécnica, ensaios “in situ” e de laboratório, e a análise, interpretação e síntese da informação recolhida.

### **2.3.2 Zonamento geotécnico**

Segundo Oliveira (1986), o zonamento geotécnico tem a finalidade de definir maciços geológicos com idênticas respostas geotécnicas a curto e longo prazo.

Após análise e interpretação dos resultados da campanha de prospecção "in situ" e do programa de ensaios de laboratório, é possível agruparem-se as variadas unidades geológicas em função das respectivas características geotécnicas em zonas homogeneamente semelhantes desse ponto de vista, processo designado por zonamento geotécnico do maciço. Embora a divisão do maciço em zonas seja realizada durante a fase de projecto, é durante a execução que o zonamento adquire uma configuração mais precisa. Este método de divisão do maciço tem sido de grande utilidade para aplicação de técnicas construtivas em túneis, uma vez que fornece facilidade do dimensionamento e optimização dos processos de execução. O zonamento é assim extremamente importante uma vez que a sua execução influencia em simultâneo métodos de escavação, sustimento, e constrangimentos ambientais, condições de drenagem, e organização e estabelecimento do programa de estabilização e acompanhamento da obra. Importa no entanto referir que o zonamento não só não é decisor absoluto, como também não é suficiente para gestão e organização de processos executivos. Assim, duas zonas com a mesma classificação geotécnica podem ser alvo de métodos de escavação diferentes pelo simples facto de se encontrarem em zonas urbanas ou em zonas rurais, nas proximidades de estruturas de risco como por exemplo postos de abastecimento de veículos automóveis, ou com maior ou menos espessuras de recobrimento. O zonamento geotécnico não pode por isso ser entendido como um receituário de soluções pré determinadas que dispense estudos específicos localizados, carecendo de reconhecimento e instrumentação contínuos do maciço a escavar, ao longo de todo o processo de execução (Bastos, 1998).

### **2.3.3 Estudo de descontinuidades: caracterização de frentes**

De seguida, pretende-se de forma resumida descrever as técnicas utilizadas para a caracterização de frentes de escavação.

A frente de escavação não é mais que uma superfície exposta do maciço rochoso aquando da escavação deste. O levantamento destas frentes deve ser sistemático para que o reconhecimento geotécnico das zonas geológico – geotécnicas atravessadas seja o mais rigoroso possível e se possa desta maneira verificar as diferenças entre o expectável em projecto e a realidade encontrada no terreno.

O levantamento das frentes depara-se com muitas dificuldades aquando da sua execução, nomeadamente com o desenvolver dos trabalhos de construção que ocorrem na frente, tais como trabalhos de perfuração, carregamento de explosivos, e montagem do sustimento. Adicionalmente a isso, importa ainda referir o ambiente que se pode encontrar em escavações subterrâneas, como poeiras, gases de explosivo e do trabalho das máquinas, bem como elevadas temperaturas.

Aquando do levantamento de frentes importa recolher os seguintes dados:

- litologia da frente;
- orientação e pendor das descontinuidades;
- localização topográfica a que se encontra a frente de escavação (designado por PK);
- grau de alteração;
- espaçamento das descontinuidades;
- preenchimento das descontinuidades;
- rugosidade;
- abertura;
- percolação de geoflúidos;
- outras observações.

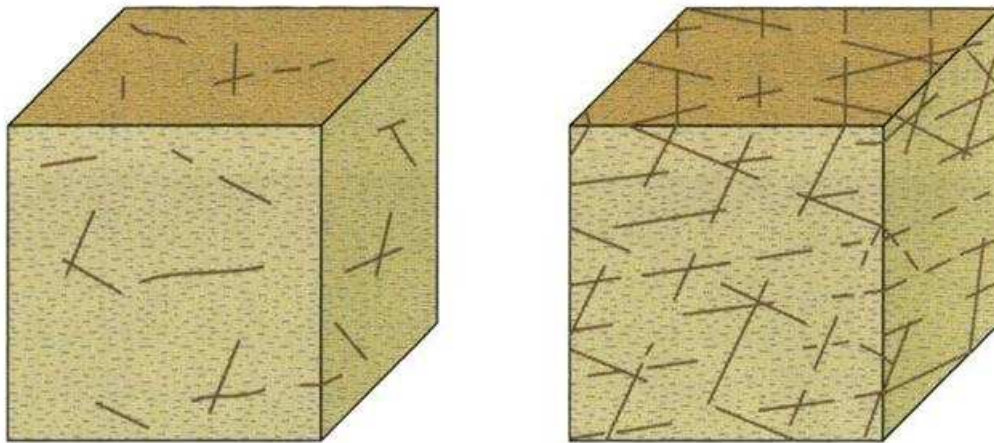
As informações recolhidas são registadas na tabela apresentada na Figura 2.

Descontinuidade	PK	Litologia	Grau de alteração		Atitude Dir./Inc.	Tipo de descontinuidade (Falha, Diáclase)	Abertura (mm)		Grau de fracturação (cm) (Fracture intercept)		T	C	R	Tipo de Enchimento	Presença de água	Observações	
			Tipo	Classificação			Valor	Classificação	Valor	Classificação F							

Figura 2 - Ficha tipo de levantamento geológico e geomecânico de frentes (adaptado de ISRM (1978, 1981, 2007), GSE (1995)).

### 2.3.4 Descontinuidades

Designam-se como sendo superfícies de fraqueza estrutural que intersectam o maciço, dessa forma compartimentando-o estruturalmente. A presença de descontinuidades no maciço, influencia de forma definitiva a alteração das propriedades do maciço rochoso, uma vez que através delas podem fluir geofluidos, como água e substâncias ácidas que aceleram a desagregação de partículas e alteram a composição química destas. As características das descontinuidades influenciam decisivamente o comportamento geomecânico do maciço, pelo que o seu levantamento ao longo da escavação deste se reveste de grande importância, especialmente quando é utilizado o método de escavação NATM, no qual a adaptação do método construtivo às reais características do maciço ocorre ao longo da escavação. Ainda relativamente às descontinuidades importa ter em atenção outras características destas, tais como a rugosidade, o preenchimento e abertura (que terão influência decisiva no cisalhamento), a deformação do maciço, e ainda a orientação e pendor das fracturas relativamente à orientação do túnel e frente de escavação o que influencia a estabilidade desta e os avanços dados. Interessa ainda referir relativamente às fracturas, a possibilidade de intersecção destas, e consequente formação de blocos soltos no tecto e hasteais dos túneis, que podem sofrer risco de queda se não forem convenientemente suportados.



**Figura 3 - Representações simples de blocos diagramas esquemáticos indicativos da continuidade de várias famílias de fracturas (adaptado da ISRM, 1981; González de Vallejo et al., 2002).**

### 2.3.5 Alteração

A alteração do maciço entende-se como sendo a desagregação e decomposição da rocha levadas a cabo por agentes físicos e químicos naturais, que transformam a rocha noutra produto natural, agora em equilíbrio físico-químico com o meio ambiente

O estado de alteração do maciço pode ser classificado mediante a atribuição de um valor de 1 a 5 que define o estado do material rocha tal como apresentado na Tabela 1.

Zonas	Grau de alteração	Nomenclatura		Significado	
Zona inferior	Sã ou não alterada	W <sub>1</sub>	W <sub>1-2</sub>	Não se observam sinais de alteração na matriz rochosa	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sã e compacta</li> <li>Descontinuidades fechadas</li> <li>Permeabilidade e praticamente nula</li> </ul>
	Ligeiramente alterada	W <sub>2</sub>	W <sub>2-3</sub>	Mudança de cor original da matriz rochosa (descoloração)	
Zona intermédia	Moderadamente alterada	W <sub>3</sub>	W <sub>3</sub>	Menos de metade do material rochoso está decomposto e/ou desagregado num solo, mantendo-se a petrofábrica original	<ul style="list-style-type: none"> <li>Maciços mais ou menos são</li> <li>Intersectado por descontinuidades abertas</li> </ul>
Zona Superior	Muito alterada	W <sub>4</sub>	W <sub>4-5</sub>	Mais de metade do material rochoso está decomposto e/ou desagregado num solo; a rocha é muito friável	<ul style="list-style-type: none"> <li>Zona alterada a muito alterada ou mesmo decomposta</li> <li>Permeabilidade do tipo intersticial</li> <li>Pode coexistir uma circulação fissural.</li> </ul>
	Completamente alterada	W <sub>5</sub>		Todo o material rochoso está muito decomposto e/ou desgregado num solo residual	

**Tabela 1 - Evolução do grau de alteração do maciço rochoso (adaptado da ISRM, 1981).**

### 2.3.6 Atitude

A atitude de uma descontinuidade é definida por:

- direcção – ângulo que a descontinuidade faz em relação ao Norte magnético;
- inclinação – ângulo formado pela linha de maior declive do plano no quadrante em questão.

A medição destes valores pode ser realizada mediante uma bússola de geólogo também designada clinómetro.

As descontinuidades que intersectam os maciços encontram-se agrupadas em famílias de características geológico – estruturais mais ou menos homogéneas. Agrupam-se numa mesma família todas as descontinuidades que apresentam idêntica orientação (Rocha, 1981).

Após o levantamento das descontinuidades, estas podem ser representadas graficamente mediante:

- diagramas geológico – estruturais que fornecem uma visão geral das famílias de descontinuidades como por exemplo o diagrama de rosetas e o diagrama de contorno estrutural;
- projecções estereográficas, mediante a rede estereográfica Shmidt – Lambert;
- símbolos em mapas geológicos, que indicam o valor médio da direcção e o valor de inclinação para os diferentes tipos de descontinuidades.

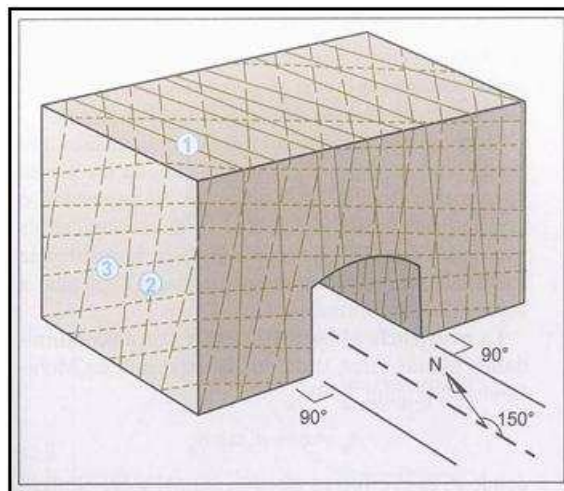


Figura 4 - Representação das famílias principais em bloco diagrama (adaptado da ISRM, 1981; González de Vallejo et al., 2002).

### 2.3.7 Espaçamento

O espaçamento entre descontinuidades é também de grande importância para a determinação da dimensão dos blocos. O maciço, relativamente à sua fracturação pode ser classificado de F1 a F5 de acordo com a grandeza da medida de afastamento como demonstra a Tabela 2:

Intervalos (cm)	Símbolos	Designações
>200	F <sub>1</sub>	muito afastadas
60-200	F <sub>2</sub>	afastadas
20-60	F <sub>3</sub>	medianamente afastadas
6-20	F <sub>4</sub>	próximas
<6	F <sub>5</sub>	muito próximas

Tabela 2 - Terminologia para caracterizar os maciços em função do espaçamento das descontinuidades segundo a ISRM (1978, 1981).

### 2.3.8 Rugosidade

A rugosidade influencia de forma directamente proporcional a resistência ao corte do maciço, assim como as possíveis direcções de deslocamento relativo dos blocos. A resistência ao corte pode no entanto ser muito variável de acordo com a direcção do movimento. Tendo em conta a direcção e intensidade dos campos de tensão que se encontrem aplicados nas descontinuidades, estas poderão apresentar várias ordens de ondulação.

A ISRM propõe-nos a inclusão das descontinuidades nos seguintes grupos:

- Denteada (R1-2);
- Ondulada (R3);
- Plana (R3-4).

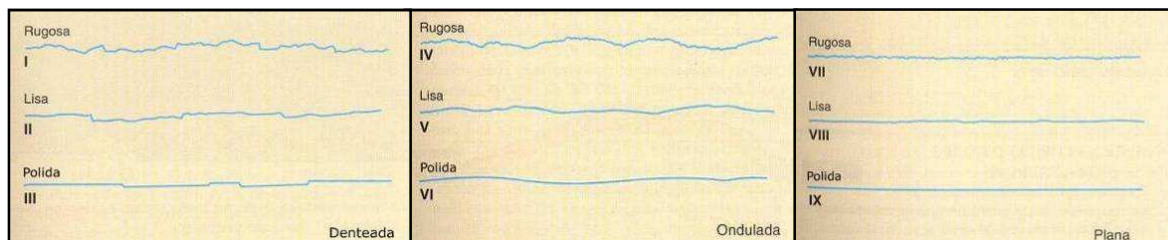


Figura 5 - Perfis de rugosidade, o comprimento dos perfis está entre 1 e 10 metros (adaptado de ISRM, 1981; González de Vallejo et al., 2002).

### 2.3.9 Abertura

Designa-se por abertura a distância perpendicular que separa as paredes da descontinuidade quando não existe qualquer tipo de enchimento.

A influência da abertura na resistência ao corte das descontinuidades é importante, pois modifica as tensões efectivas que actuam nas suas paredes.

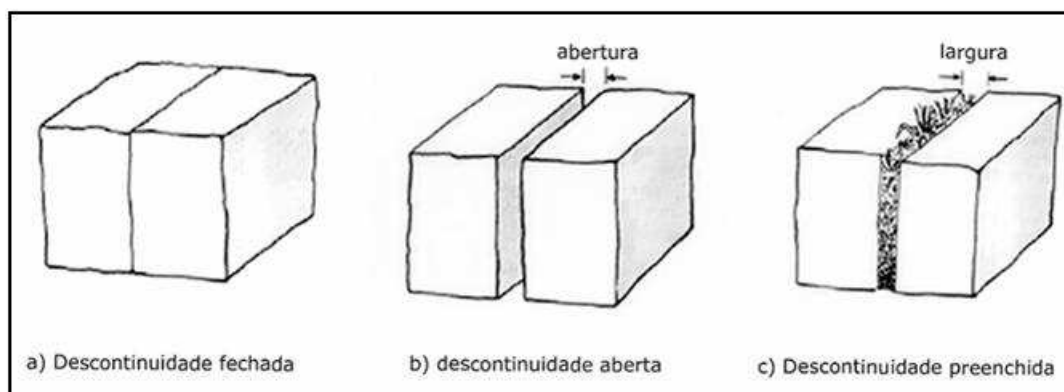


Figura 6 - Diagramas que ilustram as definições de abertura de descontinuidade (ISRM, 1978).

### **2.3.10 Enchimento**

Designa-se por enchimento a camada de material existente entre as paredes da descontinuidade geralmente de baixa resistência. As propriedades físicas e mecânicas do enchimento (como a resistência ao corte, a deformabilidade e a permeabilidade) têm grande influência sobre o comportamento da descontinuidade. O preenchimento pode ser de materiais brandos argilosos a material rocha de natureza distinta das paredes da descontinuidade (calcite, clorite, argila, fault gouge, brecha, milonito, etc.)

### **2.3.11 Percolação**

O fluxo de água pelas descontinuidades designado permeabilidade secundária, pode eventualmente levar à percolação deste fluido. A percolação de fluidos nas descontinuidades é de imensa importância uma vez que pode acelerar a alteração e desagregação da rocha. E trazem problemas relativamente a processos construtivos e dificuldades nos trabalhos em obras subterrâneas.

### **2.3.12 Planos de xistosidade**

Os planos de xistosidade são tipicamente encontrados na maior parte de rochas metamórficas. Durante o metamorfismo, os minerais constituintes reorganizam-se, o que resulta numa orientação predominante por parte dos grãos constituintes da rocha por influência das pressões aplicadas.

Estes planos, são essencialmente planos de fraqueza estrutural, especialmente se estes forem formados por micas e outros minerais lamelares.

## 2.4 Rock Quality Designation - RQD (%)

O RQD de DEERE et al. (1967) é um índice que serve para designar a qualidade do material rocha. É medido a partir de testemunhos de sondagens do local, com base na litologia, fracturação e alteração. O valor pode ser obtido mediante a seguinte equação:

$$RQD = \frac{(Soma\ fragmentos\ sondagem\ \geq\ 10\ metros)}{Extens\tilde{a}o\ da\ sondagem} \times 100 \quad [1]$$

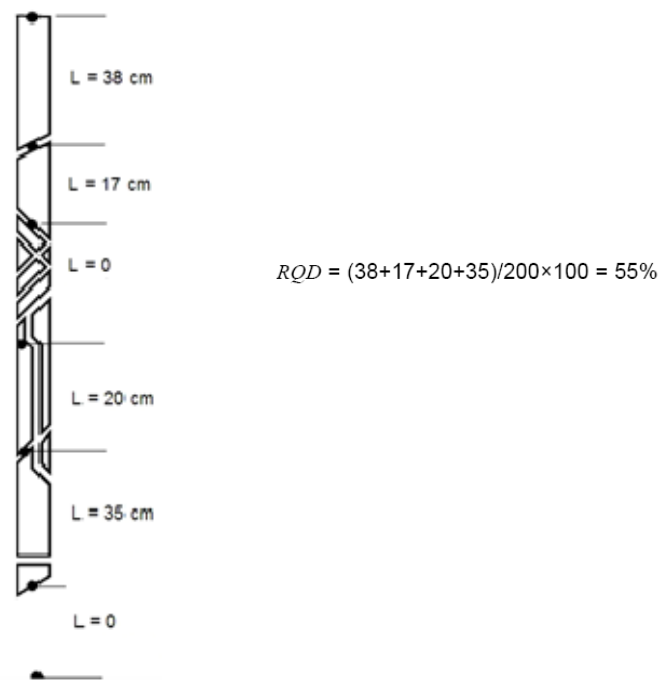


Figura 7 - Exemplo de cálculo de valor de RQD (adaptado de Deere, 1989).

O seguinte quadro oferece informações relativamente à qualidade da rocha de acordo com o valor obtido:

	RQD (%)	Qualidade da rocha
1	<25	Muito fraca ou muito má
2	25-50	Fraca ou má
3	50-75	Razoável
4	75-90	Boa
5	90-100	Muito Boa ou excelente

Tabela 3 - Terminologia para caracterizar os maciços em função do RQD (adaptado Deere, 1989).

## 2.5 Resistência à compressão uniaxial

A determinação da resistência à compressão simples da rocha é um parâmetro de imensa importância na escolha e dimensionamento do método de escavação subterrânea a utilizar. A resistência à compressão da rocha mais não é do que o máximo esforço que a rocha submetida à compressão uniaxial suporta. Este parâmetro pode ser determinado em laboratório mediante um ensaio de compressão uniaxial ou de forma aproximada mediante dois métodos aos quais se recorreu para a elaboração deste documento. Estes métodos são:

- esclerómetro portátil ou martelo Schmidt (método “in situ”);
- ensaio de carga pontual, “Point Load Test” (método laboratorial).

Quando lidamos com rochas heterogêneas, como é o caso do xisto, a obtenção de amostras para laboratório pode ser difícil. Durante o ensaio a orientação da carga deve ser perpendicular à orientação dos planos de xistosidade.

### 2.5.1 Esclerómetro portátil

Desenvolvido pelo Eng<sup>o</sup>. Suíço Ernst Schmidt em 1948, para ensaios de natureza não destrutiva da dureza superficial do betão (Schmidt, 1951), e mais tarde, para estimar a resistência da superfície do betão através de correlações empíricas e para avaliar a resistência de material rochoso (Cargill & Shakoore, 1990). Este ensaio permite estimar de forma aproximada a resistência à compressão simples, sendo aplicado fundamentalmente à matriz rochosa e também às discontinuidades.

A aplicabilidade deste ensaio é bastante elevada devido à sua simplicidade, não destrutibilidade, rapidez e fácil portabilidade

O martelo Schmidt (Figura 8) avalia a dureza das rochas mediante a medição do ressalto (“rebound”) de uma massa de aço quando percutida sobre a superfície da rocha.

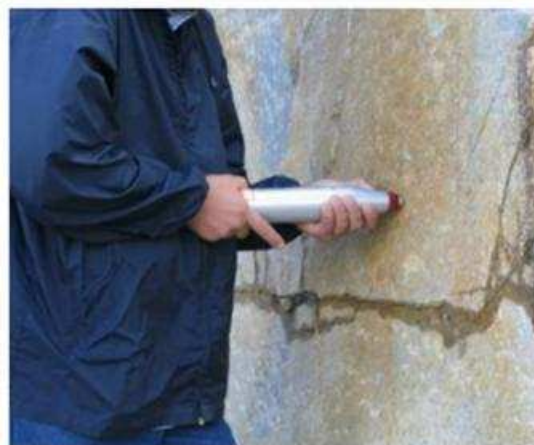


**Figura 8 - Esclerómetro portátil Silver Schmidt ([www.proceq.com](http://www.proceq.com)).**

No ensaio, o aparelho é colocado perpendicularmente ao plano estrutural a ser ensaiado. Em função da dureza (ou resistência) da rocha, a massa de aço sofre maior ou menor ressalto. Seguidamente, o valor do ressalto é registado numa escala do aparelho (10-100). Os valores obtidos pelo Martelo Schmidt nas direcções não horizontais são influenciados pelas forças gravitacionais em diferentes graus. Por isso, os valores devem ser normalizados em relação à horizontal.

O procedimento consiste em registar-se 10 percussões e eliminar-se os 5 valores mais baixos, determinando-se por fim o valor médio dos restantes valores.

Recorrendo-se ao ábaco de Miller (página seguinte) obtém-se por fim um valor de compressão simples a partir da valores obtidos nos ensaios e da densidade da rocha (ISRM 1978).



**Figura 9 - Exemplo de ensaio com um martelo Schmidt.**

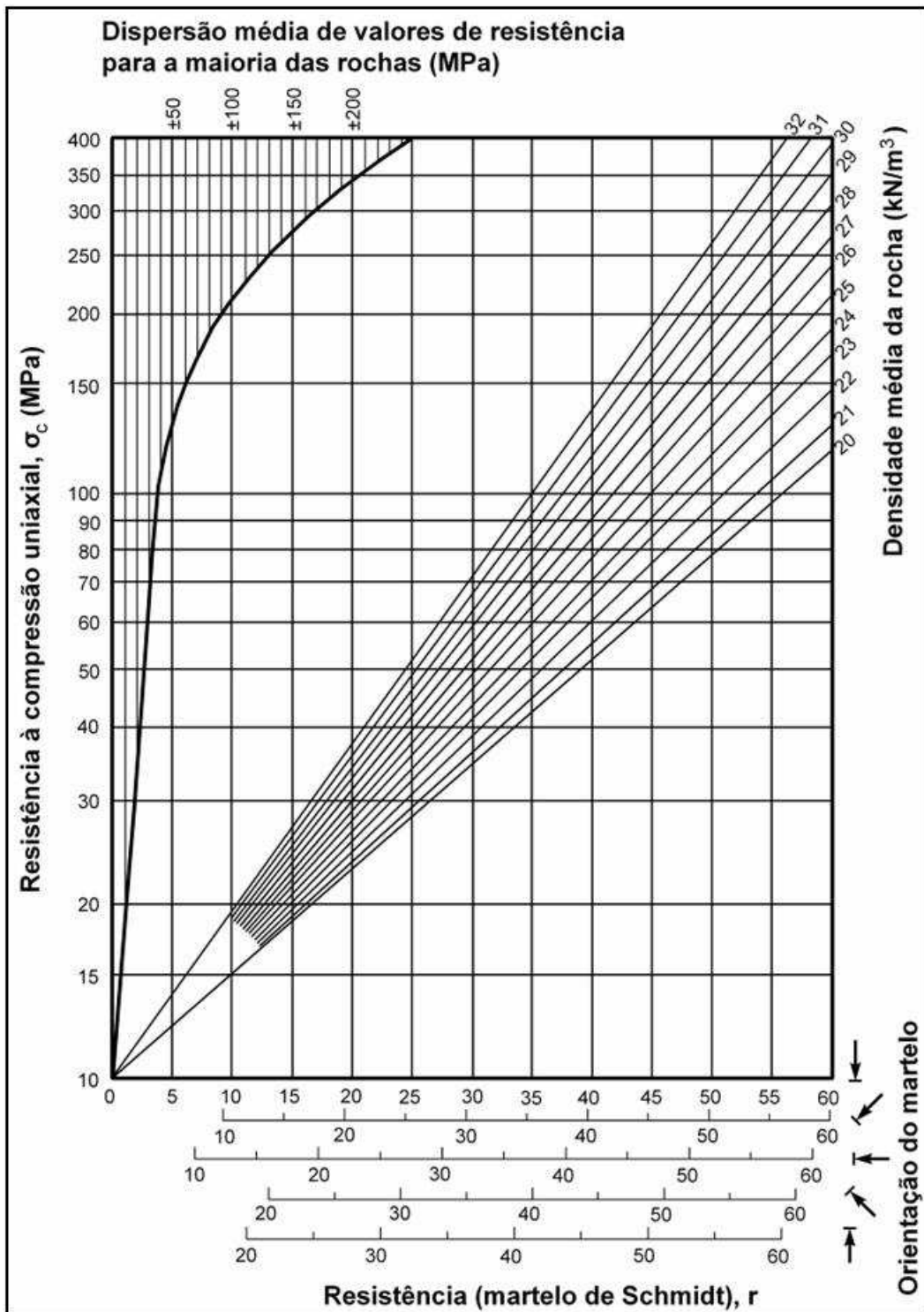


Figura 10 - Ábaco de Miller para o cálculo da resistência a partir do martelo Schmidt (adaptado de González de Vallejo et al., 2002).

Classificação	Resistência à Compressão Simples (MPa)	Designação		
S <sub>1</sub>	> 200	Muito elevada	Elevada	S <sub>1-2</sub>
S <sub>2</sub>	60 a 200	Elevada		
S <sub>3</sub>	20 a 60	Média	Média	S <sub>3</sub>
S <sub>4</sub>	6 a 20	Baixa	Baixa	S <sub>4-5</sub>
S <sub>5</sub>	<6	Muito baixa		

**Tabela 4 - Classificação do maciço com base na resistência à compressão simples (ISRM, 1978, 1981).**

### 2.5.2 Ensaio de Carga Pontual

O Ensaio de Carga Pontual (“Point Load Test”) é um método simples de aferir a resistência à compressão simples da rocha em laboratório. Trata-se de um ensaio de referência e permite determinar o Índice de Carga Pontual da rocha ensaiada, valor directamente correlacionável com a resistência à compressão uniaxial, e também com outros índices de resistência da rocha.

O ensaio permite efectivamente determinar:

- o índice de resistência à carga pontual - (I<sub>s</sub> (50));
- o índice de anisotropia - (I<sub>a</sub> (50)).

O método consiste fundamentalmente em levar à rotura as amostras de rocha mediante uma carga concentrada entre duas ponteiros cónicas, podendo ser utilizados blocos de forma prismática, cilíndrica ou de forma irregular, e a direcção da carga aplicada pode ser axial ou diametral.

A carga aplicada deve ser capaz de romper os provetes de rocha, e o sistema para a sua aplicação deve ser capaz de permitir o ensaio em provetes de variadas dimensões (entre 15 e 100 mm). As ponteiros cónicas responsáveis pela transmissão da carga devem ainda ser indeformáveis e manter-se ao longo do ensaio alinhadas. O sistema de medição de cargas entre ponteiros deve ter uma precisão de cerca de 2%.



**Figura 11 - Equipamento para a execução do Ensaio de Carga Pontual, PLT (Laboratório de Geotecnia e Materiais de Construção, LGMC, do ISEP).**

O sistema deve ainda ser resistente ao choque e vibrações hidráulicas.

O ensaio deve seguir as normas de procedimento recomendadas pela “*International Society for Rock Mechanics*” (ISRM, 1985).

#### **2.5.2.1 Procedimento do Ensaio**

De acordo com as características da forma do testemunho, o eixo escolhido para aplicar a carga, o tipo de rocha a ensaiar e a anisotropia da amostra, é definido o tipo de ensaio a efectuar, que pode ser de 3 tipos:

- Ensaio diametral;
- Ensaio axial;
- Ensaio em blocos e fragmentos irregulares.

#### **2.5.2.2 Ensaio diametral**

Este ensaio é efectuado num mínimo de 10 provetes por amostra, ou mais no caso de a rocha ser anisotrópica, provetes esses que devem ser cilíndricos e com uma relação comprimento/diâmetro superior a um.

O provete é colocado na máquina de ensaio de forma a que a distância entre pontos de contacto e a extremidade livre mais próxima seja pelo menos 0,5 vezes o diâmetro do provete. É anotado o valor da distância entre as ponteiros  $D$  e o valor da carga de rotura  $P$ .

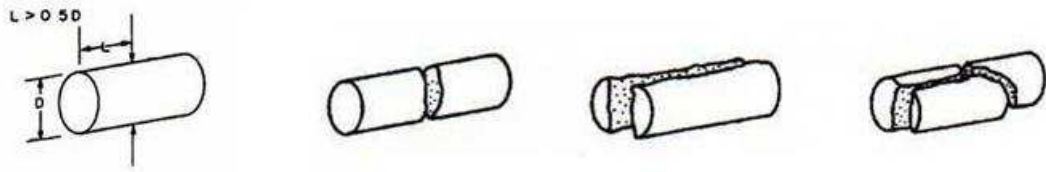


Figura 12 - Ensaio diametral,  $L > 0,5 D$  e ensaios considerados válidos (adaptado da ISRM, 1985).

Os testes são anulados sempre que a superfícies de rotura não passe pelos dois pontos de contacto como demonstra a Figura 13.

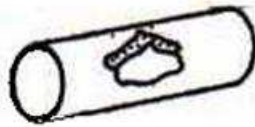


Figura 13 - Ensaio diametral, ensaio considerado não válido (adaptado da ISRM, 1985).

### 2.5.2.3 Ensaio axial

O ensaio axial é efectuado em provetes cilíndricos com relação comprimento/diâmetro de 0,3 e 1,0. Os provetes podem ser serrados e os mais compridos podem mesmo ser aproveitados para ensaios diametraes de forma a produzirem novos provetes que possam ser testados axialmente. O ensaio deve ser executado num mínimo de 10 provetes por amostra, ou mais se a rocha for heterogénea ou anisotrópica. Na máquina de ensaio, o eixo do ensaio tem de coincidir com o eixo perpendicular às faces planas da amostra. Para o caso de rochas isotrópicas o eixo de ensaio coincide com o eixo do cilindro e para rochas anisotrópicas este é perpendicular aos planos de descontinuidades.

Deve ser anotado o valor da distância entre ponteiras (D), a largura do provete (w) perpendicular à direcção de carga (com uma precisão de cerca de 5%), e o valor da carga aplicada (P).

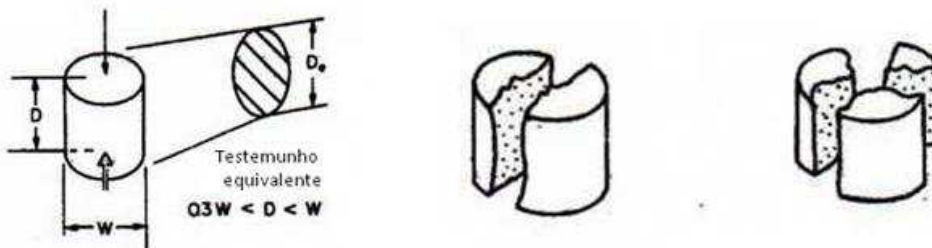


Figura 14 - Ensaio axial, dimensão do testemunho equivalente e ensaios considerados válido (adaptado da ISRM, 1985).

Os provetes cuja superfície de rotura não passe por dois pontos de contacto devem ser rejeitados. (ver Figura 15).



Figura 15 - Ensaio axial, ensaio considerado não válido (adaptado da ISRM, 1985).

#### 2.5.2.4 Ensaio em blocos e em fragmentos irregulares

Para este ensaio são utilizados provetes de forma irregular mas com as seguintes características:

- comprimento entre  $50 \pm 35$  mm,
- e distância entre ponteiros/largura do provete variando entre 0,3 a 1,0 de preferência, próximo da unidade.

Devem realizar-se um mínimo de 10 testes em rochas homogêneas e mais de 10 em rochas anisotrópicas ou heterogêneas, e a carga a aplicar (P) deve ser aplicada a uma distância superior a 0,5 vezes a largura do provete ou seja  $0,5W$  (ver Figura 16).

No caso de os lados do provete não serem paralelos, a dimensão perpendicular ao eixo do ensaio é calculada mediante a expressão:

$$W = \frac{(W_1 + W_2)}{2} \quad [2]$$

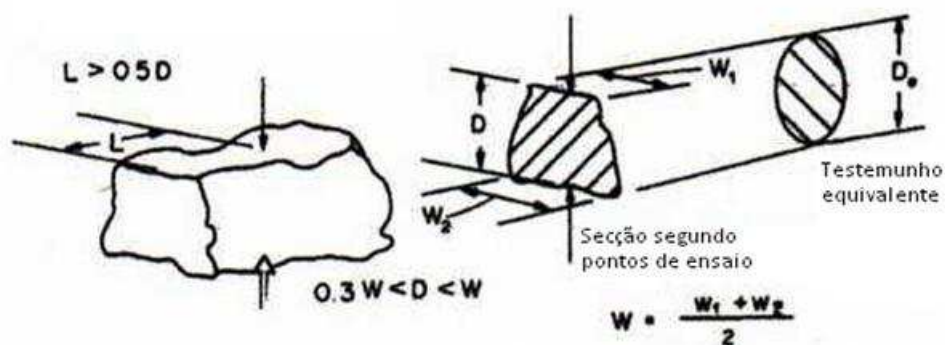


Figura 16 - Ensaio provetes irregulares, tamanho do testemunho equivalente (adaptado da ISRM, 1985).

### 2.5.2.5 Índice de carga pontual

O Índice de carga pontual é obtido mediante a expressão:

$$I_s = \frac{P}{D^2} \quad [3]$$

Onde:

P – carga de rotura

D – distância entre ponteira

Após obtenção deste valor, ele deve ser corrigido para  $I_s(50)$ , que é o valor correspondente a  $D=50\text{mm}$  que também pode ser obtido no gráfico da Figura 17.

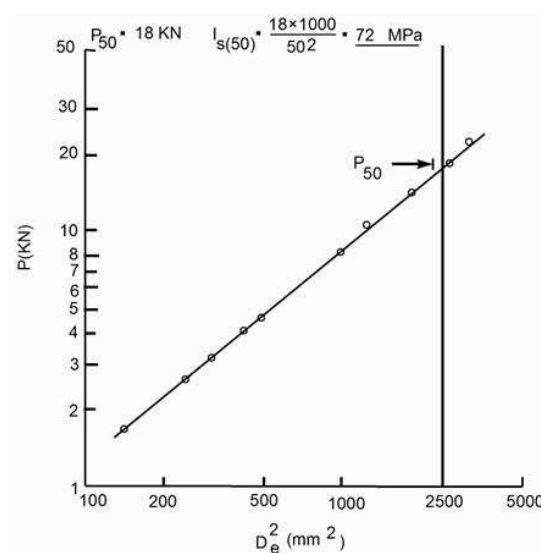


Figura 17 - Gráfico para cálculo de  $I_{s(50)}$ , segundo a ISRM (1985).

Os valores P e  $D^2$  são projectados no diagrama log - log, obtendo-se assim uma recta a partir da qual se torna possível extrapolar o valor de P correspondente a  $D_e^2 = 2500\text{mm}^2$ . A partir dos valores obtidos determina-se então  $I_s(50)$  através da expressão:

$$I_s(50) = \frac{P(50)}{2500} \quad [4]$$

Se forem utilizadas amostras de tamanhos únicos, o melhor processo para determinar o  $l_s$  (50) é de forma numérica mediante a expressão:

$$L_s(50) = F \times L_s \quad [5]$$

Sendo  $F$  o factor de correcção que é obtido através do gráfico da Figura 18, ou através da expressão:

$$lF = \left(\frac{De}{50}\right)^{0,45} \quad [6]$$

No caso de se tratar de ensaios axiais, em blocos ou em fragmentos irregulares a distância equivalente será:

$$F = \frac{4 \times A}{\pi} \quad [7]$$

E a área será:

$$A = W \times D \quad [8]$$

Para os ensaios diametrais  $D = De$ .

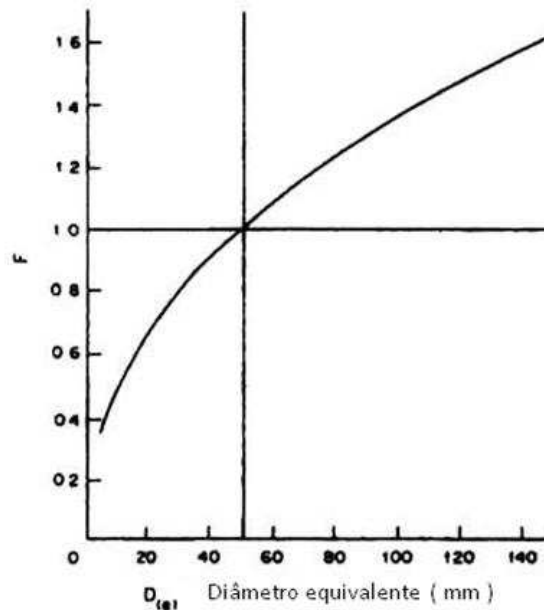


Figura 18 - Gráfico para correcção do diâmetro segundo a ISRM (1985).

### 2.5.3 Cálculo do valor médio

Para o cálculo do valor médio de  $I_s(50)$  deve ser tido em conta o índice de resistência pontual deste e o índice de anisotropia ( $I_a$ ). O cálculo do valor médio de  $I_s(50)$  deve ser calculado retirando os dois valores mais baixos e os dois valores mais altos, e é feita a média dos restantes valores.

### 2.5.4 Cálculo do índice de anisotropia

O Índice de anisotropia  $I_a(50)$  é calculado através da razão entre as medianas dos Índices calculados para tensões normais paralelas aos planos de debilidade.  $I_a(50)$  toma geralmente valores próximos de um para rochas isotrópicas e valores mais elevados quando se trata de rochas anisotrópicas.

### 2.5.5 Resistência à compressão uniaxial

A resistência à compressão uniaxial é cerca de 20 a 25 vezes a resistência à carga pontual como se pode verificar pelo gráfico seguinte:

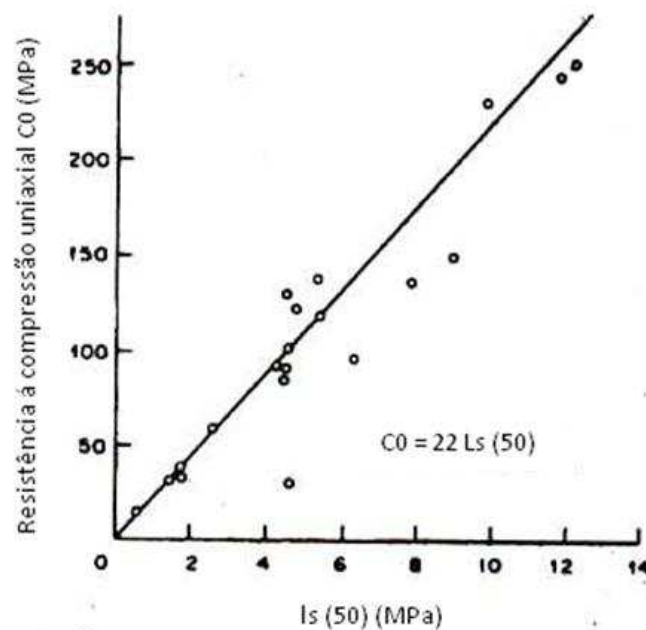


Figura 19 - Gráfico para a correlação entre a resistência à carga pontual e a resistência à compressão, segundo a ISRM (1985).

## 2.6 Classificações geomecânicas

O maciço rochoso, como meio anisotrópico, apresenta um comportamento geomecânico complexo. Os estudos para a sua caracterização devem ser feitos, simplificando o modelo, e caracterizando-os em função da sua aptidão para diferentes aplicações.

Surgiram assim as classificações geomecânicas por parte de diferentes autores como forma de classificar os maciços rochosos.

As classificações geomecânicas alicerçam-se em pressupostos empíricos, uma vez que os maciços rochosos são meios descontínuos, heterogêneos e compartimentados, tornando por isso a sua avaliação difícil.

Assim, as classificações apresentam como principais objectivos os seguintes.

- Avaliar a competência dos maciços rochosos, em particular nas escavações subterrâneas;
- Definir os sistemas de escavação mais adequados para a execução de uma dada obra;
- Definir o sustimento necessário durante a execução da obra, a partir da observação e ensaios de realização expedita, de forma a obter-se o designado “índice de qualidade do maciço”.

As classificações usadas neste documento foram:

- Rock mass rating (RMR);
- Geological strength index (GSI);
- Q de Barton.

### 2.6.1 Rock Mass Rating

Publicada por Bieniawsky, o RMR desenvolveu-se para aplicação em maciços rochosos subterrâneos, baseando-se na atribuição de pesos a parâmetros previamente seleccionados. Esses parâmetros referem-se sobretudo a características do maciço e material rocha. Os parâmetros são:

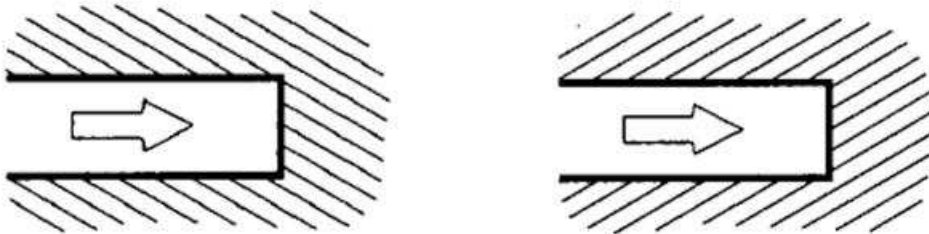
- i. Resistência á compressão uniaxial;
- ii. Rock quality designation (RQD);
- iii. Espaçamento das descontinuidades;
- iv. Condições das descontinuidades;
- v. Condições hidrogeológicas;
- vi. Orientação das descontinuidades relativamente á escavação.

Mediante a soma dos pesos atribuídos aos diferentes parâmetros de P1 (i) a P5 (v) é obtido um valor de 0 a 100, designado índice de qualidade RMR, e que permite a caracterização do maciço em termos de qualidade, como sendo muito fraco, fraco, razoável, bom ou muito bom.

$$RMR_{básico} = \sum (i + ii + iii + iv + v) \quad [9]$$

O parâmetro P6 é utilizado como um parâmetro de ajuste que reflecte a influência das orientações das descontinuidades.

$$RMR = RMR_{básico} + v_i \quad [10]$$



**Figura 20 - Orientação das descontinuidades relativamente á escavação (adaptado de Hoek, 2007).**

Para a classificação são utilizadas as tabelas Tabela 5, Tabela 6 e Tabela 7 como guia de orientação.

Parâmetros			Coeficientes						
1	Resistência da rocha intacta	Point Load	> 10 MPa	4-10 MPa	2-4 MPa	1-2 MPa	Ver compressão uniaxial		
		Compressão uniaxial	> 250 MPa	100-250 MPa	50-100 MPa	25-50 MPa	5-25 MPa	1-5 MPa	< 1 MPa
	Pesos		15	12	7	4	2	1	0
2	R.Q.D.		90-100 %	75-90 %	50-75 %	25-50 %	< 25 %		
	Pesos		20	17	13	8	3		
3	Espaçamento das descontinuidades		> 2 m	0,6-2 m	200-600 mm	60-200 mm	< 60 mm		
	Pesos		20	15	10	8	5		
4	Condição das descontinuidades (ver Tabela 3)		Superfícies muito rugosas, não contínuas, sem separação, paredes de rocha não alteradas	Superfícies ligeiramente rugosas, separação < 1 mm, paredes ligeiramente alteradas	Superfícies ligeiramente rugosas, separação < 1 mm, paredes muito alteradas	Superfícies polidas ou enchimento com espessura < 5 mm ou juntas contínuas com separação 1-5 mm	Enchimento mole com espessura > 5 mm ou juntas contínuas com separação > 5 mm		
	Pesos		30	25	20	10	0		
5	Presença de água	Caudal por 10 m de comprimento do túnel	nenhum	< 10 l/min	10-25 l/min	25-125 l/min	> 125 l/min		
		Relação pressão da água vs tensão principal máxima	0	< 0,1	0,1-0,2	0,2-0,5	> 0,5		
		Condições gerais	Completamente seco	Água intersticial	Húmido	Escorrimentos	Entrada de água		
	Pesos		15	10	7	4	0		

Tabela 5 - Classificação geomecânica de Bieniawski (1989).

Comprimento da descontinuidade (persistência)	< 1 m	1 - 3 m	3 - 10 m	10 - 20 m	> 20 m
Peso	6	4	2	1	0
Separação (abertura)	Nenhuma	< 0,1 mm	0,1 - 1,0 mm	1 - 5 mm	> 5 mm
Peso	6	5	4	1	0
Rugosidade	Muito rugoso	Rugoso	Ligeiramente rugoso	Quase liso	Liso
Peso	6	5	3	1	0
Enchimento	Nenhum	Duro com espessura < 5 mm	Duro com espessura > 5 mm	Mole com espessura < 5 mm	Mole com espessura > 5 mm
Peso	6	4	2	2	0
Grau de alteração	Não alteradas	Ligeiramente alteradas	Moderadamente alteradas	Muito alteradas	Em decomposição
Peso	6	5	3	1	0

Tabela 6 - Classificação da condição das descontinuidades (1989).

Direcção perpendicular ao eixo do túnel				Direcção paralela ao eixo do túnel		Inclinação 0-20°
Abertura do túnel no sentido da inclinação		Abertura do túnel no sentido inverso da inclinação		Inclinação 45-90°	Inclinação 20-45°	
Inclinação 45-90°	Inclinação 20-45°	Inclinação 45-90°	Inclinação 20-45°			
Muito favorável	Favorável	Razoável	Desfavorável	Muito desfavorável	Razoável	Razoável

Orientação das descontinuidades		Muito favorável	Favorável	Razoável	Desfavorável	Muito desfavorável
Pesos	Túneis e minas	0	-2	-5	-10	-12
	Fundações	0	-2	-7	-15	-25
	Taludes	0	-5	-25	-50	-60

Tabela 7 - Efeito da orientação das descontinuidades (Bieniawski, 1989).

## 2.6.2 Geological Strength Index

A *Geological Strength Index* é um sistema de classificação introduzido por Hoek (1994), e revisto em 1995 por Hoek, Kaiser e Brown, que fornece um parâmetro geotécnico de classificação do maciço que varia entre 0 e 100. É um sistema que se baseia no conceito de que a resistência de um maciço rochoso depende não só das propriedades da rocha intacta, mas também na liberdade que os blocos de rocha têm de escorregar ou rodar sob diferentes condições de tensão.

Mediante a Tabela 8 é possível caracterizar a massa rochosa em face das condições das descontinuidades e interligação entre estas:

GEOESTRUTURA		QUALIDADE DECRESCENTE DAS SUPERFÍCIES →				
<p><b>GEOLOGICAL STRENGTH INDEX - GSI</b>  <b>Índice Geológico de Resistência - maciços diáclados (Hoek e Marinos, 2000)</b></p> <p>A partir da litologia, da estrutura do maciço e das características das superfícies das descontinuidades, estimar o valor médio de GSI. Não se deve ser demasiado preciso (é mais realista referir um intervalo de GSI = 33-37, que afirmar que GSI = 35). É de referir que a tabela não tem validade para roturas determinadas pela estrutura do maciço. Quando ocorrem descontinuidades desfavoravelmente orientadas, estas determinam o comportamento da escavação.</p> <p>No caso de descontinuidades com preenchimento que se possam deteriorar com a presença de água, resultando na diminuição da resistência ao corte, sugere-se o uso de valores mais à direita. A acção da pressão da água é analisada em função de tensões efectivas.</p>		<p>CARACTERÍSTICAS DAS SUPERFÍCIES DAS DESCONTINUIDADES</p> <p>MUITO BOAS Superfícies muito rugosas, sílis</p> <p>BOAS Superfícies rugosas, ligeiramente alteradas, com oxidação</p> <p>RAZÓAVEIS Superfícies suaves, moderadamente alteradas e desgastadas</p> <p>FRACAS Superfícies esfriadas, fortemente alteradas, com preenchimentos arenosos</p> <p>MUITO FRACAS Superfícies esfriadas, fortemente alteradas, com preenchimentos argilosos</p>				
<p>INTACTA OU MACIÇA - rocha intacta ou maciça com descontinuidades em pequena quantidade e muito afastadas.</p>		90			N/A	N/A
<p>COMPARTIMENTADO ("blocky") - maciço não perturbado, constituído por blocos cúbicos, bem travados entre si, definidos por 3 famílias de descontinuidades.</p>		80				
<p>MUITO COMPARTIMENTADO ("very blocky") - maciço parcialmente perturbado, com blocos angulares multi-facetados, travados entre si, definidos por 4 ou mais famílias de descontinuidades.</p>		70				
<p>COMPARTIMENTADO/TECTONIZADO ("blocky/disturbed") - dobrado e/ou com presença de falhas, com blocos angulares definidos por várias famílias de descontinuidades. Persistência de xistosidade ou planos de fraqueza.</p>		60				
<p>DESINTEGRADO - maciço pouco interligado, fortemente partido, com mistura de fragmentos angulares e arredondados.</p>		50				
<p>FOLIADO/LAMINADO - maciço foliado, dobrado e tectonizado. A estrutura do maciço é conferida pela presença de planos de xistosidade ou de corte pouco espaçados.</p>		40				
		30			20	
		20			10	
		N/A	N/A		5	

Tabela 8 - Determinação do valor do GSI segundo Hoek (2007), adaptado por Miranda (2003).

### 2.6.3 Q de Barton

Proposta em 1974 por Barton do Norwegian Geotechnical institute, esta classificação baseia-se sobretudo no estudo sistemático de um largo número de casos de obras subterrâneas.

O *Rock Tunneling quality Index* proposto por Barton é um índice que caracteriza as características geomecânicas do maciço rochoso, e varia numa escala logarítmica de 0,001 até um máximo de 1000.

O índice é definido pela expressão:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SFR} \quad [11]$$

Onde:

RQD – Rock quality designation;

$J_n$  – nº de famílias das diaclases;

$J_a$  – índice de alteração das diaclases;

SFR – Estado de tensão do maciço rochoso (“Stress Reduction Factor”);

$J_r$  – Índice de Rugosidade;

$J_w$  – Factor de redução do caudal de água.

Assim temos 3 parâmetros globais, que resultam da avaliação do maciço objecto de estudo.

- $RQD/J_n$  – Representa a estruturação do maciço rochoso. De certa forma é uma avaliação da fracturação contemplado o tamanho dos blocos;
- $J_r/J_a$  – Este índice fornece-nos informação relativa à resistência ao corte das descontinuidades e do maciço, mediante a razão do índice de rugosidade pelo índice de alteração das descontinuidades. Quanto maiores e mais frescas forem as descontinuidades e mais rugosidades possuírem, maior será este índice (Hoek, 2000);
- $J_w/SFR$  – Este quociente fornece-nos um factor empírico representativo da “tensão activa”

FACTOR DE N° DE DESCONTINUIDADE		J <sub>n</sub>	
A. Rocha maciça ou com apenas algumas fracturas dispersas .....		0,5 - 1,0	
B. Uma família de descontinuidades .....		2	
C. Uma família de descontinuidades mais algumas fracturas dispersas .....		3	
D. Duas famílias de descontinuidades .....		4	
E. Duas famílias de descontinuidades mais algumas fracturas dispersas .....		6	
F. Três famílias de descontinuidades .....		9	
G. Três famílias de descontinuidades mais algumas fracturas dispersas .....		12	
H. Quatro ou mais famílias de descontinuidades dispersas, muito próximas, .....		15	
I. Rocha decomposta, com comportamento de solo.....		20	
OBS. (1) No caso de intersecções de fracturas usar 3xJ <sub>n</sub> ; (2) No caso dos emboquilhamentos usar 2xJ <sub>n</sub>			
FACTOR DE RUGOSIDADE DAS DESCONTINUIDADES		J <sub>r</sub>	
(a) <i>Contacto entre as paredes da descontinuidade e</i>			
(b) <i>Contacto entre as paredes da descontinuidade com deslocamento relativo &lt; 10 cm</i>			
A. Juntas descontinuas .....		4	
B. Rugosas ou irregulares, ondulantes .....		3	
C. Pouco rugosas, ondulantes .....		2	
D. Polidas, ondulantes .....		1,5	
E. Rugosas ou irregulares, planas .....		1,5	
F. Pouco rugosas, planas .....		1,0	
G. Polidas, planas .....		0,5	
(c) <i>Falta de contacto entre as paredes da descontinuidade, após deslocamento relativo</i>			
H. Zona com minerais argilosos suficientemente espessa para impedir contacto entre as paredes da descontinuidade .....		1,0	
I. Zona com areia, cascalho ou material fragmentado, suficientemente espessa para impedir o contacto entre as paredes das descontinuidades .....		1,0	
OBS. (1) As descrições referem-se a características de pequena escala e escala intermédia, por essa ordem; (A a G); (2) Acrescentar 1,0 se o espaçamento médio da família da descontinuidade em causa for superior a 3 m; (3) J <sub>r</sub> = 0,5 pode utilizar-se para descontinuidades planas e polidas, com lineações, desde que estas estejam orientadas para resistência mínima.			
FACTOR DE ALTERAÇÃO DA DESCONTINUIDADE		J <sub>a</sub>	φ <sub>r</sub>
(a) <i>Contacto entre as paredes das descontinuidades</i>			
A. Paredes duras, compactas, preenchimentos impermeáveis (quartzo ou epidoto) ...	0,75		(-)
B. Paredes sem alteração, somente ligeira coloração .....	1		25-35°
C. Paredes ligeiramente alteradas, com partículas arenosas e de rochas desintegradas sem argila .....	2		25-30°
D. Paredes com películas siltosas ou areno-argilosas e pequena quantidade de argila	3		20-25°
E. Paredes com películas de materiais moles ou de pequeno ângulo de atrito (caolite ou mica). Também clorite, talco, gesso, grafite, e pequenas quantidades de argilas expansivas .....	4		8-16°
(b) <i>Contacto entre as paredes das descontinuidades com deslocamento relativo &lt; 10 cm</i>			
F. Paredes com partículas de areia, rocha desintegrada sem argila .....	4		25-30°
G. Fracturas com preenchimento argiloso muito sobreconsolidado (contínuo, espessura < 5mm) .....	6		16-24°
H. Fracturas com preenchimento argiloso com média a baixa sobreconsolidação (contínuo, espessura < 5 mm) .....	8		12-16°

Tabela 9 - Parâmetros do sistema Q da classificação de Barton (adaptado de Barton et al, 1982).

A. Fracturas com preenchimento argiloso expansivo, por exemplo, montmorilonite (contínuo, espessura <5mm). O valor de $J_a$ depende da percentagem de argila expansiva, do acesso à água, etc..... (c) Não há contacto entre as paredes das descontinuidades, com deslocamento relativo	8-12	6-12°
K,L,M. Zonas ou faixas com rocha desintegrada ou fracturada e argila (ver G, H, J para condições do material argiloso) .....	6, 8 ou 8-12	6-24°
N. Zonas ou faixas siltosas ou areno-argilosas com pequenas quantidades de argila	5	(-)
O, P, R. Zonas ou faixas espessas e contínuas de argila (ver G, H, J para condições do material argiloso) .....	10, 13 ou 13-20	6-24°
<b>FACTOR DE REDUÇÃO HIDRÁULICA</b>	<b><math>J_w</math></b>	<b><math>P_w</math> (MPa)</b>
A. Escavações a seco, ou mínimas aflúencias de água, isto é, < 5 l/min, localmente	1	<0,1
B. Aflúencias ou pressões médias, lavagem dos preenchimentos, ocasionalmente ..	0,66	0,1-0,25
C. Aflúencias elevadas ou pressões elevadas em rocha competente com fracturas sem preenchimentos .....	0,5	0,25-1
D. Aflúencias elevadas ou pressões elevadas com lavagens consideráveis dos preenchimentos .....	0,33	0,25-1
E. Aflúencias excepcionalmente elevadas ou pressões de água "explosivas", decaindo com o tempo .....	0,2-0,1	>1
F. Aflúencias excepcionalmente elevadas ou pressões de água "explosivas", contínuas sem diminuição com o tempo .....	0,1-0,05	>1
OBS. (1) Os valores de C a F são estimativas grosseiras. Se forem instaladas medidas de drenagem, aumentar $J_w$ ; (2) Não foram considerados problemas específicos causados pela formação de gelo.		
<b>FACTOR SFR (Stress Reduction Factor)</b>	<b>SFR</b>	
(a) Zonas fracas intersectadas pela escavação que poderão causar perda de maciço rochoso quando o túnel for escavado		
A. Ocorrência de múltiplas zonas fracas, contendo argila ou rocha decomposta (quimicamente); rocha envolvente muito solta (qualquer profundidade) .....	10	
B. Zona fraca única contendo argila ou rocha decomposta quimicamente (profundidade de escavação ≤50m) .....	5	
C. Zona fraca única contendo argila ou rocha decomposta quimicamente (profundidade de escavação >50m) .....	2,5	
D. Zonas de corte múltiplo em rocha competente (sem argila), rocha envolvente solta (qualquer profundidade) .....	7,5	
E. Zona de corte única em rocha competente e sem argila (profundidade de escavação ≤ 50 m) .....	5	
F. Zona de corte única em rocha competente e sem argila (profundidade de escavação > 50 m) .....	2,5	
G. Fracturas abertas, muito próximas, tipo "cubo de açúcar" (qualquer profundidade) .....	5	
(b) Rocha competente, problemas de tensão		
H. Baixa tensão; próximo da superfície ( $\sigma_2/\sigma_1 > 200$ e $\sigma_3/\sigma_1 > 13$ ) .....	2,5	
I. Tensão média ( $10 < \sigma_2/\sigma_1 < 200$ ; $0,66 < \sigma_3/\sigma_1 < 13$ ) .....	1	
J. Tensão elevada, estrutura muito compacta, usualmente favorável à estabilidade, poderá ser desfavorável à estabilidade das paredes ( $5 < \sigma_2/\sigma_1 < 10$ ; $0,33 < \sigma_3/\sigma_1 < 0,33$ ) .....	0,5-2	
K. "Golpe de terreno" suave ( $2,5 < \sigma_2/\sigma_1 < 5$ ; $0,16 < \sigma_3/\sigma_1 < 0,33$ ) .....	5-10	
L. "Golpe de terreno" ( $\sigma_2/\sigma_1 < 2,5$ e $\sigma_3/\sigma_1 < 0,16$ ) .....	10-20	
(c) Rocha compressível; fluência plástica de rocha branda sob influência de elevada pressão rochosa		
M. Pressão rochosa média de compressibilidade .....	5-10	
N. Pressão rochosa elevada de compressibilidade .....	10-20	
(d) Rocha expansiva, dependente da presença de água		
O. Pressão rochosa média de expansibilidade .....	5-10	
P. Pressão rochosa elevada de expansibilidade .....	10-15	

Tabela 10 - Parâmetros do sistema Q da classificação de Barton (adaptado de Barton et al, 1982).

FACTOR ESR - Excavation Support Ratio	ESR
A. Aberturas mineiras temporárias .....	ca.3-5
B. Poços de minas	
1. com secção circular .....	ca.2,5
2. com secção quadrada ou rectangular .....	ca.2,0
C. Aberturas mineiras permanentes; túneis hidráulicos para centrais hidroeléctricas (excluindo comportas de alta pressão); túneis piloto, galerias para grandes escavações, etc.....	1,6
D. Câmaras de armazenamento, estações de tratamento de água, estradas menores e túneis ferroviários (cavernas hemisféricas) .....	1,3
E. Estações eléctricas, túneis maiores para estradas e ferrovias, câmaras de protecção civil, etc.....	1
F. Estações nucleares subterráneas, estações ferroviárias, fábricas, etc.....	ca.0.8

Tabela 11 - Parâmetros do sistema Q da classificação de Barton (adaptado de Barton et al, 1982).







## **3 Escavação e suporte em Obras subterrâneas**

### **3.1 Introdução**

Tanto a escavação de maciços rochosos como a colocação de suporte são actividades de grande complexidade e de enormes repercussões na qualidade final e eficiência da construção de um túnel.

O método de escavação, equipamento utilizado e velocidade dos avanços afectam todas as operações como remoção de escombros, dimensionamento e instalação de suportes primários e secundários, e instalação de equipamentos acessórios tais como a ventilação, rede eléctrica e iluminação, rede de esgoto, drenagem, e a análise das condições globais de segurança do túnel.

Os métodos de escavação, especialmente no que se refere ao seu faseamento e velocidade de avanço encontram-se ligados aos sistemas e tipos de suporte que são especificamente dimensionados para determinada obra, existindo no entanto uma certa reciprocidade no sentido inverso (Bastos, 1998)

Assim, após a fase de rigoroso zonamento geotécnico, mediante as classificações geomecânicas aplicadas, torna-se possível prever diversas condições como o avanço e vão máximo que é escavável, o tempo máximo que o terreno permite entre a escavação e a colocação do sustimento provisório sem colapso da escavação, assim como o dimensionamento do sustimento provisório a ser colocado.

Um claro exemplo de um método em que ocorre uma interacção entre a escavação e o suporte é o NATM (New Austrian Tunneling Method) que será descrito em maior pormenor no capítulo seguinte.

### 3.2 NATM - New Austrian Tunneling Method.

O NATM trata-se de um método de escavação apresentado em 1964 por Rabzewicz, e que assenta no princípio da utilização de todos os meios e tecnologias disponíveis para tirar o máximo proveito da capacidade de auto-suporte do maciço, à medida que ocorre o avanço da escavação, e a alteração do estado de tensão inicial deste. Assim, no NATM, considera-se que o maciço das paredes de um túnel encontra-se integrado no anel estrutural, passando elas próprias a fazer parte dessa estrutura de suporte.

O NATM apresenta as seguintes vantagens (Galiza et al. 2007/2008):

- Livre selecção da área de escavação;
- Boa adaptação às alterações geotécnicas do maciço rochoso;
- Flexibilidade para adaptação a diferentes secções de escavação;
- Equipamento de escavação simples e de fácil mobilização.

A evolução do método nos últimos anos tem permitido a sua adaptação a terrenos incoerentes e à construção de túneis em envolventes urbanas.

Segundo Melâneo (1994) o método observa alguns aspectos:

- O colapso não se produz imediatamente, o que significa que o terreno possui alguma resistência própria;
- Pausa da frente de escavação, o tempo necessário para colocação do sustimento mínimo que permita continuar o avanço com segurança;
- As operações de sustimento imediato da frente deverão ser de rápida execução;
- O reforço do sustimento decorre em simultâneo com o avanço da frente;
- Através da necessária observação do comportamento real do terreno e do efeito das sucessivas etapas de reforço do sustimento, é possível ajustar o modelo de análise e o sustimento usado, com conseqüente economia.

O NATM apresenta uma caixa de ferramentas que permite que qualquer tipo de condição do solo seja trabalhado em segurança. A tabela seguinte mostra as várias possibilidades de solução que o NATM apresenta.

<b>Geometria e Avanço</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Podem variar de secção plena à subdivisão da face de escavação em tecto ou em coroa, bancada, galeria lateral, galerias múltiplas, etc.</li> <li>• A redução do avanço da escavação, ou, se necessário, escavação e suporte contínuo em solos extremamente moles.</li> <li>• Geometria e avanço podem ser adaptados na medida do necessário.</li> </ul>
<b>Pré –Suporte</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Drenagem da área de escavação.</li> <li>• Enfilagens com vários tipos de elementos. O método de enfilagem contínuo no contorno da escavação é provavelmente o mais eficaz actualmente, para pré-suporte em trechos longos.</li> <li>• Jet Grouting horizontal também melhora o solo na frente da escavação.</li> <li>• Injecções convencionais no maciço circundante do túnel.</li> </ul>
<b>Suporte da Frente</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Estabilizar a frente com escombros (núcleo de apoio).</li> <li>• Estabilizar a frente com betão projectado.</li> <li>• Contenção com ancoragens cimentadas ou barras metálicas.</li> <li>• Contenção com chapas metálicas.</li> <li>• Aplicar injecções na frente da escavação.</li> <li>• Escavar em diferentes fases de acordo com a dimensão da secção e a natureza do terreno.</li> </ul>
<b>Estabilidade Periférica</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Suporte em todo o contorno anelar da escavação.</li> <li>• Aumentar a espessura do betão projectado.</li> <li>• Aumentar o número de ancoragens e o seu comprimento.</li> <li>• Reforçar temporariamente a soleira com betão projectado.</li> <li>• Reforçar a fundação da soleira com injecções de cimento e ancoragens cimentadas.</li> <li>• Aplicar injecções em toda a periferia da escavação.</li> </ul>
<b>Métodos Especiais</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Congelamento do solo.</li> <li>• Pressurização com ar comprimido.</li> <li>• Enfilagem contínua.</li> <li>• Túnel invertido</li> </ul>
<b>Intervenções de Emergência</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Instalação de vigas metálicas ou de madeira para suporte.</li> <li>• Colocação de enchimento com agregados triturados.</li> <li>• Aplicação de sacos com mistura seca de betão projectado.</li> </ul>

**Tabela 12 - Caixa de ferramentas do NATM (adaptado de Galiza et al. 2007/2008).**

### 3.3 Escavabilidade do maciço

A escavação de um maciço depende primariamente de duas características fundamentais (Bastos, 1998):

- Capacidade de resistência da rocha;
- Características de fracturação do maciço.

Estas duas características encontram-se assim reflectidas e incorporam diversos factores já mencionados anteriormente como resistência à compressão uniaxial, resistência à tracção, número de Schmidt, velocidade das ondas sísmicas, dureza, grau de alteração, grau de abrasividade, espaçamento entre diáclases, RQD (Rock Quality Designation), RMR (Rock Mass Rating), Q de Barton, continuidade, orientação e preenchimento de diaclases. A medição e quantificação destes factores fornecem indicadores sobre os métodos de escavação a empregar.

### 3.4 Escavação de terrenos em face parcial

Quando se executa uma escavação de um túnel em rocha branda a importância maior recai, não sobre os métodos de desmonte, que serão desenvolvidos no capítulo 3.5, mas na secção do túnel a escavar, e no sustimento provisório a utilizar.

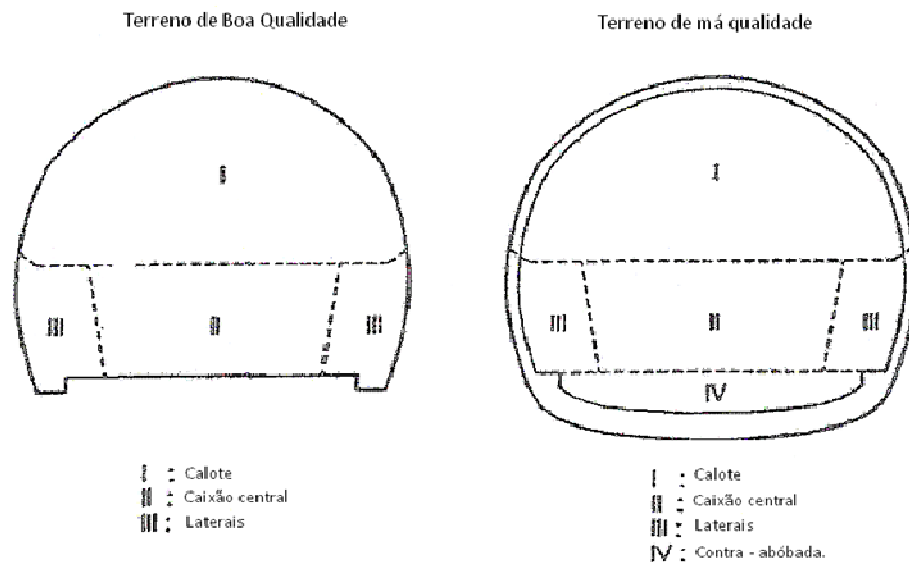
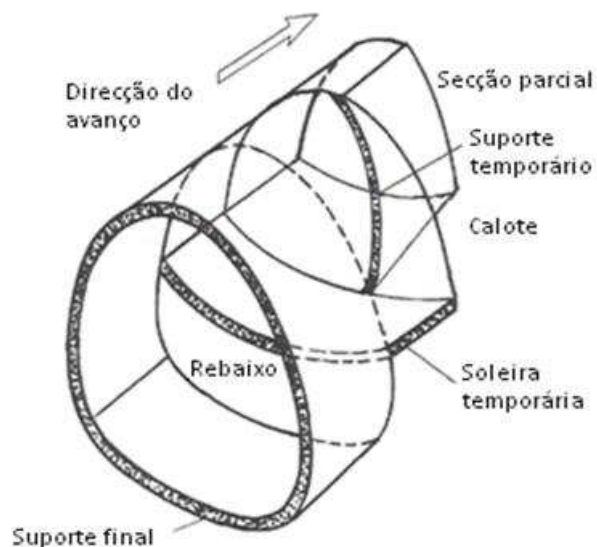


Figura 21 - Escavação por fases (adaptado de Galiza, L. Gomes, Vieira 2007/2008).

Isto ocorre porque em maciços de fraca qualidade a estabilidade depende sobretudo da área de maciço exposta e, conseqüentemente, a técnica mais utilizada hoje em dia para manter a estabilidade do túnel é a escavação parcial da face, na qual o túnel é escavado em fases de modo a que cada uma das diferentes fases tenha um tamanho adequado que permita o controlo (Hoek, 1999).



**Figura 22 - Avanço da escavação por fases (adaptado de Hoek 1999).**

O método consiste na escavação de uma secção lateral do túnel (“side drift” ) e na colocação imediata do suporte final nesta secção tais como perfis metálicos embebidos em betão projectado no hasteal definitivo, e perfis provisórios no hasteal provisório. A escavação da secção lateral é seguida pela abertura da calote até à sua máxima área de secção, o que compreende a destruição do hasteal provisório. Entre as diferentes fases de escavação deve ser deixado um espaço de alguns metros uma vez que uma das secções se encontra sem suporte durante o processo de escavação.

A escavação do rebaixo de modo a obter a área completa de túnel deve também ser efectuada no espaço de alguns metros relativamente à calote. A remoção da bancada deixa o suporte instalado na abóbada de certo modo “suspenso” até que os perfis metálicos para os hasteais e a soleira final sejam colocados, pelo que é recomendável a divisão do rebaixo num caixão central e duas bancadas laterais que forneçam suporte adicional a um dos hasteais enquanto é colocado o perfil metálico no hasteal oposto.

Assim, este tipo de desmonte minora a instabilidade das frentes, dos tectos e dos hasteais, e reduz as convergências no túnel.

### 3.5 Métodos de escavação

De acordo com os diversos condicionalismos do local, é possível então a escolha de um método de escavação que de modo geral pode ser de dois tipos:

- Escavação com explosivos;
- Escavação por meios mecânicos.

Os condicionalismos que afectam genericamente esta escolha são:

- Os maciços a escavar (escavabilidade, litologia, geomecânica ...);
- Factores ambientais;
- Factores económicos;
- A envolvente urbana do local de implantação da obra, sensibilidade e proximidade das estruturas superficiais;
- A geometria do túnel.



Figura 23 - Roçadora de braço (adaptado de Bastos, 1998).

Relativamente à sua escavação, o quadro seguinte pretende apresentar de forma simplificada, as diferentes categorias de maciços passíveis de encontrar e a sua relação com os métodos de escavação e capacidade de auto-sustentação.

<b>Categoria</b>	<b>Descrição</b>	<b>Tipo de terreno</b>
<b>1ª Categoria</b>	Maciço rochoso exigindo o recurso a explosivos ou a escavação mecânica com equipamento pesado. (TBM).	Nesta categoria incluímos os terrenos que permitem o avanço sem sustimento e os maciços rochosos diaclasados exigindo sustimento provisório mais ou menos imediato.
<b>2ª Categoria</b>	Bom terreno dispensando o uso de explosivos que permite o avanço de uma galeria de secção adequada com 1 a 3 metros sem sustimento.	Nesta categoria podemos incluir as argilas duras, arenitos, areias e gravilhas aglomeradas com bom cimento (pudins).
<b>3ª Categoria</b>	Terreno medíocre em que o tecto de uma galeria de secção adequada pode manter-se durante um tempo muito curto (alguns minutos) sem suporte e os paramentos laterais e a frente de ataque pouco mais do que uma hora.	Estão neste caso as areias consistentes, areias e gravilhas aglomeradas.
<b>4ª Categoria</b>	Terreno mau. O tecto da galeria deve suster-se imediatamente à medida que se avança. Os paramentos laterais mantêm-se estáveis apenas durante alguns minutos.	É o caso de argilas brandas que se expandem em contacto com o ar, areias húmidas, terras vegetais sem grande coesão e rochas decompostas.
<b>5ª Categoria</b>	Terrenos soltos com areia e gravilha em que não se pode progredir mesmo em pequena secção, senão ao abrigo de blindagem contínua (escudete) tanto na frente como na coroa e paramentos laterais.	Quando se trata de argila branda e há abundância de água, impõe-se o recurso a técnicas especiais (escudetes pressurizados, injeções e congelação).

**Tabela 13 - Classificação expedita de solos (Galiza et al. 2007/2008).**

### **3.6 Escavação mecânica**

O desmonte por meios mecânicos serve-se de tecnologia de grande complexidade e técnicas que variam entre si tanto em modo de emprego como no campo de aplicação.

Assim, e se estamos a falar de uma escavação em secção plena a TBM (*Tunnel Boring Machine*) surge como a opção mais utilizada, enquanto que no caso de uma escavação em secção parcial como a que está a ser estudada neste documento, recorre-se sobretudo a máquinas de ataque pontual, martelos hidráulicos e retro escavadoras. Vamos por isso centrar a nossa atenção nestes últimos.

### 3.6.1 Escavação com retro - escavadora

É habitual a utilização de equipamento retroescavador, em abertura de galerias em terrenos cujas características permitem tal uso.

As dimensões do equipamento têm que ser compatíveis com a secção transversal da dita galeria e constituir um componente equilibrado do binário de escavação-transporte.

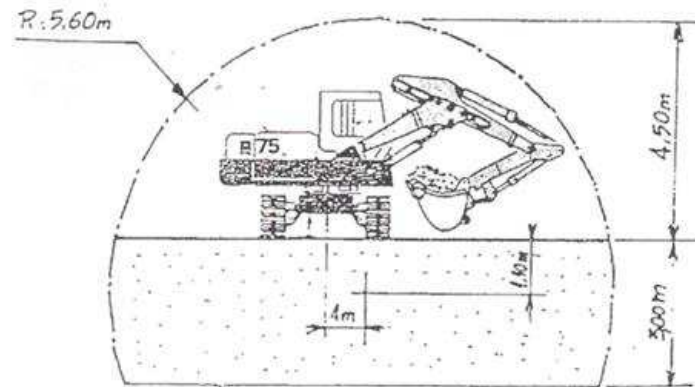


Figura 24 - Gabarito para carga com retroescavadora (adaptado de Galiza et al. 2003/2007).

Em galeria de maior secção em que o avanço é realizado por desmonte parcial de avanço na coroa seguido de desmonte em bancada, o uso de retro escavadora de rotação total, permite um carregamento à retaguarda, do equipamento de transporte auto motor.

No caso de terrenos em que o emprego de balde retro não assegura bom rendimento, este é substituído alternadamente por um martelo hidráulico demolidor para as zonas de maior resistência como se poderá ver no próximo capítulo.

### 3.6.2 Escavação com recurso a martelo hidráulico

A escavação do maciço rochoso com recurso a martelo hidráulico é um método mais económico, se utilizado em maciços cuja alteração e fracturação tornem o uso de explosivos e o seu consequente controlo difíceis de executar, uma vez que implica um menor número de mão-de-obra especializada assim como menor número de operações num ciclo de trabalho.

As grandes vantagens deste método são:

- Pouca ou nenhuma sobre-escavação, evitando preenchimentos custosos;
- Mão-de-obra mais barata e menores custos de investimento;
- Melhores condições de segurança no local de obra;
- É um processo contínuo e ininterrupto.

A escavação de túneis com recurso a martelo é um dos mais difíceis trabalhos que este pode executar, uma vez que a força de contacto do martelo na posição horizontal é muito superior à que é usada por este equipamento na vertical, pelo que a prevenção e manutenção regular do equipamento é um factor de grande importância na produtividade deste.

### 3.6.2.1 Características do maciço e a sua influência

Relativamente à rocha a ser escavada pelo martelo, esta necessita de compreender um determinado número de características de modo a garantir que a taxa de produtividade da máquina seja razoavelmente elevada. Entre estas características encontram-se a natureza relativamente incoerente da rocha em si, a distância das discontinuidades que não deve ser superior a 30-50 cm, a rocha deve apresentar compacticidade razoável, mas ser branda o suficiente de forma a permitir uma produtividade razoável por penetração da ferramenta (Rock excavation handbook). Outras características incluem a abrasividade, dureza e resistência da rocha. No caso de se intersectar regiões do maciço de maior compacticidade, o uso de desmonte com explosivos pode ser necessário, sendo normalmente suficiente o desmonte da secção intermédia inferior da frente, onde é usual iniciar-se a escavação com o martelo, conseguindo-se assim uma optimização da escavação e a minimização de efeitos adversos do desmonte, tais como sobre - escavação.



Figura 25 - Início da escavação da calote.

### **3.6.2.2 Influência da área de escavação**

Na escavação com recurso a martelo, a área da secção a escavar é de grande importância, influenciando de forma definitiva o método de trabalho a ser utilizado.

Para áreas inferiores a 30 m<sup>2</sup> não é conveniente o uso do martelo hidráulico uma vez que uma giratória com capacidade de carregar um martelo de 2000 Kg terá dificuldade em caber no túnel.

Para túneis de 30 a 70 m<sup>2</sup> e de largura menor que 8 metros é normalmente utilizada a combinação de uma carregadora e um martelo.

Para túneis de área superior a 70 m<sup>2</sup> é possível a escavação simultaneamente com a remoção o que resulta em menos fases de operações num ciclo de trabalho.

Em túneis de altura maior que 7 metros, o braço que suporta o martelo pode não ter extensão suficiente para atingir estas alturas pelo que a escavação tem então que ser executada por fases.

Importa ainda dizer que para casos de túneis longos, é vantajoso o início da escavação de ambos os lados do túnel de forma a cumprir com prazos apertados.

### **3.6.3 Escavação com recurso a ataque pontual**

Trata-se de equipamentos dotados de uma cabeça rotativa montada num braço telescópico hidráulico, equipada com ferramentas (picas) de corte em metal duro. A remoção de material é garantida mediante um sistema de carga e transporte até à retaguarda da máquina.

Estas máquinas possuem as seguintes vantagens relativamente às tuneladoras:

- Flexibilidade e manobrabilidade – Podem efectuar diferentes secções com alterações de traçado e galerias transversais à principal;
- Não necessitam de grandes espaços de montagem ou desmontagem;
- São mais acessíveis para manutenção na frente da escavação;
- Têm menor custo de investimento;
- A frente ventila-se com maior facilidade.

Relativamente à utilização de explosivos apresentam as seguintes vantagens:

- Maior mecanização;
- Perfil de escavação de acordo com o projecto;
- Menor perturbação da rocha dos hasteais;
- Ausência de vibrações provocadas pelo rebentamento de explosivos;
- Menor necessidade de sustimento;
- Maior adaptação à construção por fases.

O uso de máquinas de ataque pontual tem contudo limitações, tais como:

- É apenas possível a sua utilização em rochas médias e brandas;
- O rendimento obtido é inferior ao dos restantes métodos;
- É utilizável em obras de pequena extensão.

As características fundamentais deste tipo de máquinas são:

- Potência do motor de rotação da cabeça;
- O peso da máquina contrariando a reacção do terreno.

Fundamentalmente iguais, apresentam-se com dois sistemas de corte, um axial e um frontal como se pode ver na Tabela 14.

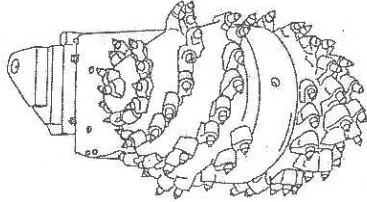
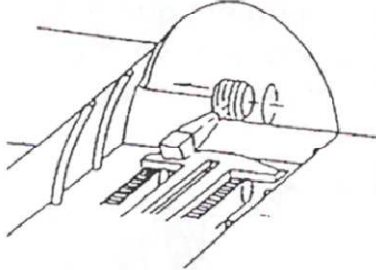
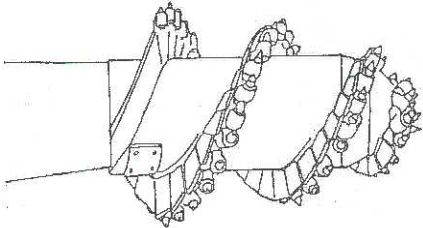
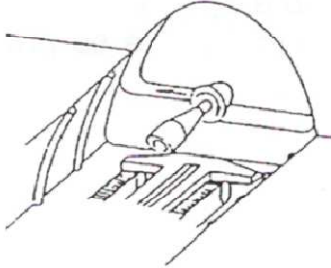
Tipo de ataque	Cabeça de corte	Características do método	Modo de escavação
<b>Ataque frontal</b>		<p>Neste sistema:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• A cabeça de corte gira em torno de um eixo perpendicular ao eixo do braço de suporte.</li> <li>• A reacção do terreno à penetração é vencida mediante todo peso da máquina o que permite que o rendimento de escavação aumenta e possibilite a escavação de rochas duras.</li> <li>• As picas nas cabeças frontais têm uma trajectória helicoidal o que origina uma trajectória de corte tridimensional.</li> </ul>	
<b>Ataque lateral</b>		<p>Neste sistema:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• A cabeça do corte cilíndrica ou tronco cônica gira em torno de um eixo coaxial com o eixo do braço.</li> <li>• A força de corte é aplicada lateralmente não se podendo aproveitar todo o peso da máquina como reacção.</li> <li>• Permite em trabalhos mineiros, com uma cabeça de dimensões mais reduzidas, o ataque de camadas pouco possantes, sem o desmonte da rocha encaixante</li> </ul>	

Tabela 14 - Diferentes tipos de cabeça de ataque pontual e seu método de aplicação (adaptado de Galiza et al. 2007/2008).

Ambos os sistemas têm aplicações específicas, porém existem no mercado máquinas que permitem a aplicação dos dois sistemas pela simples troca das cabeças.

### 3.6.3.1 Comparação entre as cabeças de corte frontal e lateral

Apesar da dificuldade de definir qual a melhor cabeça para os diferentes tipos de trabalho, a comparação entre cabeças frontais e laterais pode realizar-se atendendo aos seguintes aspectos:

- Estabilidade da máquina;
- Produtividade;
- Perfil de escavação.

### 3.6.3.2 Estabilidade de máquinas

As diferenças entre máquinas a nível de estabilidade encontram-se expostas no seguinte quadro:

Cabeça frontal	Cabeça lateral
Nas cabeças frontais tanto durante a penetração da cabeça como no deslocamento lateral para corte da rocha, a principal força de corte actua no plano vertical que passa pelo eixo da máquina e a força lateral sobre esse plano é muito pequena.	Nas cabeças laterais ocorre o contrário uma vez que as forças de corte são predominantemente perpendiculares à direcção de avanço da máquina. A força de deslocamento da cabeça é consideravelmente elevada enquanto a penetração é mais fácil que nas camadas frontais.
As cabeças frontais criam somente duas novas superfícies de arranque.	As cabeças laterais, no seu avanço vão criando 3 novas superfícies de arranque.
Com a cabeça frontal, como não existe deslocação lateral para realizar o corte, a reacção necessária que tende a levantar a máquina, equilibra-se com o peso próprio.	Nas máquinas de cabeça de ataque lateral as forças de corte requerem uma reacção da máquina normalmente executada pelas lagartas de apoio. Quando estas não são suficientes é necessário utilizar apoios com sistemas hidráulicos quer na soleira quer nos hasteais.
As máquinas de cabeça frontal necessitam de cerca de menos 20% de peso que as máquinas de ataque lateral.	As máquinas de cabeça lateral necessitam de cerca de mais 20% de peso que as máquinas de ataque frontal.
As máquinas de cabeça de ataque frontal possuem melhor estabilidade.	A menor estabilidade pode ser compensada nas máquinas de ataque lateral pelo uso de apoios hidráulicos nos hasteais.

**Tabela 15 Diferenças a nível de estabilidade das cabeças de corte pontual adaptado de Galiza, L. Gomes, Vieira 2007/2008).**

### 3.6.3.3 Rendimento da máquina

Em termos de rendimento no entanto, a referida utilização de apoios hidráulicos nos hasteais para fixação da máquina de cabeça lateral, pode baixar para cerca de 25% devido ao tempo gasto em posicionamento, pelo que a produtividade é superior nas cabeças de ataque frontal, conseguindo ainda cortes mais profundos para o mesmo diâmetro, e conseguindo cortar em qualquer direcção aproveitando muito melhor as zonas débeis do maciço rochoso para realizar o arranque.

Na cabeça frontal, uma vez que a parte externa da cabeça possui maior diâmetro, a penetração é mais difícil, sendo por isso a tendência diminuir o avanço para facilitar o trabalho das picas. A redução da penetração pode no entanto aumentar as vibrações.

Em rochas duras é mais fácil adaptar a cabeça frontal, dado que a aplicação de forças é mais fácil na direcção do eixo da galeria.

Nas máquinas de ataque frontal as forças da máquina repartem-se por grande número de picas diminuindo a profundidade de corte e a produtividade com o aumento do desgaste das picas, devido á geometria da cabeça. Esta situação pode ser resolvida através da redução do número de picas na cabeça, sem prejudicar a interacção entre elas e utilizando uma velocidade periférica menor.

#### 3.6.3.4 Perfil de escavação

As cabeças frontais produzem maiores irregularidades e conseqüentemente maior sobre escavação pelo que as cabeças laterais são melhores neste ponto.

#### 3.6.3.5 Critérios de selecção de uma máquina

A carga de rotura à compressão da rocha está relacionada directamente com a potência da máquina.

A tabela seguinte relaciona estes valores.

RESISTÊNCIA DA ROCHA		POTÊNCIA DA CABEÇA
Rc (kg/cm <sup>2</sup> )	Mpa	Corte (Kw)
200	20	30
300	30	50
400	40	70
500	50	90
600	60	103
700	70	116
800	80	130
900	90	165
1.000	100	200
1.200	120	300

Figura 26 - Relação entre a resistência da rocha e a potência da cabeça. (adaptado de Galiza et al. 2007/2008).

A resistência é dada pela seguinte fórmula:

$$\text{Log } R_c = 0,00014 y R + 3,316 \quad [12]$$

Y – Peso específico em libras/pés cúbicos

R – Média dos valores obtidos nos ensaios com o martelo Schmidt

R<sub>c</sub> – Resistência á compressão simples

#### **3.6.3.5.1 Características geométricas**

O perfil transversal do túnel determina a dimensão da máquina possível de ser utilizada.

Se a escavação se faz por secção inteira, a altura máxima de escavação deve ser superior à altura do túnel.

#### **3.6.3.5.2 Características geomecânicas**

Haverá que ter em conta a variabilidade das características geomecânicas do terreno.

A máquina deve ser escolhida de modo a adaptar-se ao tipo de formação mais representativa do traçado.

Para a estimativa de potência mínima a instalar na cabeça pode usar-se a fórmula [13]:

$$POT (Kw) = 0,87 R_c^{1,18} (MPa) \quad [13]$$

R<sub>c</sub> – Resistência à compressão simples

É usual também que entre a potência de corte da cabeça (KW) e o peso da máquina (toneladas) exista uma relação entre 2 e 4.

#### **3.6.3.5.3 Inclinação do trabalho**

Cada máquina tem uma pendente máxima do terreno, acima da qual não funciona em boas condições.

#### 3.6.3.5.4 Pressão sobre o solo

Em alguns casos de maus terrenos e presença de muita água, a pressão transmitida ao solo pelo peso da máquina poderá pôr em causa a sua eficiência atendendo à perda da estabilidade, impedito assim a transmissão de energia.

#### 3.6.3.5.5 Rendimento de Escavação

O rendimento instantâneo depende de dois tipos de parâmetros.

Relativos à máquina:

- Peso da máquina;
- Potência da cabeça;
- Coeficiente característico do desenho da cabeça.

Relativos à rocha:

- Resistência à compressão simples;
- Resistência à tracção;
- Coeficiente de desgaste.

Existem diferentes métodos para a determinação do rendimento de uma máquina de ataque pontual.

Para além da utilização de ábacos e gráficos, alguns investigadores desenvolveram fórmulas que nos permitem, conhecendo as características da rocha e da máquina, estimar os rendimentos a obter em determinada operação.

Importa relembrar, que pelo facto do maciço rochoso não ser um meio isotrópico, a determinação do rendimento deve obter-se pela média dos rendimentos em cada secção de características de execução semelhantes.

#### 3.6.3.5.6 Método de Bilgin (1998). Universidade Técnica de Istambul

O primeiro passo deste método consiste na determinação do índice de “cortabilidade” – Rock Mass Cuttability Index RMCI (Kg/cm<sup>2</sup>) a partir da resistência à compressão da rocha e do RQD:

$$RMCI = RC (Mpa). (RQD)^{2/3} / 100 \quad [14]$$

De seguida calcula-se o rendimento de corte instantâneo:

$$ICR = 0,34 \cdot HP \cdot (0,976)^{RMCI}. \quad [15]$$

IRC – Rendimento de corte instantâneo (m<sup>3</sup>/hora)

HP - Potência da máquina (KW)

### 3.6.3.5.7 Rendimento Real

O rendimento real será calculado mediante a expressão:

$$Rr = CE \cdot CD(1 - C1)nRI \quad [16]$$

Rr – Rendimento da escavação por dia em m<sup>3</sup>;

CE – Coeficiente de eficiência (ver Tabela 16);

CD – Coeficiente relativo a tempo disponível para desmonte efectivo (ver Tabela 17);

RI – Rendimento instantâneo;

n – Número de horas de trabalho por ida;

C1 – Coeficiente de tempos mortos (0,1 a 0,2).

Grau	Condições de trabalho	Coeficiente de eficiência
1	Boas condições. Pouca produção de pó	1
2	Soleira em más condições. Pouco pó	0,86
3	Muito pó, por vezes é necessário interromper o trabalho	0,69
4	Soleira em más condições. Muito pó	0,52

**Tabela 16 – Coeficiente de eficiência.**

CD	Condições de trabalho
10%	Condições péssimas
20%	Terrenos maus com várias fases de execução realizadas com a mesma roçadora, onde se coloca um sustimento sistemático importante
50%	Escavação em face inteira
85%	Condições óptimas de trabalho sem nenhum impedimento para o trabalho da máquina.(Situação irreal)

**Tabela 17 – Coeficiente de tempo disponível.**

### **3.6.4 Escavação mista**

No caso de maciços heterogêneos é ainda possível a utilização de métodos mistos, ou seja aplicação simultânea de explosivos e métodos mecânicos.

Neste caso, a abertura de uma caldeira mediante o uso de explosivos, de forma a criar-se uma pequena cavidade na rocha que facilite o posterior desmonte mecânico.

#### **3.6.4.1 Escavação com explosivos**

##### **3.6.4.1.1 Abertura de caldeiro**

Ao contrário do que sucede no desmonte da rocha com explosivos em bancada, na abertura de túneis e galerias não se possui uma frente livre para onde a rocha se possa movimentar aquando da detonação do explosivo, tornando-se por isso necessária a abertura de uma frente livre que cumpra com estes objectivos. É esta a função do designado caldeiro, que não é mais que um volume de vazio criado no maciço que funcionará como frente livre. A abertura deste caldeiro é por isso um dos pontos fulcrais nas escavações subterrâneas, pelo que terá de ser aberto mediante um inteligente aproveitamento dos explosivos e da sua capacidade de vencer as resistências do maciço.

A abertura do caldeiro pode ser executada de três formas, mediante o uso de furos paralelos, em V, ou em leque. Actualmente a técnica mais utilizada é a dos furos paralelos devido sobretudo aos equipamentos de perfuração disponíveis hoje em dia.

A abertura do caldeiro inicia-se pela execução de um furo largo (técnica *Large Hole Cut*, escolhida em detrimento da *burn cut* que representa menores avanços) que funcionará como vazio para onde o primeiro material rocha desmontado se movimentará. De seguida executam-se 4 furos rodeando o furo largo e que representarão geometricamente os vértices de um quadrado. Estes serão carregados com explosivo suficiente para desmontar a rocha e assim aumentar gradualmente o volume de vazio central, o que permitirá que cada vez maiores volumes de rocha sejam desmontados.

## 1º Quadrado

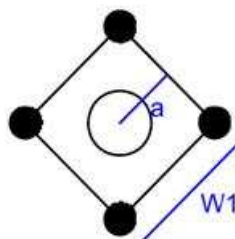


Figura 27 - Primeiro quadrado do caldeiro.

Um novo grupo de quatro furos é executado que não são mais que os vértices de um novo quadrado de comprimento de aresta superior ao anterior, sendo que cada um dos vértices ocupa uma posição central relativamente à aresta do quadrado precedente, o que permite o máximo volume de rocha desmontada aquando da detonação do furo.

## 2º Quadrado ( $B = W1$ )

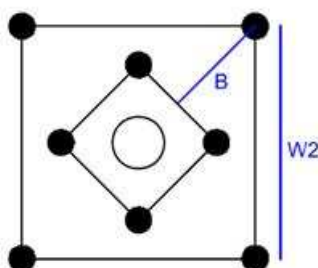


Figura 28 - Segundo quadrado do caldeiro.

A criação de novos quadrados continua, até se ter obtido um número suficiente que permita a criação de um volume de vazio, que possibilite a movimentação dos volumes de rocha desmontados pelos furos de alargamento. Assim, a determinação do número de quadrados a executar dependerá da distância à frente a ser calculada para os furos de alargamento.

As dimensões dos quadrados são calculadas em função do diâmetro ou diâmetros equivalentes do furo ou dos furos de grande diâmetro, e da frente livre criada pelo rebentamento dos tiros anteriores. Para o desenho do caldeiro importa que se atenda ao diâmetro do furo largo, à distância à frente livre e à concentração de carga.

### 3.6.4.1.2 Execução do furo largo

O furo largo é executado em duas fases. Primeiro é executado um furo de diâmetro menor utilizando bits com diâmetros regulares, e em seguida mediante um adaptador especial e um bit especial o furo é alargado para o diâmetro pretendido.

O diâmetro utilizado pode ser determinado mediante o gráfico seguinte:

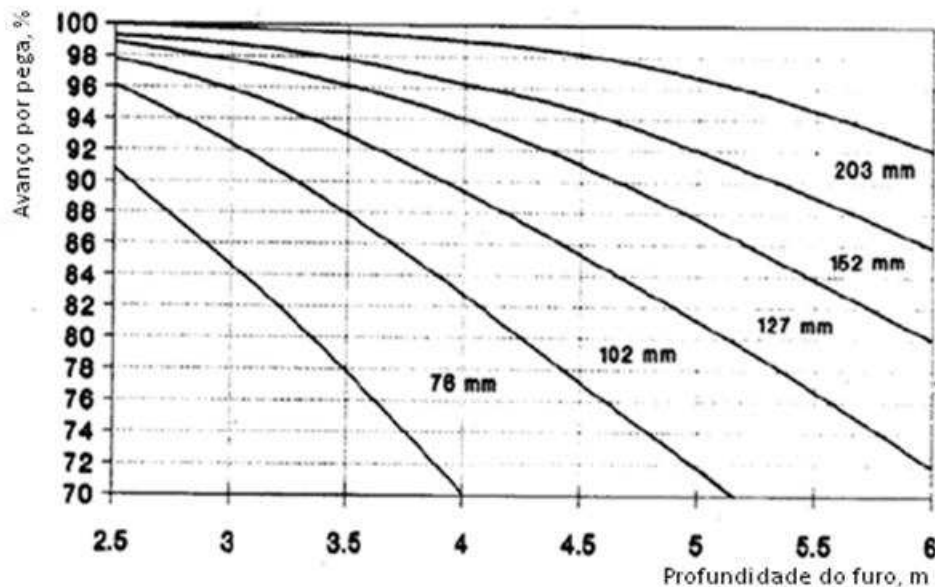


Figura 29 - Relação entre o avanço em % da perfuração e os diferentes diâmetros do furo não carregado (Adaptado de Galiza et. al 2007/2008).

### 3.6.4.1.3 O posicionamento do caldeiro

O caldeiro poderia ser colocado em qualquer posição do túnel, devendo na sua colocação ter-se o cuidado de escolher um local de rocha pouco fracturada. Porém, de forma a obter-se o máximo rendimento possível, um inteligente posicionamento do caldeiro é uma medida estratégica de fulcral importância que influi nas projecções de material, consumo de explosivos e no número de furos do diagrama final.

A melhor localização possível para o caldeiro será em posição central relativamente à secção do túnel de forma a obter-se uma mais conveniente distribuição do material desmontado, e o mais próximo possível da soleira, para que o volume de rocha a ser movimentada por meios mecânicos seja maior, poupando desta forma em explosivo e aproveitando da melhor forma as superfícies de fraqueza estrutural do maciço e a gravidade natural para o destaque da rocha.

### 3.6.4.1.4 Carga de explosivos

A carga deve ser calculada para o primeiro quadrado mediante a distância entre o furo carregado e o centro do furo largo segundo o gráfico da Figura 30.

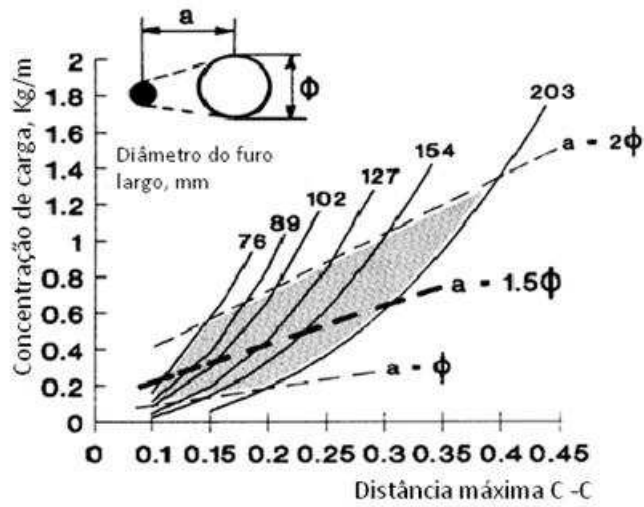


Figura 30 - Concentração de carga mínima (Kg/m) e máxima distância C-C para diferentes diâmetros do furo não carregado (adaptado de Galiza et. al 2007/2008).

A carga para os restantes furos é calculada mediante o seguinte gráfico da Figura 31.

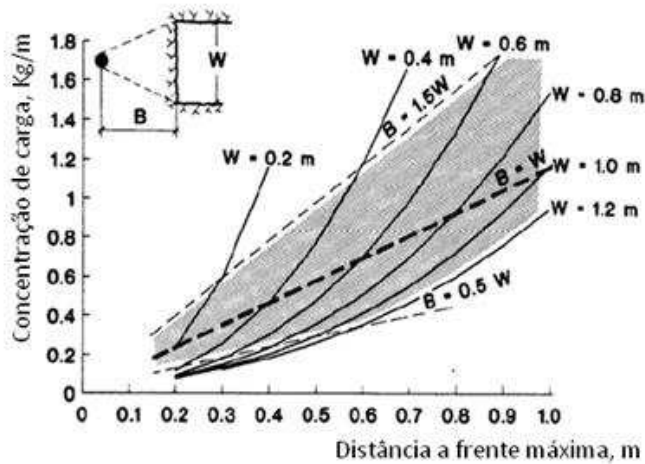


Figura 31 - Concentração de carga mínima (Kg/m) e máxima distância á frente para diferentes distâncias B (adaptado de Galiza et. al 2007/2008).

### 3.7 Sustimento em Maciços rochosos

Um maciço rochoso encontra-se no seu estado natural, em equilíbrio de tensões. Quando é escavada uma cavidade no maciço, ocorre o reequilibrar das tensões no mesmo e consequente movimentação e reposicionamento de porção de rocha de forma a atingir um novo estado de estabilidade.

Numa escavação subterrânea deve-se ter presente este conceito e dessa forma utilizar a rocha como principal material estrutural resistente, devendo-se por isso evitar o deteriorar do maciço no decorrer de uma escavação, de forma a minimizar-se o recurso a elementos artificiais de sustimento (Bastos 1998).

Segundo Hoek e Brown (1980), a maioria das rochas duras são bastante mais resistentes que o betão e algumas são mesmo tão resistentes como o aço, não fazendo por isso sentido a substituição de um determinado material, por outro que não lhe é superior.

Os principais factores de instabilidade que ocorrem numa escavação são (Hoek e Brown, 1980):

- Ocorrência de condições adversas em termos de geologia estrutural (falhas e descontinuidades), que podem formar blocos e cunhas;
- Ocorrência de excessivas tensões “in situ”, que geralmente sucedem em túneis a elevadas profundidades ou em grandes cavidades;
- Expansão ou decomposição da rocha por acção da água ou ar, que ocorre em maciços rochosos brandos e camadas e filões intercalados em rochas duras;
- Pressão hidráulica ou percolação de água, que ocorre em praticamente todos os maciços.

#### 3.7.1 Auto revestimento de um maciço

O auto revestimento não é mais do que a região que envolve uma dada escavação, encontrando-se por isso sujeita ao novo arranjo do campo de tensões resultantes da pressão gerada pelas forças actuantes do maciço.

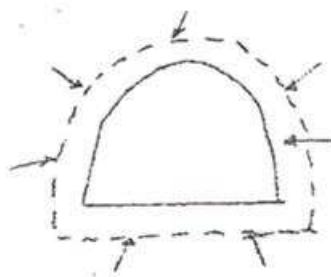


Figura 32 - Auto revestimento de uma escavação.

### 3.7.2 Efeito da tensão “in situ”

Sob efeito das tensões, e de acordo com as características mecânicas da rocha, teremos:




 <p>Elástico</p>	No comportamento elástico a zona de auto – revestimento da rocha deforma-se e volta sensivelmente á posição inicial.
 <p>Plástico</p>	A zona de auto-revestimento tende a mover-se para o interior da escavação, deformando-se sem se romper.
 <p>Ruptura</p>	A zona de auto-revestimento entra em fracturação, designando-se comportamento de ruptura.

Tabela 18 - Diferentes comportamentos de auto – revestimento.

### 3.7.3 Dimensionamento do suporte primário

O dimensionamento do suporte pode ser efectuado de diversas maneiras. Os métodos mais utilizados são métodos numéricos, análise de curvas de resposta do terreno e as classificações geomecânicas.

No seguimento do objectivo deste documento, será aqui tratado o ultimo método mencionado.

#### 3.7.3.1 Classificações geomecânicas

As classificações geomecânicas fornecem indicações e limites aceitáveis relativamente a soluções de sustimento.

As aplicações mais frequentes para este propósito, são actualmente as classificações de Barton e de Bieniawski, simplesmente porque são as que detêm maior experiência acumulada.

Proposta de sustimento segundo a classificação a classificação de Bieniawski (Tabela 19 )

Classe de Rocha	Escavação	Pregagens	Betão projectado	Cambotas metálicas
I	Secção completa 3 metros de avanço	Não há necessidade de qualquer tipo de sustimento à excepção de pregagens pontualmente		
II	Secção completa 1 a 1,5 metros de avanço Suporte completo a 20 metros da frente	Pregagens de 3 metros de comprimento pontualmente na coroa , espaçadas 2,5 metros ocasionalmente. Com malha.	50 mm na coroa onde requerido	nenhuma
III	Calote e rebaixo 1,5 a 3 metros de avanço na calote Sustimento após desmonte. Sustimento completo a 10 metros da frente de escavação.	Sistemáticas no tecto e hasteal. Comprimento de 4 metros. Espaçadas de 1,5 a 2 metros. Malha no tecto	50 a 100 mm na coroa e 30 mm nos hasteais	nenhuma
IV	Calote e rebaixo 1 a 1,5 metros de avanço na calote. Sustimento em simultâneo com a escavação até 10 metros da frente.	Sistemáticas no tecto e hasteal. Comprimento de 4 a 5 metros. Espaçadas de 1,0 a 1,5 metros. Com Malha.	100 - 150 mm na coroa e 100 mm nos hasteais.	Ligeiras a médias espaçadas 1,5 metros onde seja necessário.
V	Galerias múltiplas 0,5 a 1,5 metros em avanço Sustimento em simultâneo com a escavação. Betão projectado imediatamente após pega.	Sistemáticas no tecto e hasteal. Comprimento de 5 a 6 metros. Espaçadas de 1,0 a 1,5 metros. Malha no tecto	150 - 200 mm na coroa e 150 e 50 mm na frente.	Médias a pesadas espaçadas de 0,75 metros. Soleira em arco invertido

Tabela 19 - Proposta de sustimento, (adaptado de Bieniawski1973).

O gráfico da Figura 33 relaciona a qualidade da rocha com o período de estabilidade sem revestimento:

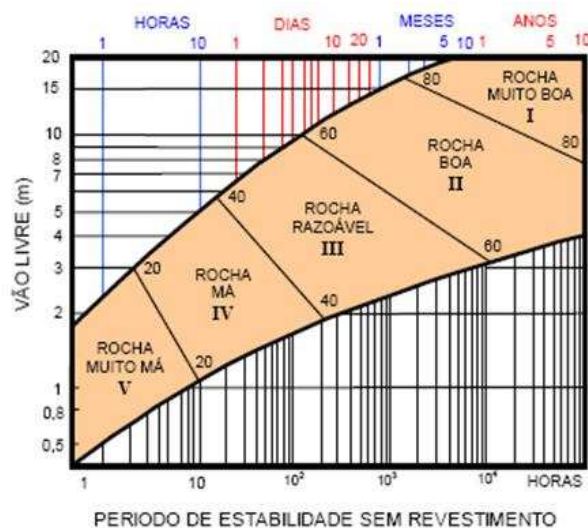


Figura 33 - Variação entre os vãos de cavidades sem suporte e os tempos de auto-sustentação para várias classes de maciço (adaptado de Bieniawski, 1973 in Dinis Gama, 1976).

A classificação Q de Barton fornece-nos por sua vez o gráfico da Figura 34 de correlações de grande utilidade para escolha de sustimento.

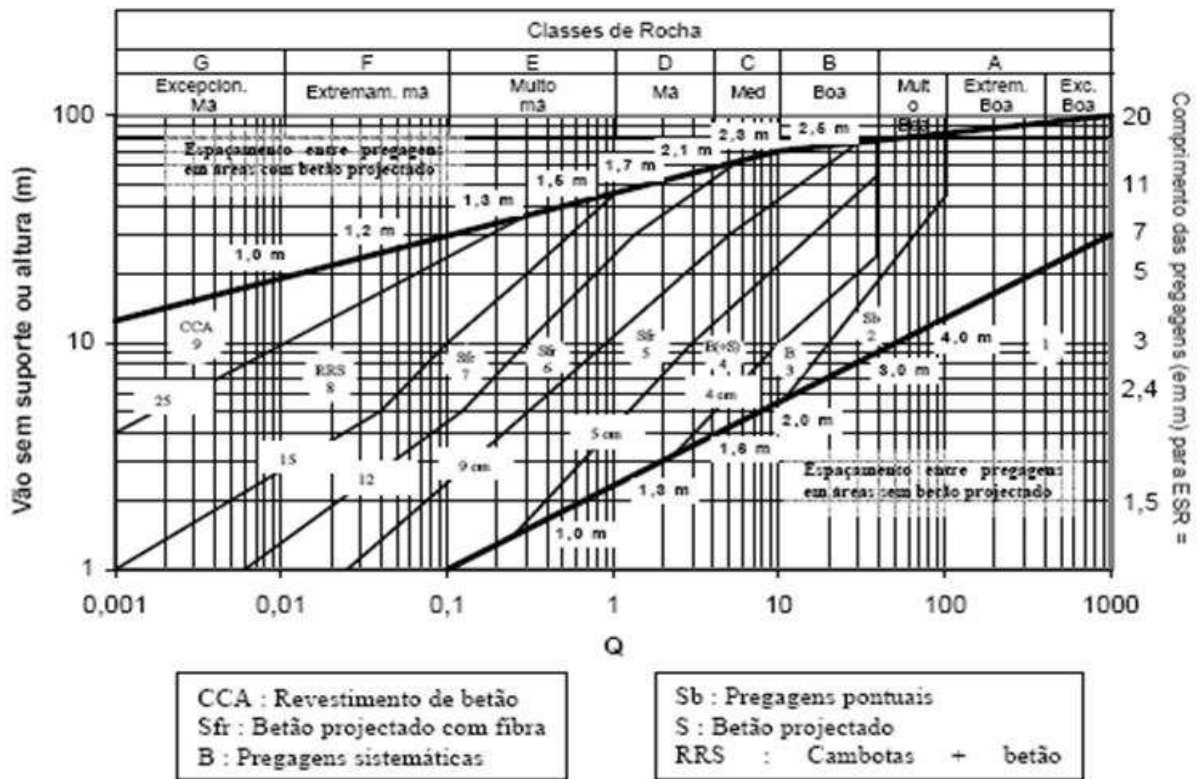


Figura 34 - Escolha do tipo de sustimento em função da classificação Q (adaptado de Barton, 1995).

### 3.7.4 Estabilização da escavação subterrânea em maciços brandos

Geralmente é importante, quando se fala de sustimento, distinguir três conceitos:

**Reforço do maciço rochoso** – Refere-se à instalação de sistemas que sejam capazes de reforçar o maciço rochoso, utilizando a própria resistência da rocha que o constitui.

**Suporte do maciço rochoso** – Trata-se do suporte secundário de um túnel. É de forma geral uma estrutura de betão ou aço envolvendo a cavidade do túnel, geralmente aplicados sobre o suporte primário, podendo no entanto também ser aplicado directamente em contacto com o terreno em caso de maciços autoportantes.

**Pré-suporte** – Trata-se da instalação de um reforço ao maciço de forma a aumentar a sua capacidade resistente previamente à escavação deste. São usualmente utilizados em maciço de rocha branda ou pouco coesiva. As técnicas mais utilizadas são usualmente injeção de cimento,

ancoragens a partir da superfície, enfilagens e micro-estacas instaladas segundo a direcção de avanço, Jet Grouting e Congelação da água de percolação.

#### **3.7.4.1 Reforço do maciço rochoso**

Os sistemas de reforço com utilização corrente, compreendem pregagens, entivação metálica (perfis metálicos), rede metálica, chapas metálicas, betão projectado etc. (Bastos, 1998)

As pregagens são sistemas de grande utilidade, e consistem na introdução de um elemento metálico no maciço rochoso de modo a conferir a este um reforço suplementar. São muito utilizadas para suporte de blocos instáveis e combinam bem com sistemas de suporte adicional como rede, betão projectado e perfis metálicos.

A utilização de entivação metálica é um método amplamente utilizado tanto em solos como em rochas muito fracturados e apresentam numerosas vantagens:

- Excelentes propriedades mecânicas aos esforços de tracção e compressão;
- Resistência a elevados momentos de flexão;
- Elevado módulo de elasticidade e ductilidade;
- Facilidade de fabricação;
- Maior resistência que a madeira;
- Material homogéneo e de fácil controlo de qualidade;
- São recuperáveis e reutilizáveis, caso o seu limite elástico não seja ultrapassado.

Possuem no entanto inconvenientes como o seu elevado custo agravados pelos tratamentos anti-corrosão (Rivas Vargas, 1997).

O betão projectado é um elemento praticamente obrigatório para a construção de túneis, e desempenha um papel de grande relevância na sustentação do túnel assim como na sustentação de frentes de escavação. Esta técnica é aplicada normalmente em conjunto com a adição de fibras metálicas ou a aplicação de rede metálica, muito embora esta última seja utilizada cada vez menos em detrimento da primeira.

A rede metálica tipo malha sol (rede electro-soldada) é especialmente utilizada em maciços muito fracturados.

De referir que segundo Melâneo (1994), sustimentos onde sejam utilizados em conjunto betão projectado e cambotas ou pregagens e betão projectado, é admitida, para efeitos de cálculo de sustimento a rigidez do conjunto como sendo a soma da rigidez de cada elemento individual, supondo um comportamento plástico sujeito a uma carga máxima constate.

### 3.7.4.2 Suporte secundário

Usualmente o suporte secundário é uma estrutura de betão ou aço envolvendo a cavidade do túnel, usualmente colocados sobre o suporte primário.

Segundo Estefanía Puebla (1997), a finalidade do revestimento secundário é:

- Assegurar a estabilidade a longo prazo;
- A impermeabilização da cavidade, impedindo o fluxo de água para o interior do túnel;
- Conferir ao túnel um aspecto regular e uniforme, funcionando como elemento estético de acabamento final;
- Conferir as características de serviço no que se refere à melhoria da eficiência da ventilação e iluminação em túneis rodoviários.

A colocação do revestimento final pode ser realizada mediante a betonagem, utilizando cofragens deslizantes.



**Figura 35 - Cofragem deslizante utilizada para colocação de revestimento provisório na abertura do túnel do Covelo.**

O betão é usualmente transportado a grandes distâncias dentro do túnel até ao local de betonagem onde é colocado por bombagem.

A cofragem encontra-se instalada sobre carris que deslizam permitindo o avanço desta, em módulos ao longo do túnel à medida que o trabalho progride.

O betão utilizado para revestimento tem usualmente resistência à compressão simples aos 28 dias de 21 MPa e uma relação água cimento de 0,45.

### 3.7.4.3 Pré-suporte

#### 3.7.4.3.1 Avanço da escavação sobre um chapéu de enfilagens

É utilizada algumas vezes, e consiste na criação de um reforço estrutural no maciço, previamente à escavação deste, permitindo dessa maneira o avanço da escavação em maciços de difícil estabilidade.

O método compreende geralmente a furação e colocação de microestacas e enfilagens de 12 metros e com calda injectada de 8 em 8 metros e com um mínimo de 4 metros de sobreposição entre chapéus sucessivos.

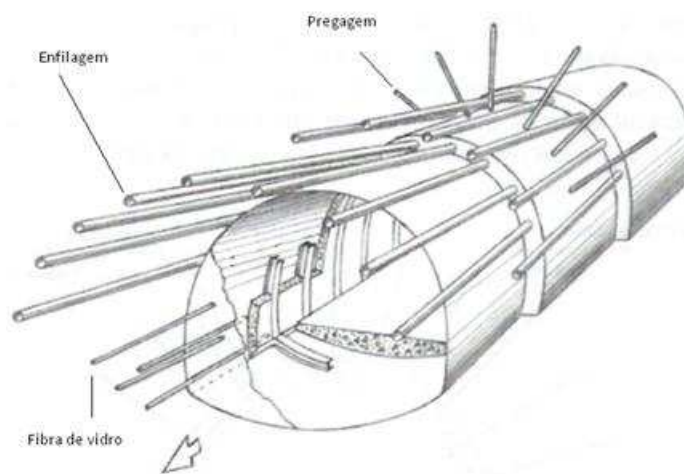


Figura 36 - Avanço de uma escavação sobre a protecção de um chapéu de enfilagens adaptado de (Hoek, 2000).

#### 3.7.4.3.2 Fibras de vidro

É um sistema muito utilizado para suporte da frente de escavação e consiste no reforço desta com fibras de vidro com calda de cimento injectado, que fornecem um reforço da frente e são extremamente fáceis de destruir á medida que a frente de escavação avança.





## **4 Caso de estudo: Túnel do Seixo Alvo**

### **4.1 Enquadramento e descrição da obra**

O Túnel do Seixo Alvo, objecto de estudo, é parte integrante das auto-estradas do Douro Litoral mais concretamente da A32 que pretende ligar Oliveira de Azeméis –Vila Nova de Gaia, com uma extensão de 34,7 km, sendo 6,2km dos quais obras de arte.

A Zona onde está a ser implantado situa-se no distrito do Porto, concelho de Vila Nova de Gaia freguesia do Olival, lugar do Seixo Alvo.

O túnel do Seixo Alvo encontra-se inserido no trecho 3- Louredo/IP1 (S. Lourenço) sensivelmente entre os PK 10+900 e 11+200 do traçado geral. A obra em questão inclui a escavação, suporte e revestimento definitivo de duas galerias gémeas, afastadas entre si cerca de 20 m entre guias interiores, assim como os trabalhos de superfície, nomeadamente os emboquilhamentos associados ao túnel. Embora a execução do túnel seja em meio urbano, consegue-se, dada a ocupação envolvente, evitar a passagem sob edificações à superfície.

### **4.2 Entidades intervenientes**

A entidade executante da obra em questão é a DLACE (Douro Litoral ACE) que por sua vez sub - empreitou obra à DLOE (Douro Litoral Obras Especiais ACE), sendo esta entidade uma associação corporativa formada pelas seguintes empresas: Teixeira Duarte, Zagope - Construções e Engenharia S.A, Construtora Tâmega e Alves Ribeiro SA. A entidade responsável pelo projecto é a COBA S.A. A fiscalização ficou a cargo do dono de obra, a Brisa Engenharia e Gestão S.A.

### **4.3 Condicionantes**

A construção de uma obra rodoviária necessita de ter em conta alguns condicionantes que influenciam de forma determinante o modo de execução desta. No túnel do Seixo Alvo estes condicionantes são:

- De natureza geológico-geotécnica, que influencia de forma determinante os métodos de escavação a utilizar, assim como o faseamento construtivo e suporte do túnel.
- A ocupação da superfície, que traz numerosas restrições relativamente às técnicas e metodologias aplicadas para o desmonte da rocha.

#### **4.3.1 Geológico – geotécnicos**

O túnel encontra-se implantado em terrenos metamórficos, nomeadamente Xistos estaurolíticos, tema que será desenvolvida com maior pormenor no capítulo dedicado à geologia e geotecnia local.

#### **4.3.2 Ocupação de superfície**

O cariz urbano da zona envolvente à obra é de grande importância para a definição de técnicas a aplicar. É de assinalar a presença de uma estação de serviço próximo do PK 0+725 da Galeria Sul, a qual, relativamente aos postos de gasolina, importa acautelar eventuais impactos da construção do túnel. O posto de abastecimento de gasolina encontra-se afastado do Hasteal Sul da Galeria Sul cerca de 25 metros (em planta). À entrada do túnel, uma habitação existente junto da galeria Sul obrigou à construção de uma estrutura ancorada de forma a conter o terreno. Esta habitação pode ainda ser afectada pelo ruído e vibrações provenientes dos trabalhos. Por outro lado, é de assinalar, à saída do túnel, a presença do edifício da Fanfarra-Recreativa e Cultural do Olival, que poderá também ser afectada pelo ruído. Por fim importa ainda referir a presença da escola EB 2-3 – Olival, a cerca de 10 metros a Sul da Galeria Sul.



**Figura 37 - Escola EB 2 – 3 – Olival e posto de abastecimento de Gasolina.**

## 4.4 Enquadramento geológico e geotécnico do maciço

### 4.4.1 Enquadramento geológico geral.

A principal unidade geológica da região que é intersectada pelo túnel é o designado Xisto de Fânzeres, um Xisto estaurólítico que se insere no Complexo Xisto-Grauváquico Ante-Ordovícico e que litologicamente se trata de Xistos luzentes cinzento-acastanhados, com grandes cristais de estaurólite e por vezes granadas, intercalados por lenticulas ou filonetes de quartzo branco. É ainda possível observar-se ocasionalmente a ocorrência de intrusões granitóides.

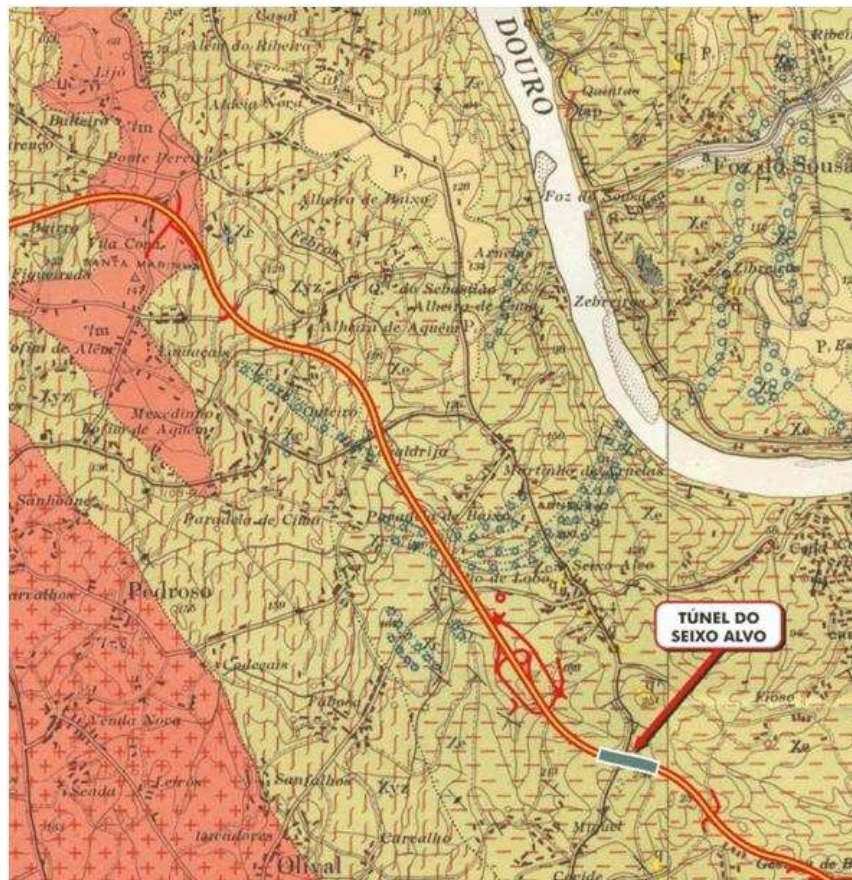


Figura 38 - Extracto das cartas geológicas de Portugal (Esc:1/50000 – adaptado de folhas 13-A Espinho e 13-B Castelo de Paiva).

Esta unidade geológica encontra-se ainda encaixada em duas grandes unidades principais. Uma a nascente constituída por Xistos e grauvaques e outra a poente constituída por granito porfiróide, predominantemente biotítico de grão grosseiro mais conhecido por granito da Madalena, e uma unidade de migmatitos, gnaisses, micaxistos e xistos luzentes.

A prospecção executada permitiu a identificação das unidades litológicas interessadas pela obra a executar, sendo elas as seguintes (COBA Projecto de execução Túnel do Seixo Alvo, 2009):

- Aterro (At) - Resulta da actividade antrópica e ocorre em espessura que se identificou até aos 7 m. É constituído por materiais diversos e heterogéneos, mas de natureza idêntica à litologia local. Ocorre ao longo das estradas e das zonas habitacionais mais próximas do traçado, em particular junto ao emboquilhamento Poente;
- Solo residual (Sr) – Resulta da alteração dos xistos, tratando-se de um solo areno - siltoso, por vezes argiloso, de espessura máxima aproximada de 3,5 a 4,0 metros.

#### **4.4.2 Hidrogeologia**

As características hidrogeológicas da região dependem essencialmente da litologia, estrutura geológica, grau de alteração e fracturação, tipo de solo e cobertura vegetal.

A região apresenta elevada pluviosidade e terrenos susceptíveis à presença de nascentes. A abundante presença de água é atestada pela elevada densidade de vegetação.

O maciço rochoso trata-se fundamentalmente de um xisto pelo que apresenta por isso uma elevada permeabilidade, infiltrando-se e circulando a água através das discontinuidades do maciço, zonas de esmagamento e zonas de contacto.

Quanto maior a abertura das fracturas e menor o espaçamento entre elas maior e mais importante é a circulação de água.

#### **4.4.3 Prospecção**

A fase de prospecção e estudo da região de implantação da obra, teve em conta os seguintes aspectos:

- Prospecção geofísica;
- Prospecção geotécnica;
- Prospecção mecânica;
- Ensaios “in situ”.

De forma a poder fazer-se um reconhecimento e zonamento adequados da zona de implantação, foram efectuadas 20 sondagens, 8 poços e 11 perfis sísmicos de refração.

Foram também executados ensaios “in situ”, nomeadamente ensaios de penetração dinâmica do tipo (SPT), ensaios de Permeabilidade Lugeon, ensaios de permeabilidade Lefranc, e ensaios pressiométricos.

Foram ainda executados ensaios de Laboratório como ensaios em solo (amostras remexidas, amostras intactas), ensaios em rocha (peso volúmico, absorção de água e porosidade, resistência à compressão uniaxial, carga pontual, resistência ao deslizamento de descontinuidades, teor em quartzo, ensaios Cerchar).

#### **4.4.4 Zonamento geotécnico em projecto**

Após a recolha e análise dos dados do reconhecimento, foram definidas as unidades do maciço com semelhantes características geotécnicas, de modo a estimar-se o processo de escavação mais adequado e o sustimento a utilizar no túnel.

Os parâmetros que serviram de base ao zonamento geotécnico em projecto foram o grau de alteração do maciço, a sua fracturação (segundo a ISRM), o RQD, a % recuperação, o GSI, e o RMR de Bieniawski.

Foram então definidas 3 zonas geotécnicas (ZG1, ZG2 e ZG3), cujas características serão enunciadas nos seguintes capítulos.

##### **4.4.4.1 Zona Geotécnica 1**

Refere-se às zonas do maciço que possuem as melhores características geotécnicas e a sua ocorrência é expectável com maior significado para a obra na zona central do túnel Sul. É expectável também que estas zonas sejam menos fracturadas dada a menor acção tectónica, e que os teores em quartzo sejam superiores.

Os valores que serviram de base ao zonamento geotécnico encontram-se expostos Tabela 20.

Alteração	W2-3 a W3
Fracturação	F2-3 a F3
% Recuperação	≥90
RQD (%)	>50
GSI	42 - 62
RMR	>45%

**Tabela 20 - Principais parâmetros da zona geotécnica 1 (adaptado de projecto de execução Seixo alvo, 2010).**

#### 4.4.4.2 Zona Geotécnica 2

Trata-se de zonas de maciço de qualidade intermédia. É uma zona de transição entre o maciço de fracas características e as zonas de melhor qualidade e é expectável por isso que a sua ocorrência se dê entre o maciço mais superficial e com pior qualidade e o maciço de melhor qualidade, ou em zonas alvo de maior fracturação como é o caso de algumas zonas mais profundas.

Os valores parâmetros que serviram de base ao zonamento geotécnico encontram-se expostos na Tabela 21.

Alteração	W3-4
Fracturação	F3-4 a F4
% Recuperação	≥50
RQD (%)	>25
GSI	28 – 45
RMR	30 – 45%

**Tabela 21 - Principais parâmetros da zona geotécnica 2 (adaptado de projecto de execução Seixo alvo, 2010).**

#### 4.4.4.3 Zona Geotécnica 3

Refere-se a um maciço de fraca qualidade e trata-se de uma zona que inclui a franja superficial de maciço terroso e também o maciço rochoso brando ou mais alterado e fracturado. A sua ocorrência dá-se particularmente nos emboquilhamentos junto à superfície, e em determinados casos em profundidade, como é o caso do emboquilhamento nascente onde atinge uma profundidade de 30 metros. Pode ainda ocorrer no seio de maciços de melhor qualidade por acção tectónica.

Os valores parâmetros que serviram de base ao zonamento geotécnico encontram-se expostos na Tabela 22.

Alteração	W4 a W5
Fracturação	F4-5 a F5
% Recuperação	≤50
RQD (%)	<25
GSI	15– 30
RMR	<30%

**Tabela 22 - Principais parâmetros da zona geotécnica 3 (adaptado de projecto de execução Seixo alvo, 2010).**

#### 4.4.4.4 Percentagem de ocorrência e outras considerações

Importa referir ainda a heterogeneidade do maciço relativamente à sua qualidade ao longo do túnel, que difere sobretudo entre a zona da calote e do rebaixo, e ocorre em extensões significativas. O caderno de encargos opta por considerar o maciço da zona de abóbada e envolvente para definir a zona geotécnica intersectada pela galeria para efeitos de simplificação. Esta justifica-se pelo facto de a abóbada condicionar de forma mais relevante os suportes a serem aplicados e por ser a primeira que será escavada.

No quadro seguinte encontram-se as percentagens de zonas geotécnicas que a totalidade das galerias atravessa.

Zona geotécnica	% Túnel
ZG1	10
ZG2	20
ZG3	70

Tabela 23 - Zonamento geotécnico, estimativa das percentagens de ocorrência (adaptado de projecto de execução Seixo alvo, 2010).

## 4.5 Caracterização do Túnel

### 4.5.1 Características gerais

O túnel é constituído por duas galerias de cerca de 310 metros cada, separadas entre si por um pilar central de 20 metros e com um recobrimento máximo de cerca de 25 metros. As galerias apresentam um *gabarit* rodoviário de 13,00 x 5,10 (L x H) e passeios de largura variável de cerca de 0,90 metros.

Um resumo das principais características do túnel pode ser visto no quadro resumo seguinte:

Galeria Norte (Faixa direita)	
PK de inicio (Km)	0+550
PK final (Km)	0+860
Comprimento Total	310
Galeria Sul (Faixa esquerda)	
PK de inicio (Km)	0+540,7
PK final (Km)	0+851,5
Comprimento Total	310,8

Tabela 24 - Quadro resumo das principais características do túnel (adaptado de projecto de execução Seixo alvo, 2010).

#### 4.5.2 Características das secções tipo

Encontra-se definido em projecto a execução de duas secções tipo distintas, tanto em tipo de fundação como em processo construtivo, de acordo com a Zona Geotécnica. Ambas as secções são definidas por dois arcos no extradorso e três arcos no intradorso, de forma a permitir a colocação de equipamentos tais como redes de abastecimento de energia, iluminação, sinalização e segurança, assim como colectores de águas de lavagem ao longo da galeria, que irão conduzi-las para o exterior assim como eventuais derrames que ocorram no interior do túnel, de forma independente em relação às águas limpas do maciço.

##### 4.5.2.1 Secção Tipo 1

Assim, teremos uma secção tipo1 para ZG1 e ZG2 com 0,40 m de espessura de betão na calote e hasteais apoiando-se sobre uma sapata corrida de 1,90 x 0,70m.

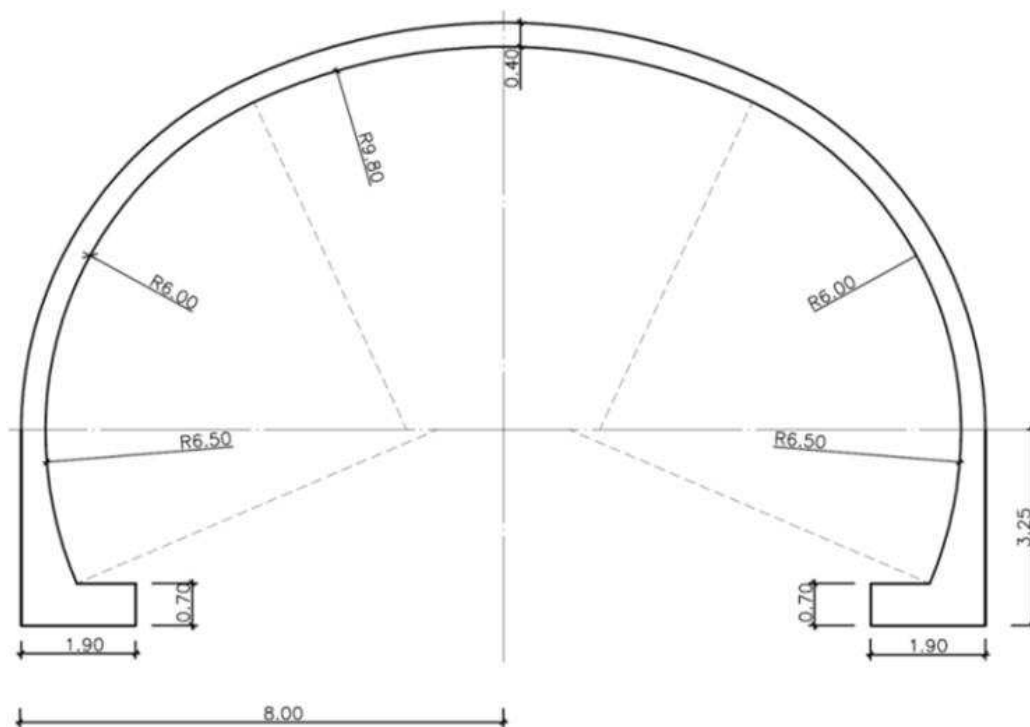


Figura 39 - Secção Tipo 1 – medidas em metros (adaptado de Projecto de execução de túnel de Seixo alvo, COBA 2010).

A Área de escavação nominal para a secção tipo 1 é de 138 m<sup>2</sup> e a área de betão é de 14,82 m<sup>2</sup>. Importa ainda referir que sempre que em ZG3, o terreno de fundação (abaixo do eixo horizontal) apresente boas características, nomeadamente ZG1 ou ZG2, será também utilizada a secção tipo 1, algo que se encontra previsto ocorrer em 90% de todo o trecho a escavar em ZG3.

#### 4.5.2.2 .Secção Tipo 2

A Secção Tipo 2, encontra-se assim definida para sempre que as condições geotécnicas e hidrogeológicas sejam desfavoráveis, nomeadamente em ZG3. Neste caso a estrutura apresenta uma secção transversal abobadada de espessura de 0,40 metros até ao eixo horizontal, ponto a partir do qual devido à adopção de um arco no intradorso, ganha espessura, terminando em fundação em soleira curva (elemento estrutural contínuo), com uma espessura mínima de 0,40 metros. A área de escavação nominal da secção Tipo 2 é de 157 m<sup>2</sup> e a área de betão de 22.06 m<sup>2</sup>.

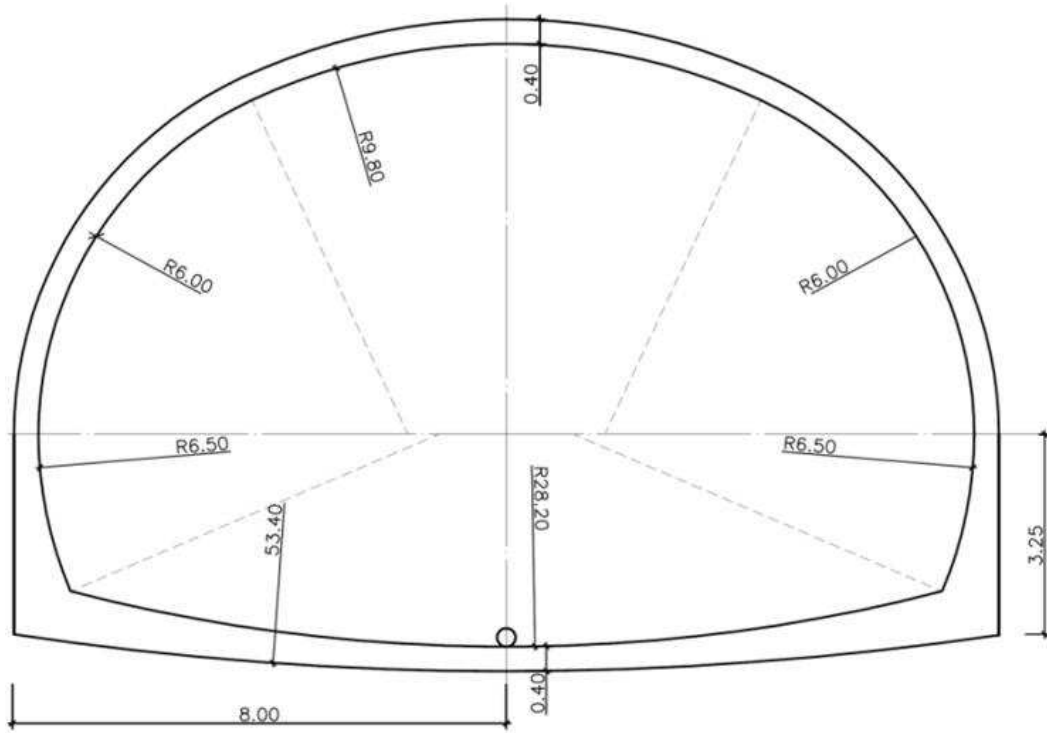


Figura 40 - Secção Tipo 2 – medidas em metros (adaptado de Projecto de execução de túnel de Seixo alvo, COBA 2010).

#### 4.5.2.3 Quadros resumo das características das secções

Secção	Hasteal (m)	Largura (m)	Altura ao centro (m)	Área esc. (m <sup>2</sup> )
Tipo 1	3,25	16	10	138
Tipo 2	3,25	16	10,4	157

Tabela 25 - Quadros resumo das características das secções.

## 4.6 Caracterização das operações e actividades

Os trabalhos no local iniciaram-se sensivelmente em princípios do mês de Abril de 2010, com o início da desmatação do local e remoção de terras para a execução dos emboquilhamentos. As operações efectuaram-se em ambas as frentes, encontrando-se a Tâmega S.A. responsável pela frente poente, e a Teixeira Duarte pela nascente. Os trabalhos no local desenvolveram-se assim em simultâneo nas duas frentes, o mesmo ocorrendo aquando do início da escavação subterrânea por volta de fins do mês de Maio. Foi efectuado pelo signatário um acompanhamento da obra desde o mês de Abril até fins de Julho, tendo sido registadas produções, tanto a nível de trabalhos de superfície (emboquilhamentos), como de trabalhos subterrâneos, observadas metodologias implementadas a nível de escavação de maciço e suporte, e equipamentos utilizados para a sua execução.






Figura 41 - Trabalhos de escavação e remoção de terras no emboquilhamento de entrada e de saída.

### 4.6.1 Trabalhos de Superfície

Previamente ao início dos trabalhos de escavação subterrânea foi necessário atender, dada a natureza topográfica do terreno de implantação da obra, à adopção de estruturas de contenção de terrenos compatíveis com as condicionantes existentes no local.

O quadro da página seguinte pretende de forma expedita apresentar as soluções adoptadas para cada uma das frentes de trabalho, frente nascente (Emboquilhamento de entrada) e a frente poente (Emboquilhamento de saída).

Importa ainda referir a construção de uma passagem hidráulica em ambas as frentes e de valetas de crista ao longo dos taludes para actuarem como elementos de drenagem superficial. As soluções adaptadas para os emboquilhamentos encontram-se apresentadas na Tabela 26 e na Tabela 27.

Zona:	Solução preconizada:		
<b>Zona frontal</b>	Inclinação de taludes: <ul style="list-style-type: none"> <li>• 1V:1,5H (talude abaixo da banquetta)</li> <li>• 1V:1H (talude acima da banquetta)</li> </ul>	Elementos de suporte (talude abaixo da banquetta): <ul style="list-style-type: none"> <li>• Betão projectado (e=0,15m), 2 níveis de malha - sol AQ50</li> <li>• Pregagens tradicionais <math>\phi 32</math> mm A500 NR, L=12m em malha 2,5x2,5 (quincôncio)</li> </ul>	
<b>Zona lateral Sul*</b>	Inclinação de taludes: <ul style="list-style-type: none"> <li>• 4V:1H (talude superior - topo)</li> <li>• 1V:1,5H (talude entre banquetta)</li> <li>• 1V:1H (talude inferior – base)</li> </ul>	Elementos de suporte: Talude topo e entre banquettas: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Betão projectado (e = 0,20 m), 2 níveis de malha- sol AQ50 – armadura de reforço.</li> <li>• Pregagens DIWIDAG, <math>\phi 43</math> mm P=50 KN, L=12m.</li> </ul> Talude inferior –base <ul style="list-style-type: none"> <li>• Betão projectado (e=0,15m), 2 níveis de malha - sol AQ50</li> <li>• Pregagens tradicionais <math>\phi 32</math> mm A500 NR, L=12m em malha 2,5x2,5 (quincôncio)</li> </ul> Talude inferior base( abaixo da parede ancorada): <ul style="list-style-type: none"> <li>• Betão projectado (e = 0,20 m), 2 níveis de malha- sol AQ50 – armadura de reforço.</li> <li>• Pregagens DIWIDAG, <math>\phi 43</math> mm P=50 KN, L=12m.</li> </ul>	
<b>Zona lateral Norte</b>	Inclinação de taludes: <ul style="list-style-type: none"> <li>• 1V:1,5H (todos os taludes)</li> </ul>	Elementos de suporte:  -----	

\* O muro de Berlim será mencionado separadamente

**Tabela 26 - Soluções adoptadas para o emboquilhamento de entrada (frente nascente).**




Zona:	Solução preconizada:		
<b>Zona frontal</b>	Inclinação de taludes: <ul style="list-style-type: none"> <li>• 1 V: 1,5H (talude acima da banqueteta)</li> <li>• 1,5V: 1,5 (talude abaixo da banqueteta)</li> </ul>	Elementos de suporte: Talude inferior <ul style="list-style-type: none"> <li>• Betão projectado e=0,15 m, 2 níveis de malha – sol tipo AQ50.</li> <li>• Pregagens tradicionais <math>\phi</math> 32 milímetros A500 NR, L= 12 metros espaçadas 2,5 metros e dispostas em quincôncio.</li> </ul> Talude superior <ul style="list-style-type: none"> <li>• Betão projectado e=0,15 m, 2 níveis de malha – sol tipo AQ50.</li> <li>• Pregagens tradicionais <math>\phi</math> 32 milímetros A500 NR, L= 6 metros espaçadas 2,5 metros e dispostas em quincôncio.</li> </ul>	
<b>Zona Lateral Sul</b>	Inclinação de taludes: <ul style="list-style-type: none"> <li>• 1V:1,5H (Talude de topo)</li> <li>• 1V:1H (talude entre banquetetas)</li> <li>• 3V:1H (talude inferior – base)</li> </ul>	Elementos de suporte: Talude entre banquetetas: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Betão projectado e=0,15 m, 2 níveis de malha – sol tipo AQ50.</li> <li>• Pregagens tradicionais <math>\phi</math> 32 milímetros A500 NR, L= 6 metros espaçadas 2,5 metros e dispostas em quincôncio.</li> </ul> Talude inferior – base: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Redes de protecção de queda de blocos e pregagens tradicionais <math>\phi</math> 32 milímetros A500 NR, L= 6 metros espaçadas 2,5 metros e dispostas em quincôncio.</li> </ul> Talude inferior – base(junto ao emboquilhamento da galeria Sul): <ul style="list-style-type: none"> <li>• Betão projectado (e = 0,20 m), 2 níveis de malha- sol AQ50 – armadura de reforço.</li> <li>• Pregagens DIWIDAG, <math>\phi</math> 43 mm P=50 KN, L=12m.</li> </ul>	
<b>Zona Lateral Norte</b>	Inclinação de taludes: <ul style="list-style-type: none"> <li>• 1,5V:1H</li> </ul>	Elementos de suporte: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Betão projectado e=0,20 m, 2 níveis de malha – sol tipo AQ50, armadura de reforço</li> <li>• Pregagens DIWIDAG, <math>\phi</math> 43 mm P=50 KN, L=12m.</li> </ul>	

Tabela 27 - Soluções adoptadas para o emboquilhamento de saída (frente ponte).

#### 4.6.2 Drenagem dos taludes

Foram colocados, em todas as soluções, drenos sub-horizontais de 4 metros de comprimento e 50 mm de diâmetro distribuídos segundo uma malha 3x4 metros, em PVC rígido e crepinado, revestidos por geotêxtil.

A função dos drenos é a de assegurar a drenagem interna do maciço de forma a prevenir a geração de impulsos hidrostáticos provocados pela infiltração de águas pluviais.

Estes elementos foram instalados com uma inclinação ascendente de 5º com a horizontal de modo a garantir o escoamento gravítico das águas de captação.



Figura 42 - Drenos envolvidos em geotêxtil e malha de drenos instalada no talude superior poente.

#### 4.6.3 Considerações relativas ao processo construtivo

A construção e execução dos taludes seguiram de forma geral o seguinte faseamento para cada uma das frentes:

- Escavação e remoção de terras de forma faseada (numa altura máxima de 3 metros, para perfazer alturas máximas de taludes que podem atingir os 12 metros) e execução uma plataforma de trabalho estável para posicionamento do equipamento;
- Projecção de uma primeira camada de betão (via Húmida) e colocação de rede electrosoldada;
- Furação para drenos e pregagens (furação  $\phi 76\text{mm}$  para pregagens tradicionais, 120 mm para diwidag);
- Colocação dos drenos (com escada) e das pregagens e injeção destas com calda de cimento aditivada (relação cimento/água > 0,4) para ganhar presa mais rapidamente; Auxílio da giratória para o caso de pregagens maiores que 12 metros e do multifunções para projecção de betão e colocação de pregagens. A injeção da calda pode ser directa, tratando-se de maciços de boa qualidade e o furo não sofra risco de colapso, ou então é colocado um tubo de plástico em torno do prego até ao fundo do furo por onde é injectada a calda;

- Projecção das restantes camadas de betão intercaladas por rede electrosoldada AQ50 (malha 10X10cm), ou armadura de reforço quando foi o caso;
- Instalação dos elementos de drenagem superficial.



**Figura 43 - – Rede electrosoldada, e furação para pregagens.**



**Figura 44 - Colocação de uma pregagem Diwidag, colocação de drenos.**

#### **4.6.4 Parede ancorada**

A presença de uma habitação na proximidade da galeria Sul, condicionou de forma determinante a solução de estabilização adoptada. Essa solução passou pela construção de duas estruturas ancoradas. Um primeiro nível abaixo da cota (231.00), de altura 5 metros e dois níveis de ancoragem em malha quadrada espaçadas 2,5 metros. Um segundo nível, abaixo da cota (226.00) de altura 6 metros e 3 níveis de ancoragem em malha rectangular de 2,5 metros de espaçamento na horizontal. A espessura de ambas as estruturas é de 0,3 metros.

##### **4.6.4.1. Ancoragens**

As ancoragens projectadas para sustimento do muro apresentam 4 cordões de 1,5 cm em aço de alta resistência 1670/1860.

No primeiro nível de contenção o comprimento livre mínimo é de 18 metros e o comprimento de bolbo de selagem mínimo de 7 metros e no segundo nível de contenção o comprimento livre mínimo é de 14 metros e o comprimento de bolbo de selagem mínimo de 7 metros.

#### 4.6.4.1 Faseamento construtivo

O faseamento construtivo adoptado para o muro de Berlim encontra-se exposto na Tabela 28

<p>Ensaio prévios para confirmação do comportamento das ancoragens definitivas da obra.</p>		
<p>Escavação da parede por níveis com giratória.  Escavação de troços alternados de 6 metros de extensão e 3 metros de altura</p>		
<p>Execução dos troços primários: - Montagem da armadura em Aço A500NR e A235NL (em situações particulares), espaçadas entre 10 e 15 cm. - Betonagem do muro com recurso a cofragem, (betão C 25/30)</p>		
<p>Execução dos troços secundários seguindo a mesma metodologia.</p>		
<p>Colocação das ancoragens, (furação, limpeza do furo, armadura de selagem, injeção de calda e tensionamento), pré-esforço útil 500 KN.  Execução de seguintes níveis segundo a mesma metodologia e colocação de sapata no nível base</p>		
<p>Estrutura finalizada</p>	 	

Tabela 28 - Faseamento construtivo das paredes ancoradas.

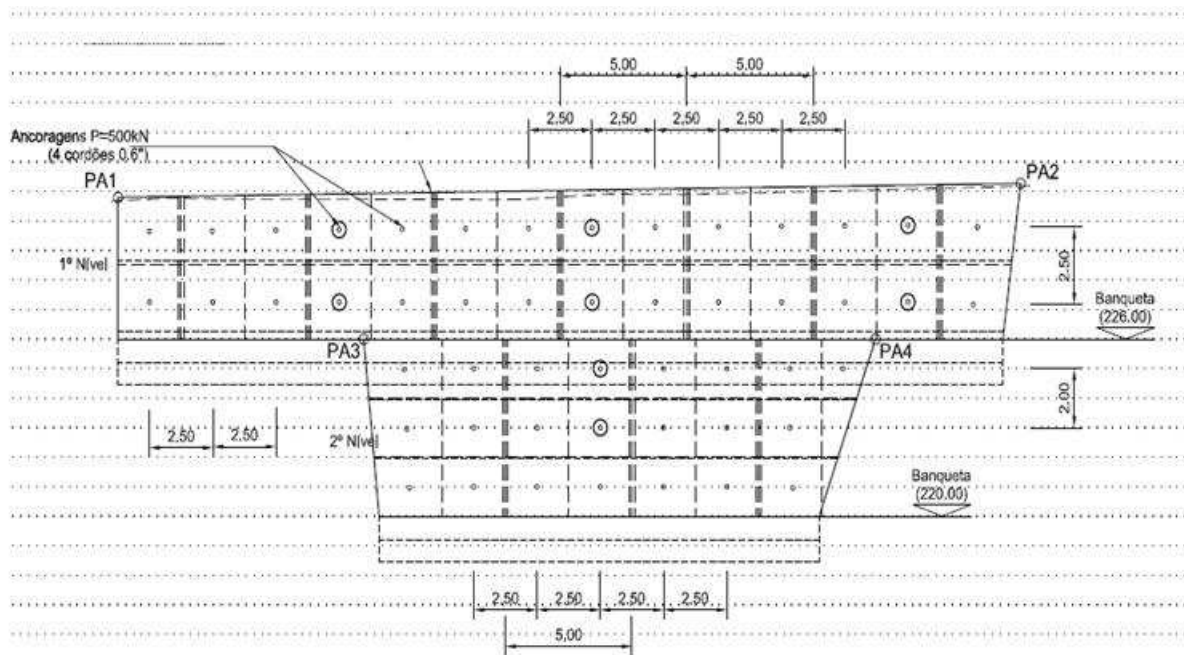


Figura 45 - Figura esquemática da parede ancorada de betão (adaptado de projecto de execução Seixo alvo, 2010).



Figura 46- Vista da parede ancorada de betão desde o talude lateral norte.

#### 4.6.5 Ensaio

Da necessidade de conhecer a adequação das soluções de suporte preconizadas em projecto, relativamente à realidade, advém a necessidade de pré-ensaios e ensaios que forneçam dados fiáveis no que diz respeito ao comportamento de pregagens e ancoragens em terreno.

Executaram-se por isso 2 ensaios de arrancamento em cada frente, em pregagens independentes e de características idênticas às previstas executar na obra relativamente à técnica de execução, materiais e inclinação.



Figura 47 - Equipamento de ensaio de pregagens e folha de anotações de resultados.

Foram executados para as ancoragens do muro dois ensaios prévios de modo a aferir o dimensionamento previsto.

#### 4.6.6 Arranjo paisagístico

Existem 3 situações de arranjo paisagístico projectadas para os emboquilhamentos:

- Taludes de inclinação 1V:1,5H – revestimento com espécies vegetais adequadas e hidrosementeira.
- Taludes inferiores frontais e paredes ancoradas – revestimento de pedra natural de xisto com fixação adequada.
- Restantes paredes pregadas, adição de pigmento de cor ocre amarelo à última camada de betão projectado

## 4.7 Trabalhos subterrâneos

### 4.7.1 Faseamento construtivo adoptado

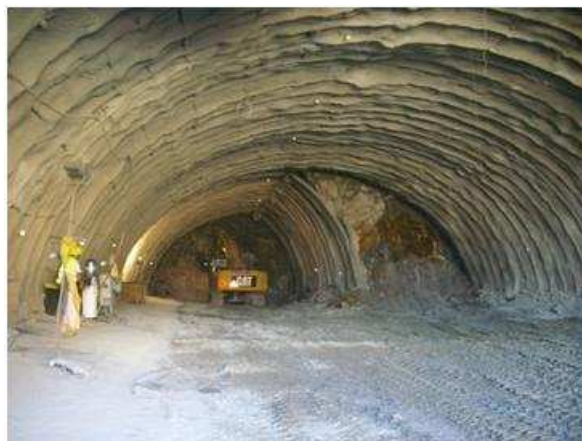
Para a execução da escavação das galerias, estas foram subdivididas em 2 secções, dado que não é recomendada a escavação em secção plena para nenhuma das zonas geotécnicas à excepção de ZG1. Cada uma das secções foi por sua vez dividida em subsecções. Assim, foram consideradas as seguintes fases de escavação:

- Na calote, duas sub-fases;
- No rebaixo, três sub-fases, nomeadamente caixão central e 2 alargamentos.

A primeira sub-fase da calote a ser escavada deve ser oposta ao pilar central, sendo os alargamentos posteriormente executados para a zona central, de forma a controlar os deslocamentos à superfície sobretudo nas proximidades dos emboquilhamentos, e permitir ainda prever em certa medida as condições para o alargamento e rebaixo, trazendo assim vantagens do ponto de vista da aplicação do suporte.

Para a calote, a escavação da segunda galeria deve ser desfasada da primeira numa extensão mínima de 20 metros, e sempre após os deslocamentos da galeria adjacente se encontrarem estabilizados na vizinhança dos trechos a escavar.

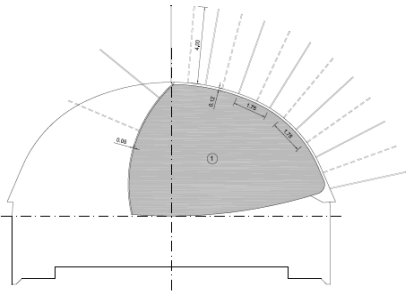
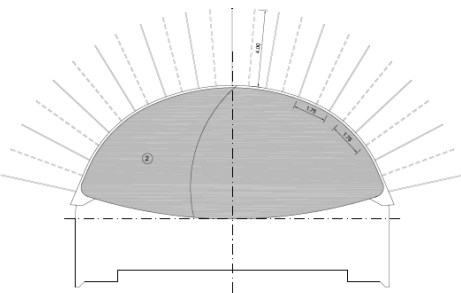
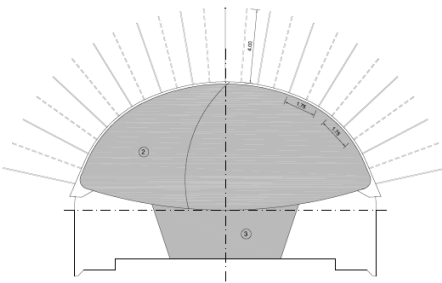
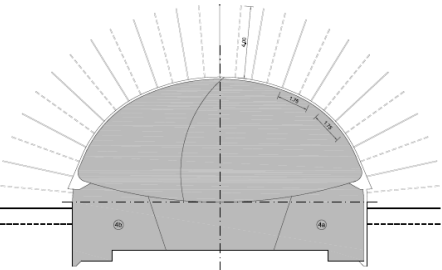
Os suportes primários foram sobretudo avaliados mediante métodos empíricos validados por métodos numéricos e devidamente analisados e comparados com a experiência adquirida em obras similares. Estes suportes no entanto necessitam de ser avaliados em obra mediante a realidade geológica-geotécnica encontrada e dos dados provenientes da instrumentação.



**Figura 48 - Vista da escavação da calote onde se podem ver as duas fases de escavação (Escavação secção parcial).**

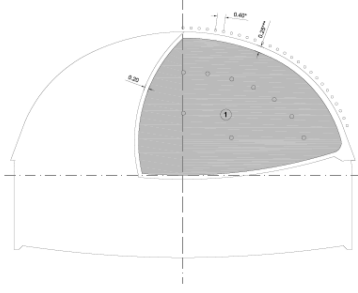
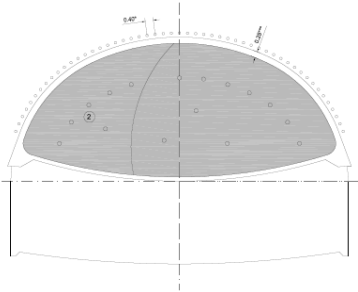
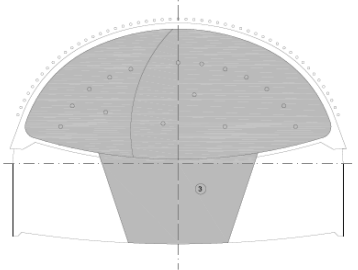
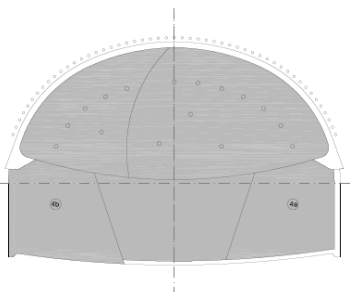
#### 4.7.2 Em ZG1 e ZG2

O faseamento construtivo utilizado foi planeado tendo em conta a modelação numérica utilizando o programa de cálculo automático bidimensional de elementos finitos PHASE2 versão 7.0. O faseamento encontra-se resumido nos quadros resumo seguintes.

<p>Escavação da 1ª sub-fase da calote ( aplicação de um factor de relaxamento do maciço de 30 % na modelação numérica de modo a simular a redistribuição das tensões instaladas no maciço antes da aplicação do suporte).</p>	
<p>Aplicação dos perfis metálicos/pregagens e do betão projectado.</p>	
<p>Escavação da segunda sub-fase da calote e aplicação de um factor de relaxamento do maciço de 30%. Desfasamento para a 1ª fase de 14,5 metros em ZG1 e 15 metros em ZG2.</p>	
<p>Aplicação de perfis metálicos/pregagens e betão projectado na 2ª fase</p>	
<p>Escavação do caixão central (desfasamento para a 2ª fase da calote de 50 metros)</p>	
<p>Escavação do nicho lateral direito e aplicação de um factor de relaxamento do maciço de 30 %.Desfasamento para o caixão central de 10,5 metros em ZG1 e 6 metros em ZG2.</p>	
<p>Aplicação de perfis metálicos e betão projectado no nicho lateral direito</p>	
<p>Escavação do nicho lateral esquerdo e aplicação de factor de relaxamento de 30 %.</p>	
<p>Aplicação de perfis metálicos e betão projectado no nicho lateral esquerdo. Desfasamento para o 1º nicho de 14,5 metros em ZG1 e 12 metros em ZG2.</p>	

**Tabela 29 - Quadro resumo do faseamento construtivo em ZG2 e ZG1 (adaptado de projecto de execução Seixo alvo, 2010).**

### 4.7.3 Em ZG3

<p>Execução de chapéu de enfilagens em arco de 150º na primeira sub-fase.</p>	
<p>Escavação da 1ª sub-fase da calote e aplicação de um factor de relaxamento do maciço de 30 %.</p>	
<p>Aplicação dos perfis metálicos e betão projectado nos hasteais interiores e soleira</p>	
<p>Execução de chapéu de enfilagens em arco de 150º na segunda sub-fase</p>	
<p>Escavação da 2ª sub-fase da calote e aplicação de um factor de relaxamento do maciço de 30 %. (15 metros de desfasamento para 1ª fase)</p>	
<p>Execução de chapéu de enfilagens em arco de 150º na segunda sub-fase</p>	
<p>Escavação do caixão central (desfasamento para a 2ª fase da calote de 50 metros)</p>	
<p>Escavação do nicho lateral direito e aplicação de um factor de relaxamento do maciço de 30 %. Desfasamento para o caixão central de 8 metros.</p>	
<p>Aplicação de perfis metálicos e betão projectado nos hasteais e soleira no nicho lateral direito</p>	
<p>Escavação do nicho lateral esquerdo e aplicação de factor de relaxamento de 30 %. Desfasamento para o primeiro nicho de 12 metros.</p>	
<p>Aplicação de perfis metálicos e betão projectado no nicho lateral esquerdo</p>	

**Tabela 30 - Quadro resumo do faseamento construtivo em ZG3 (adaptado de projecto de execução Seixo alvo, 2010).**

#### 4.7.4 Avanços

Os avanços planeados para cada uma das zonas geotécnicas definidos em projecto encontram-se na seguinte tabela:

Zona geotécnica	Avanços (m)	
Zona Geotécnica 1	Calote	3,5
	Rebaixo	3,5
Zona Geotécnica 2	Calote	1,5
	Rebaixo	4,0
Zona Geotécnica 3	Calote	1,0
	Rebaixo	2,0
Emboquilhamento Poente	Calote	0,75
	Rebaixo	0,75
Emboquilhamento Nascente	Calote	0,75
	Rebaixo	0,75

**Tabela 31 - Quadro resumo dos avanços para cada uma das fases (adaptado de projecto de execução Seixo alvo, 2010).**

#### 4.7.5 Áreas das secções de escavação

As áreas para cada uma das secções de escavação encontram-se expostas nos quadros seguintes.

Secção tipo 1		Área (m <sup>2</sup> )
Calote	1	53,5141
	2	31,2217
Rebaixo	3	19,0569
	4 a	16,9476
	4 b	16,9476

**Tabela 32 – Quadro resumo das áreas de escavação para cada sub - secção na secção Tipo 1.**

Secção tipo 2		Área (m <sup>2</sup> )
Calote	1	56,0633
	2	30,7573
Rebaixo	3	26,3050
	4 a	22,1925
	4 b	22,1925

**Tabela 33 - Quadro resumo das áreas de escavação para cada sub -secção na secção tipo 2.**

## 4.8 Metodologias de escavação, escavação mecânica com recurso a martelo hidráulico

A escavação do túnel desenvolveu-se com recurso a martelo hidráulico, uma vez que por razões legais não foi permitido o uso de explosivos.

### 4.8.1 Área de escavação

Na escavação com recurso a martelo, a área da secção a escavar é de grande importância, influenciando de forma definitiva o método de trabalho a ser utilizado.

Para túneis de altura superior a 7 metros como é o caso, a escavação foi executada em duas fases diferentes, sendo cada uma delas subdividida em sub-fases, nomeadamente duas para a calote e três para o rebaixo.

Uma vez que a primeira sub-fase e o caixão do rebaixo apresentam ambos menos de 8 metros de largura, somente uma combinação escavadora-martelo pode funcionar na frente do túnel.



**Figura 49 - Vista geral do emboquilhamento de saída com as duas galerias. Martelo hidráulico utilizado para escavação do maciço.**

### 4.8.2 Ciclo de operações

O ciclo de operações divide-se por isso em 5 fases, do seguinte modo:

- Escavação;
- Transporte de escombros;
- 2ª Fase de escavação para colocação de cambotas;
- Transporte do material de segunda fase de escavação;
- Reforço e suporte das paredes do túnel.

### 4.8.3 Procedimento de escavação

A escavação deve-se iniciar no centro da secção a escavar junto à soleira, abrindo-se desta maneira um nicho de cerca de 1,5 a 2 metros de profundidade e posteriormente, escavam-se as laterais ao primeiro nicho, tentando-se aproximar o mais possível aos hasteais finais do túnel. Por fim segue-se este procedimento até ao tecto do túnel (ver Figura 50 )

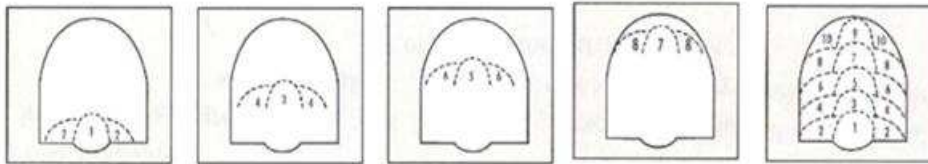


Figura 50 - Sequência de escavação da frente para martelo hidráulico (adaptado de Rock excavation hand Book).

No caso de a rocha ser muito fracturada, a escavação deve seguir de forma normal de baixo para cima seguindo no entanto a direcção dos planos de descontinuidades (Figura 51) e usando de forma o mais efectiva possível os pontos de fraqueza estrutural natural da rocha.



Figura 51 - Sequência de escavação segundo a orientação das descontinuidades (Rock excavation hand Book).



Figura 52 - Sequência de escavação segundo a orientação das descontinuidades, fase inicial e fase intermédia.

#### 4.8.4 Cuidados a ter durante as operações

A operação de escavação com um martelo deve atender a alguns cuidados por parte do operador de forma a garantir um bom desempenho, e uma reduzida taxa de avarias e consequentes custos adicionais e quebras de produção.

Estes cuidados são:

- Durante a operação de percussão o operador não deve rodar o braço do equipamento com o intuito de o redireccionar numa nova direcção, dado o perigo de danificar e partir a ferramenta de corte. Pelo contrário, deve terminar a operação que executa sobre aquela direcção, redireccionar o braço e reiniciar o trabalho;
- Durante a operação de escavação não deve deixar sobreaquecer o martelo, devendo fazer pausas sempre que necessário de forma a deixar arrefecer o equipamento;
- Durante a operação de escavação a rega do ponto de escavação é uma boa maneira de diminuir a produção de poeiras.

#### 4.9 Suporte primário

O suporte primário a utilizar no túnel foi definido em projecto mediante as características do maciço a escavar e os respectivos modos de rotura. Os suportes primários a ser utilizados em cada uma das zonas geotécnicas encontram-se resumidos nos quadros seguintes.

Zona Geotécnica 1	
<b>Modo de rotura considerado</b>	Queda por gravidade de blocos definidos pela intersecção das descontinuidades existentes.
<b>Pregagens</b>	Calote: Tipo Swellex $\geq 200$ KN e 4 metros de comprimento em malha 1,75x1,75m desfasadas em quincôcio.
	Rebaixo: Colocação pontual de pregagens em função das condições geológicas – geotécnicas encontradas. Tipo Swellex $\geq 200$ KN e 4 metros de comprimento
	Ocasional: o uso de pregagens de aço de 6 metros a nível da abóbada, em função da compartimentação do maciço e possível formação de cunhas *.
<b>Betão projectado</b>	Reforçado com fibras metálicas numa espessura $e=0,12$ m a $0,20$ m
	Hasteal provisório: Reforçado com fibras metálicas numa espessura $e=0,05$ m
<b>Perfis metálicos</b>	Elementos metálicos treliçados tipo PS 115 20 30 de 1,75m em 1,75m
<b>Drenagem</b>	Geodrenos de diâmetro 50 mm e 4 metros de comprimento distribuídos localmente em função do caudal afluente à escavação. Maiores comprimentos em trechos de maior afluência de água previamente á escavação.

\* Durante a obra é colectada informação base necessária ao estudo estatístico das descontinuidades

**Tabela 34 - Suporte utilizado em ZG1 (adaptado de projecto de execução Seixo alvo, 2010).**

<b>Zona Geotécnica 2</b>	
<b>Modo de rotura considerado</b>	Misto. Queda de blocos semelhante a ZG1 e escorregamento de rocha em zona muito fracturada e em zonas de esmagamento.
<b>Pregagens</b>	Calote: Tipo Swellex $\geq 200$ KN e 6 metros de comprimento em malha 1,5x1,5m desfasadas em quincôncio, podendo ser substituídas por pregagens de aço de 25 mm selada com cimento em caso de dificuldade de instalação de pregagens de atrito.
	Hasteal provisório: Colocação pontual de pregagens em função das condições geológicas – geotécnicas encontradas. Tipo Swellex $\geq 200$ KN e 4 metros de comprimento
	Ocasional: Uso de pregagens de aço de 25 mm na abóbada seladas com cimento em caso de dificuldade de instalação de pregagens de atrito e uso de pregagens de aço de 6 metros a nível da abóbada, em função da compartimentação do maciço e possível formação de cunhas *.
	Pregagens de frente Y35 de 12 metros de comprimento e 3 de sobreposição mediante as condições geológico – geotécnicas.
<b>Betão projectado</b>	Reforçado com fibras metálicas numa espessura $e=0,15m$ a $0,20m$
	Hasteal provisório: Reforçado com fibras metálicas numa espessura $e=0,15m$
<b>Perfis metálicos</b>	Elementos metálicos treliçados tipo PS 115 20 30 com pata de elefante e afastados 1,25m (nas zonas de $RMR \leq 35$ ) a 1,5m.
	Hasteal provisório: Perfis TH29 afastados 1,25m.
<b>Drenagem</b>	Geodrenos colocados em função do caudal afluente á escavação

**Tabela 35 - Suporte utilizado em ZG2 (adaptado de projecto de execução Seixo alvo, 2010).**

<b>Zona Geotécnica 3</b>	
<b>Modo de rotura considerado</b>	Escorregamento de material muito alterado a decomposto por rotura, devido a fluência de material muito alterado. E risco de abertura de chaminés à superfície.
<b>Enfilagens</b>	Enfilagens armadas com varão de aço de 32 mm de diâmetro em furação de 76 mm na calote e afastadas 0,4 m. Em caso de dificuldades de instalação podem ser substituídas por enfilagens auto-perfurantes DSI R32N
<b>Pregagens</b>	Pregagens de frente Y35 de 12 metros de comprimento e 3 de sobreposição.
<b>Betão projectado</b>	Reforçado com fibras metálicas numa espessura $e=0,25m$
	Hasteal provisório: Reforçado com fibras metálicas numa espessura $e=0,20m$
	Soleira curva: Reforçado com fibras metálicas numa espessura $e=0,20m$ e malha electro - soldada AQ50
	Frente: em zonas de pior qualidade $e=0,05m$ e aquando da paragem de frentes para execução de enfilagens.
<b>Perfis metálicos</b>	Elementos metálicos treliçados tipo PS 115 20 30 com pata de elefante e afastados 1m.
	Hasteal provisório: Perfis TH29 afastados 1 m.
<b>Drenagem</b>	Geodrenos colocados em função do caudal afluente á escavação

**Tabela 36 - Suporte utilizado em ZG3 (adaptado de projecto de execução Seixo alvo, 2010).**

Importa ainda referir o suporte previsto para os emboquilhamentos. Designam-se com este nome os primeiros metros a partir das bocas do túnel. Foram definidas zonas de 45 a 65 metros a suportar de forma diferenciada.

<b>Emboquilhamento Nascente</b>	
<b>Enfilagens</b>	Enfilagens ST52 de 125 mm de Diâmetro em chapéu duplo, afastadas 0,50 m perimetralmente e 0,25m radialmente em 180 graus, com 12 metros, e 3 m de sobreposição ao chapéu seguinte
<b>Pregagens</b>	Pregagens de frente Y35 de 12 metros de comprimento e 3 de sobreposição.
<b>Betão projectado</b>	Reforçado com fibras metálicas numa espessura e=0,30m
	Hasteal provisório: Reforçado com fibras metálicas numa espessura e=0,15m
	Soleira curva: Reforçado com fibras metálicas numa espessura e=0,20m e malha electro - soldada AQ50
	Frente: sistemática e=0,05m
<b>Perfis metálicos</b>	Elementos metálicos treliçados tipo PS 115 20 30 afastadas 0,75m.
	Hasteal provisório: Perfis TH29 afastados 0,75m.

**Tabela 37 - Suporte utilizado em Emboquilhamento nascente (adaptado de projecto de execução Seixo alvo, 2010).**

<b>Emboquilhamento Poente</b>	
<b>Enfilagens</b>	Enfilagens ST52 de 125 mm de diâmetro, afastadas 0,40m em 180 graus, com 12 metros, com 3 metros de sobreposição ao chapéu seguinte.
<b>Pregagens</b>	Pregagens de frente Y35 de 12 metros de comprimento e 3 de sobreposição.
<b>Betão projectado</b>	Reforçado com fibras metálicas numa espessura e=0,30m
	Hasteal provisório: Reforçado com fibras metálicas numa espessura e=0,20m
	Soleira curva: Reforçado com fibras metálicas numa espessura e=0,20m e malha electro - soldada AQ50
	Frente: sistemática e=0,05m
<b>Perfis metálicos</b>	Elementos metálicos treliçados tipo PS 115 20 30 afastadas 0,75m.
	Hasteal provisório: Perfis TH29 afastados 0,75m.

**Tabela 38 - Suporte utilizado em Emboquilhamento poente (adaptado de projecto de execução Seixo alvo, 2010).**

#### **4.9.1 Caracterização dos elementos de suporte**

##### **4.9.1.1 Betão projectado**

Designa-se como betão projectado, a mistura de cimento, areia e agregado fino aplicada e compactada dinamicamente com grande velocidade com o auxílio de ar comprimido (Galiza et al.), e que tem um papel importantíssimo no suporte da escavação devido sobretudo à sua capacidade de deformação após aplicação na fase da descompressão do maciço.

O betão pode ser projectado por duas vias:

- Via seca – via pela qual a água é adicionada à mistura de inertes e cimento na boca do monitor de projecção;
- Via húmida – a água é adicionada ao cimento e inertes na betoneira onde a mistura é homogeneizada, sendo posteriormente projectada.

No caso específico da obra em estudo, foi utilizada esta última via (húmida), que apresenta as seguintes vantagens:

- Menor quantidade de reflexões (10%), e portanto maior aderência por parte do betão projectado;
- Menor produção de poeiras e conseqüente melhor visibilidade das operações e maior segurança;
- Melhor controlo de qualidade, uma vez que a mistura do betão é realizada em unidades de produção idênticas às do betão convencional;
- Maior produtividade;
- Não há necessidade de regulação do caudal de água, pelo que a perícia do operador, não tem tanta influência na qualidade final do betão;
- A velocidade de impacto das partículas e compactação pode ser controlada pelo operador, através da regulação do caudal de ar na embocadura;
- É facilmente adaptável à utilização de equipamento de protecção mecanizada;
- Custos de conservação mais baixos;
- Maior facilidade na aplicação de fibras metálicas



**Figura 53 - Projecção de betão na galeria Sul do emboquilhamento de saída.**

O betão projectado necessário para as diferentes Zonas do Túnel foi modelado através do modelo Viga. Assim para ZG1, a espessura de betão irá variar entre os 12 e 20 cm (cambotas), para o ZG2 entre os 15 e 20 cm e para ZG3 entre os 20 e os 25 cm.

#### **4.9.1.1.1 Componentes**

O betão projectado é composto por cimento, agregados, água, aditivos aceleradores de presa e fibras de aço.

O cimento utilizado é Portland, devido à flexibilidade que se pode conseguir com pequenas variações da mistura.

Os agregados devem ser limpos, duros resistentes e duráveis, com menos de 2% de passados no peneiro 200 (0,075 m).

A água a usar em betão projectado deve ser isenta de óleos, gorduras, sais, substâncias alcalinas e matéria orgânica.

Os aceleradores de presa diminuem o tempo que o betão leva a ganhar presa, embora se forem em pó podem diminuir a resistência do betão, devendo por isso ser adicionados no bico em forma líquida. Deste modo a sua influência não é tão grande e evita-se este tipo de problemas, devido ao longo tempo de transporte e conseqüentemente ao maior tempo de contacto entre acelerador e mistura de betão.

As fibras de aço aumentam a resistência à tracção do betão projectado enquanto permitem uma grande flexibilidade durante as primeiras horas após aplicação, período durante o qual ocorrem movimentos no maciço rochoso. As fibras devem ter um comprimento suficiente para desenvolver uma aderência razoável e formar uma armadura efectiva no revestimento.

As fibras metálicas apresentam as seguintes características:

- Fio de aço treliçado com resistência à tracção superior a 1000 MPa.
- Comprimento superior a 2 vezes o diâmetro máximo do agregado e inferior a 40mm, de modo a evitar a obstrução das fibras durante a projecção;
- Diâmetro o mais fino possível de modo a diminuir a distância entre fibras, aumentando a sua quantidade para o mesmo volume de betão, com conseqüente aumento de eficiência;
- A relação comprimento /diâmetro das fibras deve ser superior a 45;
- A escolha do tipo de fibra deve ser confirmada a partir dos resultados de ensaio de placa. A energia de deformação do betão com fibras deve ser entre 700 e 1000 Joules o que o coloca entre uma classe B (terreno médio) e C (terreno medíocre).

#### 4.9.1.1.2 Ensaio

Durante a execução são recolhidas amostras como forma de controlo das propriedades mecânicas do betão projectado.

São efectuados ensaios de compressão, ensaios de flexão (viga e por punçoamento), ao conteúdo das fibras, dosagem, aditivos, controle de energia de deformação e controle de qualidade de fibras nas placas.

A quantidade de ensaios encontra-se explicada na tabela seguinte:

Ensaio	Início das obras	Durante a execução
Resistência á compressão	Cada 100 m <sup>3</sup> ou cada 2 semanas	Cada 400 m <sup>3</sup> ou cada mês
Conteúdo de fibras, dosagem, aditivos	Cada 200 m <sup>3</sup> ou cada semana	Cada 400 m <sup>3</sup> ou cada mês
Controle de espessura	Cada 200 m <sup>3</sup>	Cada 200 m <sup>2</sup>
Controle da energia de deformação mediante aplaca (EFNARC)	Cada 400 m <sup>3</sup> ou ao mês	Cada 1000 m <sup>3</sup> ou num quadrimestre
Controle de qualidade de fibras nas placas ensaiadas		Cada 1000 m <sup>3</sup>

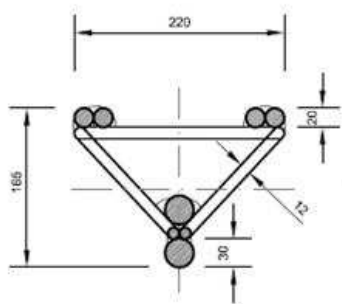
**Tabela 39 - Tabela resumo de ensaios efectuados adaptado de projecto de execução Seixo alvo, 2010).**

#### 4.9.1.2 Perfis metálicos

Os perfis metálicos reticulados utilizados foram os perfis PS 115 20 30. Trata-se de perfis destinados ao suporte primário, e com uma grande capacidade de adaptação a diferentes geometrias de secção.

As vigas reticuladas apresentam as seguintes vantagens:

- São mais económicas do que os perfis H;
- Maior integração no revestimento em betão projectado, e conseqüentemente o aço das vigas pode ser considerado parte integrante do revestimento de betão projectado;
- Maior adaptação à descompressão do maciço;
- Mais leves e de fácil colocação;
- Baixo custo e fácil fabricação.



**Figura 54 - Dimensões da cambota vista de perfil (adaptado de projecto de execução) e pormenor do reticulado da cambota.**

As vigas apresentam secção triangular classe PS 115 20 30.

#### **4.9.1.2.1 Colocação dos perfis.**

Para a colocação das cambotas são inicialmente unidas duas secções de viga previamente à sua colocação, que são posteriormente transportadas com auxílio do braço da giratória até à frente escavada. O suporte é fundado provisoriamente em pequenas sapatas de betão pré fabricadas no local da obra (ver Figura 55), e amarrado á viga anterior por meio de espaçadores como demonstra a Figura 56, o ultimo a ser colocado é o perfil provisório, que é colocado no hasteal, também provisório e fundado numa sapata de betão pré fabricada.

A sapata de betão tem como intuito, evitar que o pé do perfil penetre na soleira de betão, o que provocaria a diminuição da resistência à flexão do perfil e possibilitaria o empolamento desta.



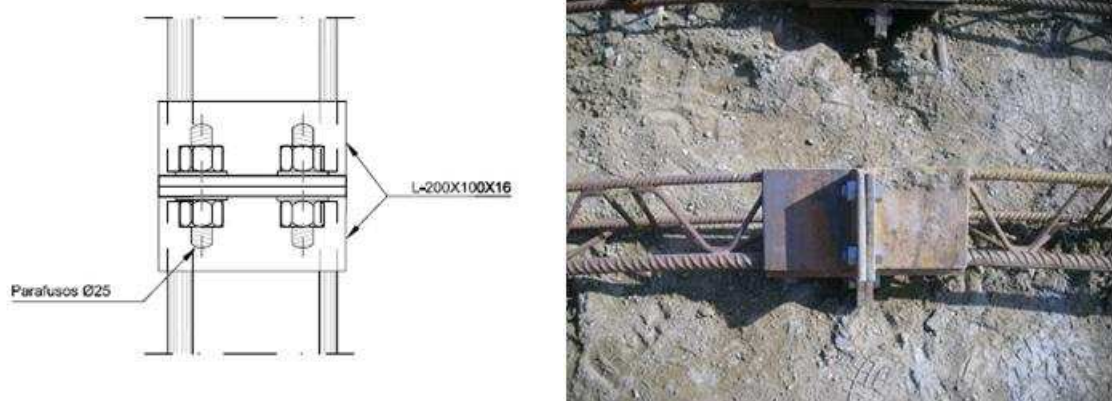
**Figura 55 - Sapatas pré-fabricadas.**

A união viga provisória/viga definitiva é protegida da projecção de betão por meio de tecidos, de forma a que as uniões não fiquem embebidas em betão projectado e a sua remoção seja possibilitada.



**Figura 56 - vista do perfil montado e auxílio do martelo hidráulico na colocação dos perfis.**

Para a colocação dos perfis metálicos importa referir o papel de grande relevância da equipa de topografia. Esta fornece ao chefe de equipa um documento onde se encontram impressas as alturas entre o perfil e um fio colocado perpendicularmente ao eixo do túnel. Assim, para uma determinada distância medida na linha desde o hasteal, é sabido a altura a que o sustimento precisa de ser colocado. Desta forma é possível fazer variar ao longo da escavação a altura a que são colocados os perfis. Isto é necessário para a colocação de elementos de pré suporte como as enfilagens, para as quais é necessário elevar a altura dos perfis cerca de 40 cm, de modo a que haja espaço suficiente para a furação e colocação destes.



**Figura 57 - Esquema representativo das uniões entre secções de perfis (Adaptado de projecto de execução) e pormenor do perfil.**

#### 4.9.1.3 Pregagens

As pregagens utilizadas para o contorno do túnel são do tipo Swellex. Este tipo de pregagem obtém a sua fixação mediante o atrito criado entre a rocha e a o aço através de uma tensão radial que é criada contra as paredes do furo ao longo da pregagem. O Swellex propriamente dito trata-se de um tubo duplo fabricado em chapa de ferro e dobrado com o intuito de manter um diâmetro de 25 a 28 mm de diâmetro. Após colocado no furo, é injectada água á pressão, que provoca a expansão do tubo e permite que este se adapte às paredes do furo. Este tipo de pregagem é de fácil utilização, entra em serviço imediatamente em todo o seu comprimento após a sua colocação, adapta-se bem às mais diversas características do terreno e o seu processo de instalação permite que o prego retracte longitudinalmente, induzindo uma tensão efectiva sobre a rocha. Para a sua instalação é necessária uma bomba hidráulica de forma a injectar a água à pressão adequada para a deformação radial do tubo.



**Figura 58 - Esquema representativo da expansão do Swellex por acção da água de alta pressão (adaptado de Galiza et al. 2007/2008).**

Encontram-se previstas somente para ZG1 e ZG2, sendo que para o primeiro caso a malha de elementos será de 1,75x1,75 metros, e para o segundo caso a malha adoptada será de 1,50x1,50 metros, estando ambas desfasadas em quincôncio. Os comprimentos das pregagens também variarão de acordo com a zona geotécnica, sendo que para ZG1 o comprimento será de 4 metros e para ZG2, este será de 6 metros.

Importa ainda referir as pregagens que serão utilizadas para os hasteais de carácter provisório que apresentarão as mesmas características gerais que foram adoptadas para ZG2.

##### 4.9.1.3.1 Furação

Para a colocação das pregagens foram executados furos com bit de 32 mm e uma vara de 6 metros hexagonal



Figura 59 - Furação para instalação de Swellex.

#### 4.9.1.3.2 Colocação

A colocação dos Swellex é feita manualmente utilizando as plataformas dos multifunções para atingir alturas mais elevadas. A água injectada atinge os cerca de 300 Bar de pressão.



Figura 60 - Instalação do Swellex e injeção de água para sua expansão.

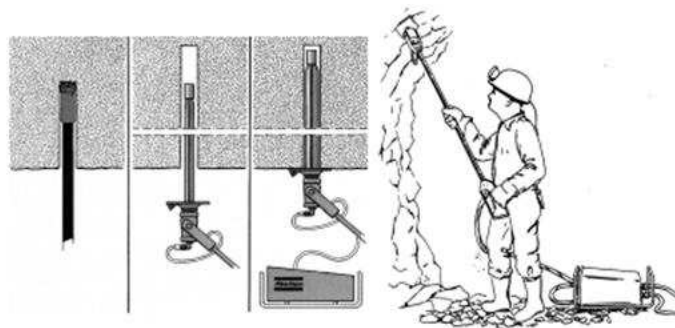


Figura 61 - Esquema representativo da instalação manual do Swellex (adaptado de Galiza, L.Gomes, Vieira 2007/2008).

#### 4.9.1.3.3 Placa usada.

A placa utilizada é plana, placa que deve ser utilizada sempre que a face da rocha for regular e o eixo do prego perpendicular a face.



Figura 62 - Placa plana utilizada e o respectivo esquema representativo (adaptado de Galiza et al.2007/2008).

#### 4.9.2 Caracterização de elementos de pré-suporte

##### 4.9.2.1 Microestacas

Para a proximidade dos emboquilhamentos foram utilizadas microestacas, constituídas por 2 níveis de elementos de secção circular que estão por sua vez desfasados entre si em ambas as galerias a nascente (chapéu duplo), tendo em conta o pouco recobrimento da galeria.



Figura 63 - Vista do emboquilhamento de saída do túnel com microestacas instaladas e início dos trabalhos de escavação com martelo hidráulico.

##### 4.9.2.2 Procedimentos de furação

Para colocação destes elementos é necessária uma grande precisão para garantir que o conjunto de microestacas providencie um plano estrutural reforçado necessário à estabilização do maciço.

Para que esta precisão seja garantida, as marcações dos furos são feitas recorrendo à equipa de topografia.

A equipa coloca também a uma determinada distância da frente de trabalho (geralmente 5 metros), uma tábua paralela à frente de escavação, onde são cravados pregos, cada um marcando um ponto correspondente a um dos furos marcados na frente, e no enfiamento destes.

A equipa de topografia disponibiliza de seguida, as alturas a que a traseira da coluna de furação se deve encontrar da tábua, no enfiamento do furo a ser perfurado, e desta maneira garantir a inclinação e direcção adequada para que a colocação da microestaca seja feita com a menor margem de erro possível.



**Figura 64 - Medição da altura ao nível da traseira da coluna de furação para furação.**

#### **4.9.2.3 Colocação das microestacas**

Após a inclinação correcta adquirida pelo braço de furação do Jumbo, a primeira secção de microestaca de 3 metros é colocada pela equipa de operários, com a perfuração utilizando como guia a própria vara de furação no seu interior e com uma coroa instalada na ponta (Figura 65), que por sua vez encaixa no bit piloto de furação da vara.



**Figura 65 - Coroa de furação e microestacas utilizadas e colocação da coroa e encaixe com o bit piloto.**

Após a colocação da primeira secção de microestacas, a equipa de perfuração fica responsável pela colocação e encaixe da próxima secção, até um total de 4 secções de 3 metros de modo a perfazer o comprimento máximo de 12 metros da microestaca. A colocação das estacas mais elevadas é feita em plataforma elevatória. ( Figura 66).



Figura 66 - Operação de colocação de microestacas com auxílio do multifunções.

#### 4.9.2.4 Enfilagens

Em ZG3 foram utilizados elementos de pré-suporte designados como enfilagens. Estas foram executadas em arco de 150°, e constituídas por varões de aço nervurado de 32 mm de diâmetro, em furos de 76 mm afastados 40 cm entre si.

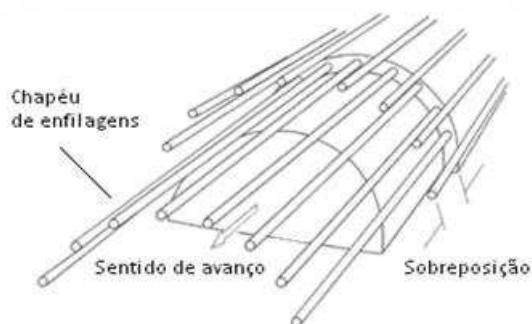


Figura 67 - esquema representativo do avanço sobre protecção de um chapéu de enfilagens (adaptado de Hoek, 1999) e operação de furação para a colocação de enfilagens.

Estes elementos são considerados como elementos de suporte local, mas, apesar de a transferência de carga entre elementos não ser contabilizada, estes elementos quando introduzidos no maciço criam um reforço no plano de análise que foi considerado, assim como na perpendicular deste.

#### 4.9.2.5 Fibras de vidro

Como elementos de pré suporte foram utilizadas fibras de vidro Y35 de 12 metros de comprimento em ZG3 que permitem a estabilização da frente de escavação. Estas são seladas com calda de cimento.



Figura 68 - Fibra Y35 pronto a ser colocada e vista de uma frente de escavação ZG3 com fibras de vidro instaladas.

Zona Geotécnica		ZG1	ZG2	ZG3
Betão projectado	e (cm)	12 a 20	15 a 20	20 a 25
	E (GPa)	20		
	$\nu$	0,2		
	$\sigma_c$ Max (Mpa)	25		
	$\gamma$ (KN/m <sup>3</sup> )	24		
Pregagens	L (m)	4	6	-
	Afastamento (m)	1,75	1,5	-
	e (mm)	3		-
	Dest (mm)	54		-
	Área (mm <sup>2</sup> )	481		-
	F máx. (KN/m)	200		-
	Q rot (Kn)	200		-
E (GPa)	200		-	

Tabela 40 - tabela resumo das características do suporte.

### **4.9.3 Revestimento definitivo**

O revestimento é em betão armado, havendo duas secções-tipo, mediante a zona geotécnica em questão.

Assim, para ZG1 e ZG2 teremos a Secção denominada de Tipo 1, com as seguintes dimensões:

- Abóbada – 0,4 metros de espessura, apoiados numa sapata de 1,90 metros de largura e 0,70 metros de espessura.
- Soleira – sem elemento estrutural contínuo.

Relativamente à armadura, foram consideradas 3 densidades distintas, nomeadamente para ZG1, ZG2 e ZG3 com ZG2 na calote inferior.

Para ZG3, sempre que o solo de fundação não seja ZG2 ou ZG1, teremos a Secção tipo 2 constituída por uma laje curva contínua de betão com as seguintes dimensões:

- Abóbada – 0,40 metros de espessura
- Hasteais – 0,92 metros de espessura

O betão utilizado é de classe de resistência C25/30 e classe de exposição XC2.

Importa ainda referir que se encontra prevista a utilização de juntas de contracção espaçadas 12,10 metros, coincidindo com as juntas de construção. Entre o suporte primário e o revestimento definitivo encontra-se ainda definida a instalação de um sistema de impermeabilização e drenagem.

## **4.10 Mão-de-obra**

### **4.10.1 Mão-de-obra directa**

Designa-se como mão-de-obra directa, aquela directamente envolvida com os trabalhos que ocorrem na frente de trabalho.

#### **4.10.1.1 Requisitos e caracterização**

Obras de Engenharia como são os casos das obras subterrâneas, exigem, por parte da mão-de-obra envolvida um conhecimento alargado de todas as especificidades, complexidades e dificuldades inerentes aos ciclos de trabalho, uma vez que estes se revestem não só de grande perigosidade, como também, grande parte da produtividade e diminuição de imprevistos é dependente desses factores. É por estas razões que a experiência alcançada em obra deve ser um factor a ter em conta aquando da selecção da mão-de-obra a empregar neste tipo de trabalhos. Aliada a esta experiência, os elementos das equipas de trabalho devem ser submetidos a uma

formação inicial complementar, uma vez que, e devido sobretudo à perigosidade das operações, a experiência adquirida neste tipo de trabalhos é essencial, e os danos físicos causados pela inexperiência, por vezes irreversíveis. Assim, a formação inicial deve ter em mente os seguintes propósitos: alertar os trabalhadores para os perigos a que estarão sujeitos, assim como a melhor forma de os evitar e deles se protegerem, inteirar os trabalhadores para a qualidade técnica pretendida nos vários trabalhos em que estarão envolvidos, rentabilizar a sua produtividade e reduzir custos. A formação deve ser por isso orientada por técnicos competentes e experientes que tanto podem ser da empresa como também subcontratados, tendo em conta as respectivas áreas de formação.

Importa ainda referir a importância da inserção de jovens nas equipas de trabalho como forma de garantir a sucessão de conhecimentos, e por estes poderem trazer vantagens ao nível da resistência física, nomeadamente para operações onde esta componente se revista de maior importância.

#### **4.10.1.2 Recrutamento**

As maiores dificuldades encontradas no recrutamento, prendem-se principalmente com a falta de mão-de-obra qualificada para a execução dos trabalhos exigidos, devido sobretudo à baixa frequência em que ocorrem estas obras, tendo por isso que se recorrer muitas vezes ao recrutamento de trabalhadores na indústria mineira extractiva, dada a similaridade dos trabalhos. Outra dificuldade é a de se encontrarem trabalhadores qualificados no local da obra, pelo que os trabalhadores poderão ter de se deslocar de localidades afastadas, advindo daí necessidades de alojamento e acolhimento da mão-de-obra.

#### **4.10.1.3 Equipas**

Na definição de equipas de trabalho para obras subterrâneas é necessário atender sobretudo à criação de grupos de trabalho onde se encontre um equilíbrio entre elementos que apresentem uma experiência considerável, úteis sobretudo em tarefas de orientação e chefia tais como os cargos de encarregado e chefe de frente, e em tarefas específicas como é o caso do operador de perfuração, e elementos menos experientes que sejam uma força de trabalho activa e apresentem uma boa produtividade.

Para o Túnel de Seixo Alvo foram definidos 4 grupos de trabalho, 2 equipas para cada frente, que se revezam entre si por turnos, um encarregado geral responsável por todas as frentes de obra, e uma equipa de apoio de 2 elementos.

Assim, cada equipa de trabalho é constituída por:

Encarregado de frente	1
Chefe de equipa	1
Operador de perfuração	1
Robot	1
Manobrador de Pá Carregadora	1
Manobrador de Giratória	2
Multifunções	1
Equipa de furação	3

**Tabela 41 - Mão de obra directa.**

Cada uma destas equipas é responsável pelas operações em cada ciclo de trabalho, tema que será desenvolvido em maior pormenor no capítulo dedicado aos ciclos de trabalho.

#### **4.10.1.4 Tarefas e responsabilidades**

É de grande importância que cada elemento da equipa esteja inteirado e conheça as suas funções e responsabilidades para que se atinja um bom nível de organização.

Em seguida apresentam-se de forma expedita as principais funções de cada elemento.

##### **Encarregado Geral**

Responsável pelo decorrer da obra, transmitindo informação aos respectivos encarregados de frente, relativamente ao planificado para o turno diário, e fazendo o controlo das partes diárias ao fim de um dia de trabalhos (ver capítulo dedicado ao controlo de execução em obra).

##### **Encarregado de frente**

Responsável pela coordenação das tarefas destinadas a um dia de trabalho, auxilia o chefe de equipa na orientação dos operários e é responsável pela requisição do material necessário na frente de trabalho. Com responsabilidade directa na execução e produtividade para cumprir o plano de trabalhos estipulado e o preenchimento dos formulários de todos os meios envolvidos.

##### **Chefe de equipa**

É o responsável pela coordenação dos diferentes elementos de uma equipa de trabalho.

### **Operador de perfuração**

É o responsável por operar com o equipamento de perfuração designado por Jumbo. A sua experiência é determinante na qualidade de furação.

O operador de perfuração pode obter conhecimentos mediante formação especial, ou através da experiência e aprendizagem em obra sob orientação de um operador já experiente. Durante as operações de furação de enfilagens, pregagens ou pegadas de fogo, a comunicação entre o operador e os marteleiros é de grande importância para o rendimento e qualidade do trabalho.

### **Operador do equipamento de projecção de betão**

Este, é responsável pelo controlo do robot de projecção de betão. Uma vez que a projecção é por via húmida, o trabalho é à partida de maior qualidade. É também responsável pela manutenção e lavagem do equipamento de projecção.

### **Manobrador da Pá Carregadora**

A sua experiência é adquirida sobretudo em obra, porém, uma formação complementar pode trazer uma melhor performance. Necessita de ser alguém confiável uma vez que a condução de um destes equipamentos acarreta grande perigosidade.

### **Manobrador da Giratória**

É o responsável pelo espalhamento do escombros e também pela escavação das frentes mediante a montagem de um martelo no braço da giratória.

### **Manobrador do Multifunções**

Responsável pelo operar do equipamento multi-funções. É necessária sensibilidade da parte do operador não só devido á natureza das operações que são realizadas no cesto do multifunções e do material transportado pelo garfo, mas também pela facilidade de ocorrerem acidentes de trabalho relacionados com os elementos de equipa que se encontram no cesto.

### **Equipa de furação**

Tratam-se de operários indiferenciados na especialização de tarefas, encarregues de executar as tarefas de carregamento de material, colocação dos perfis metálicos, enfilagens, adição de varas de furação no braço do Jumbo e colocação de fibras de vidro.

#### 4.10.2. Mão-de-obra indirecta

Adicionalmente encontram-se ainda na obra o apoio dos seguintes elementos e equipas:

Engenheiros (Director e adjunto)	2
Armazém	1
Geologia e instrumentação	2
Higiene e Segurança	2
Topografia	2
Electricistas	2
Mecânico	2
Serralheiros	1

Tabela 42 - Mão de obra indirecta.

### 4.11 Equipamentos

#### 4.11.1 Introdução e aspectos técnicos

A escolha de equipamentos para escavações subterrâneas tem uma grande importância para o rendimento geral da obra, especialmente quando se fala no equipamento de perfuração e remoção, pelo que a sua selecção deve atender a um criterioso ponderar dos diferentes factores que afectam a mesma.

Os equipamentos encontrados na obra devem por um lado permitir obter a maior eficiência possível e por outro garantir o retorno do investimento o mais rápido possível. Outros aspectos como segurança, métodos de trabalho e qualidade da escavação, são também a ter em conta. O seu rigoroso cumprimento tem sido cada vez mais uma das maiores preocupações nas obras subterrâneas.

Os aspectos técnicos a ter em conta quando da selecção de equipamentos são:

- Situação geográfica e condições locais da obra;
- Condições geográficas;
- Método de escavação;
- Preço da energia;
- Tempo de execução;
- Experiência de realização;
- Qualificação da mão de obra;
- Aspectos legais e de segurança;
- Engenharia de detalhe e com qualidade;
- Estandardização.

#### 4.11.2 Condicionantes da escolha

Aquando da selecção do equipamento será necessário ter em conta as seguintes condicionantes:

- As condições geotécnicas presentes no maciço intersectado e envolvente.
- O preço da energia que tem grande efeito no aumento ou diminuição dos custos da obra e rendimentos possíveis.
- O tempo de execução e continuidade da obra, que tem grande influência no tempo previsto para a recuperação do montante investido. Nesse sentido importa que o equipamento seja o mais versátil possível, de modo a satisfazer o mais variado número de solicitações, e permita obter a maior produtividade.
- Relativamente à segurança do equipamento, ocorre hoje em dia a obrigatoriedade de que todas as máquinas do espaço europeu possuam um certificado emitido pelo fabricante em como respeitam a legislação comunitária nomeadamente nos aspectos de ruído, emissão de gases, visibilidade para o exterior, e segurança interna do operador.
- As dimensões e áreas de escavação, que influenciam decisivamente as dimensões que os equipamentos escolhidos necessitam de ter, nomeadamente, altura, largura, raio de curvatura, velocidade e peso.
- O tipo de trabalho que é necessário executar (perfuração para desmonte e sustimento).

#### 4.11.3 Equipamentos utilizados

O quadro seguinte apresenta os equipamentos utilizados na obra, em cada uma das frentes:

Equipamentos	
Jumbo	1
Pá de Rodas	1
Multifunções	1
Giratória	1
Robot projecção	1
Equip. Injecção	1

Tabela 43 – Equipamentos utilizados em cada frente.

Os equipamentos presentes na obra são alugados, atendendo à pouca frequência deste tipo de obras.

#### 4.11.4 Perfuração

A selecção do equipamento de perfuração deve atender aos seguintes factores:

- Nº de braços;
- Rendimento;
- Área de cobertura dos braços;
- Comprimento e extensão dos braços;
- Comprimento e extensão da coluna de perfuração;
- Sistema de locomoção e perfuração;
- Velocidade de deslocação.

O nº de braços do equipamento influencia directamente o rendimento no caso da existência de pegadas de fogo.

O equipamento de perfuração deve, uma vez estabilizado, ser ainda capaz de atingir qualquer ponto do perímetro da escavação.

O pavimento deve manter-se limpo de detritos que provêm do escombros de forma a evitar o desgaste dos rodados, e reduzir a quantidade de lamas ao mínimo possível, de modo a que dessa forma se aumente a aderência dos rodados.

A perfuração é realizada por meios electro-hidráulicos de modo a que não se produzam gases adicionais que saturam a atmosfera no interior do túnel e tragam mais gastos em ventilação.

##### 4.11.4.1 Poente

##### Máquina de perfuração

O lado poente é servido por um Jumbo ATLAS COPCO Boomer L2C. Este equipamento já não se encontra disponível no mercado.



Figura 69 - – Jumbo Rocket Boomer L2C.

#### 4.11.4.2 Nascente

##### Máquina de furação

A frente de trabalho nascente encontra-se servida por um Jumbo ATLAS COPCO WE3C.

##### Dimensões

O Jumbo apresenta as seguintes dimensões:

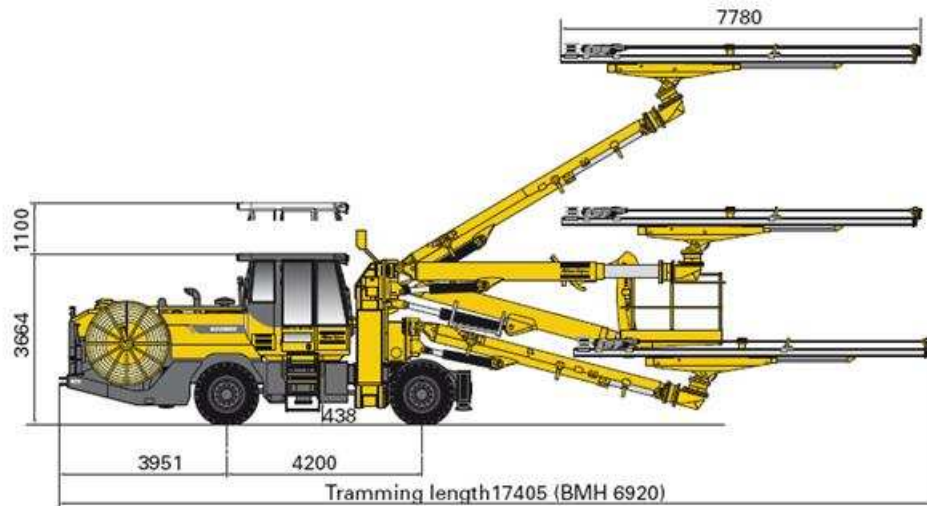


Figura 70 - Dimensões do Jumbo WE3C.

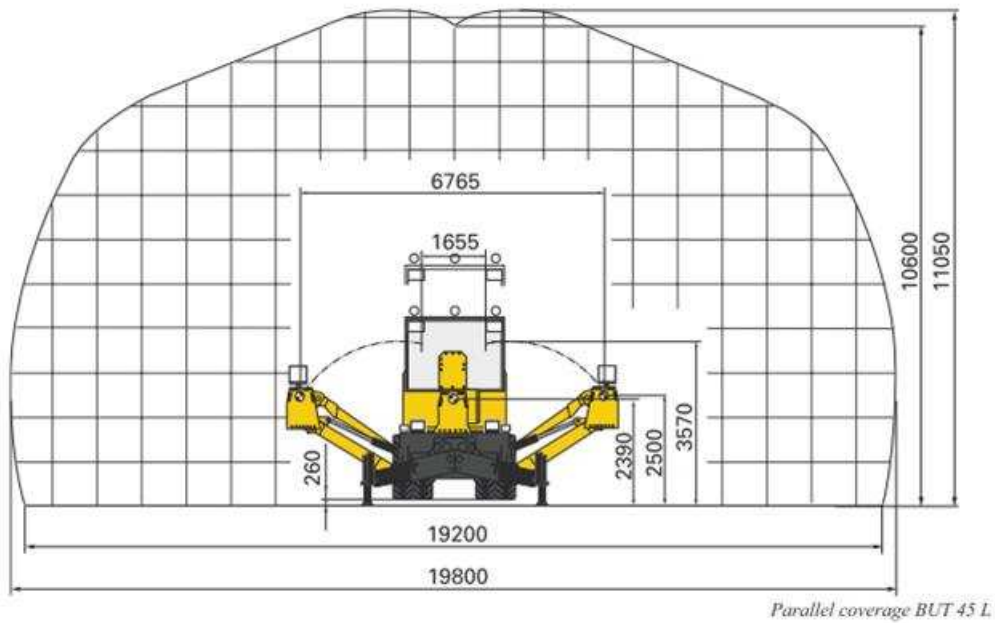


Figura 71 - Dimensões do Jumbo WE3C.

As dimensões do Jumbo são menores que a área total do túnel sendo a sua utilização perfeitamente admissível, atendendo à forma de construção já descrita anteriormente. Igualmente, a extensão que o Jumbo pode atingir transpõe os limites do perímetro do túnel (no caso de uso de colunas BMH 6920).

### Velocidade de Locomoção

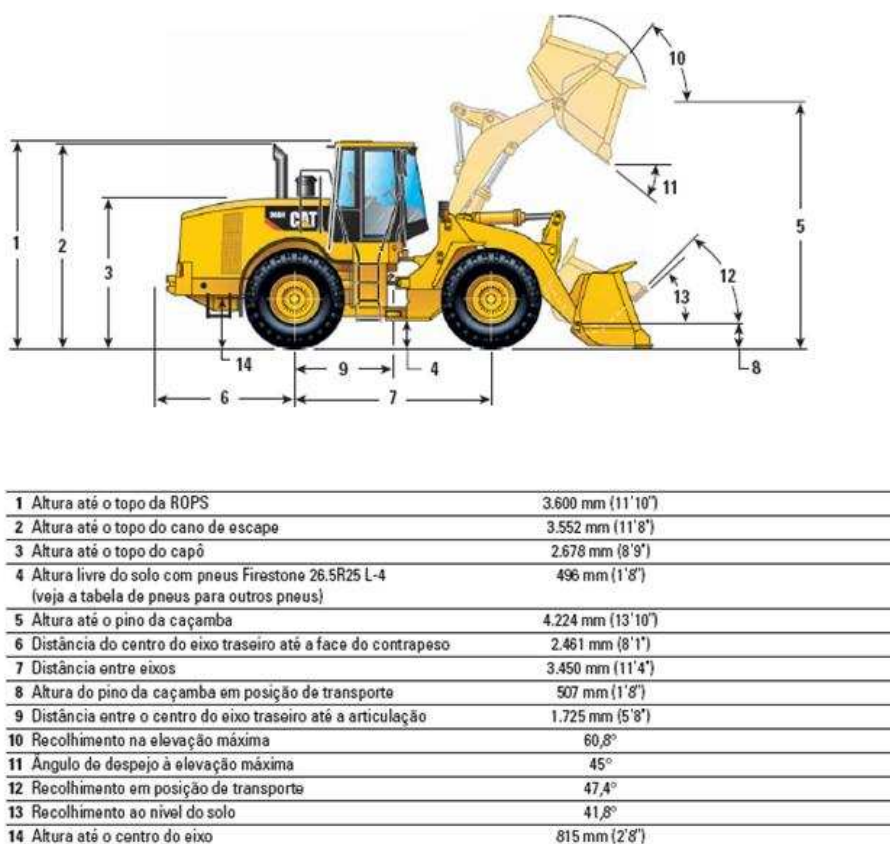
Velocidade de locomoção:		
Km /h	Terreno plano	>15
	Inclinações 1:8	>5

**Tabela 44 - tabela resumo da velocidade de locomoção (adaptado de catálogos da Atlas copco).**

Assim para uma inclinação de 3,22% do túnel temos que o Jumbo pode atingir velocidades de 13,2Km/h.

### 4.11.5. Equipamentos de remoção

Ambas as frentes são servidas por uma pá carregadora Caterpillar 966H.



**Figura 72 - Tabela resumo das características da CAT 966H (adaptado de catálogos da Caterpillar).**



**Figura 73 - CAT 966H e pá carregadora em operações de remoção.**

Com um máximo de 3,6 metros esta carregadora é admissível para secção mais confinada de todo o túnel, ou seja, a primeira secção que tem uma altura de cerca de 7 metros.

#### **Balde**

A pá carregadora encontra-se equipada com um balde com capacidade para 4,5 m<sup>3</sup>.

#### **4.11.5 Outros equipamentos**

##### **Robô de projecção**

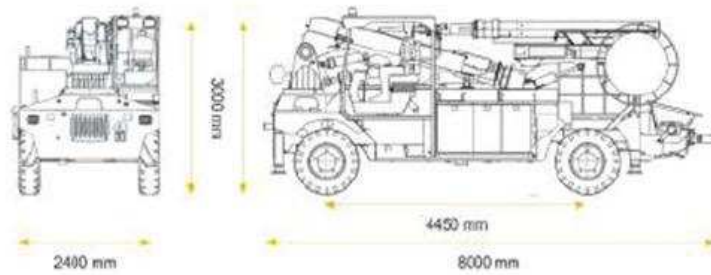
Ambas as frentes são servidas por um equipamento de projecção de betão SIKA PM 500 P Putzmeister.



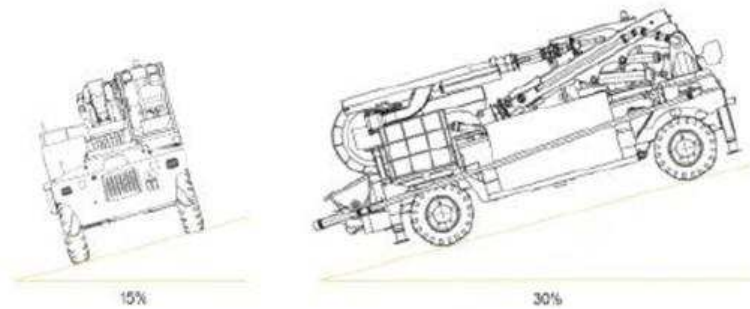
**Figura 74 - SIKA PM 500 P Putzmeister (adaptado de catálogos de Putzmeister).**



**Figura 75 - SIKA PM 500 P Putzmeister em obra e durante operações de projecção.**



**Figura 76 - Dimensões da Sika PM500 (adaptado de catálogos de Putzmeister).**



**Figura 77 - Máxima estabilidade lateral do equipamento e máxima inclinação admitida pelo equipamento (adaptado de catálogos de Putzmeister).**

As máximas dimensões do equipamento permitem-lhe o funcionamento dentro da menor secção de túnel (secção 1), assim como a inclinação máxima a que pode funcionar se encontra bem acima da inclinação do túnel.

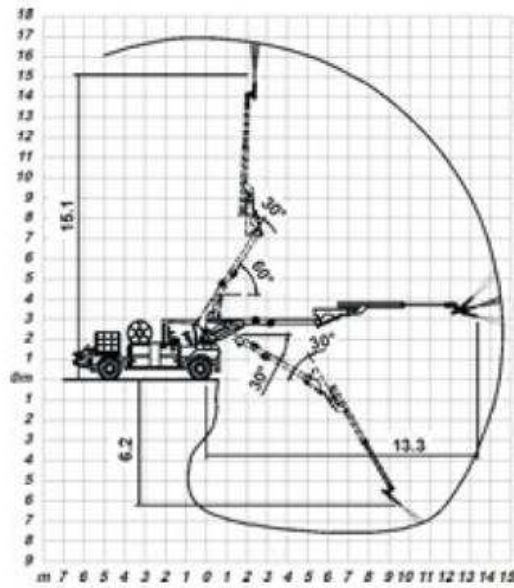


Figura 78 - Diagrama de ângulos que o braço da Sika consegue efectuar (adaptado de catálogos da Putzmeister).

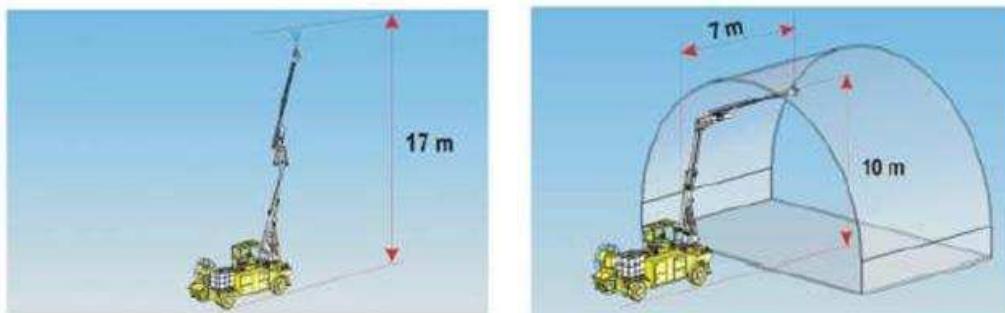


Figura 79 - Extensão do braço para trabalhos em túneis de grande secção, grande manobrabilidade por parte do braço automático (adaptado de catálogos de Putzmeister).

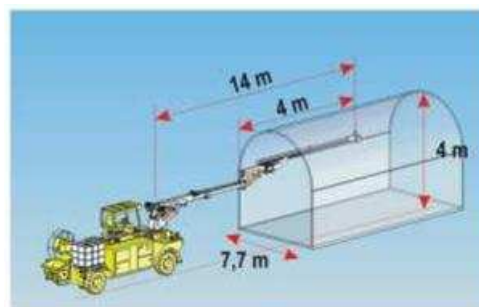


Figura 80 - Adaptabilidade do braço a Túneis de menor secção (adaptado de catálogos de Putzmeister).

O braço é adaptável a diferentes secções do túnel, e permite a projecção à distância mínima de 1 metro, recomendada para uma boa aderência do material projectado.

## Multifunções

Encontram-se na obra dois multifunções, cada um servindo uma frente e podendo revezar-se entre elas. Um MT 1440 e um Komatsu WH 716.



Figura 81 - Multifunções MT 1440.

Capacidade máxima nominal	3600Kg/4000 Kg
Máxima altura atingida pelo cesto	13,52 metros /1,53 metros
Máxima extensão horizontal	9,42 metros /9,38 metros
Potência do motor (HP/KW)	95/70 – 101/74,5
Altura/largura	2,37 metros / 2,45 metros

Tabela 45 - Tabela resumo das principais características técnicas do MT 1440 (adaptado catálogos Manitou).



Figura 82 - Multifunções Komatsu WH716.

Capacidade máxima nominal	3500kg/4000Kg
Máxima altura atingida pelo cesto	16,1 metros
Máxima extensão horizontal	11,7 metros
Potência do motor (HP/KW)	99,2 / 74 kW
Altura/largura	2,45 metros/2,4 metros

Tabela 46 - Tabela resumo das principais características técnicas do WH716 ([www.ritchiespecs.com](http://www.ritchiespecs.com)).

## Giratórias

Foram utilizadas 2 giratórias CAT 329 DLN e uma DOOSAN 225 LCV. A sua função é o espalhamento do escombro e mediante a montagem do martelo hidráulico a escavação das frentes de escavação.

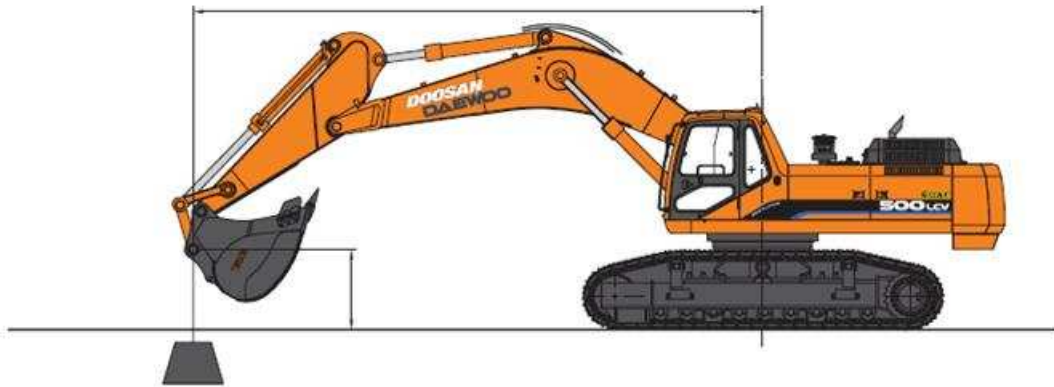


Figura 83 - Giratória DOOSAN 225 LCV (catálogos DOOSAN).

"Boom"	6,3 metros
Braço	2,4 metros
Balde	3,2 metros <sup>3</sup>

Tabela 47 - Características Giratória DOOSAN 225 LCV (catálogos DOOSAN).



Figura 84 - Giratória CAT 329 DLN, funções de espalhamento e carregamento de escombro e desmonte com martelo hidráulico (catálogos Caterpillar).

"Boom"	10,41 metros
Braço	-
Balde	1,6 m <sup>3</sup>

Figura 85 - Características Giratória DOOSAN 225 LCV (catálogos Caterpillar).

## **Martelos**

Os martelos pneumáticos de escavação são CAT H120C.



**Figura 86 - Martelo pneumático CAT (catálogos Caterpillar).**

Pesam 1300 Kg e têm uma taxa de impacto de 360 a 620 pancadas por minuto.

## **Auxiliar**

Como equipamento auxiliar, de notar a presença de uma máquina Volvo BL71.



**Figura 87 - Volvo BL71.**

Este equipamento é de grande utilidade no transporte de material pesado desde o estaleiro até às frentes de trabalho, mediante o uso de garfos (capacidade de elevar 3154 kg), e na remoção de terras utilizando um balde carregador. Com a instalação de um braço hidráulico nas traseiras do veículo pode ainda realizar funções de escavação se este se encontrar equipado com um balde, e de desmonte se equipado com martelo de escavação. O equipamento pode atingir os 37,6 km/h.

## 4.12 Redes e outros aspectos técnicos

### 4.12.1 Ventilação

A alta concentração de poeiras e gases formados no decorrer da construção de um túnel, leva à necessidade de instalação de equipamentos de ventilação que renovem o ar, diluam os gases nocivos a uma baixa concentração, mantenham a atmosfera respirável e garantam uma maior visibilidade no interior do túnel (ver Figura 89).

A ventilação pode ser de 3 tipos, insuflante, aspirante e mista.

No caso prático do túnel do Seixo Alvo, foi utilizada uma ventilação do tipo insuflante, que consiste no transporte de ar fresco do exterior para a frente de trabalho mediante uma manga, enquanto o ar, os fumos, gases e pó do túnel são diluídos e conduzidos para o exterior ao longo do túnel.

A ventilação insuflante apresenta em relação às outras duas as seguintes vantagens (Galiza et. al 2007/2008):

- Fácil instalação;
- Permite a utilização de tubarias flexíveis e leves, de fácil transporte e instalação;
- O ar fresco é conduzido rapidamente para a frente de modo a proporcionar boas condições de trabalho;
- Menor potência instalada e menor perda de carga que na ventilação aspirante.



Figura 88 - Equipamento de ventilação, instalado na galeria Norte do emboquilhamento de saída.



Figura 89 - Escavação sem ventilação vs escavação com ventilação.

Apresenta no entanto alguns inconvenientes também, nomeadamente:

- Os gases do rebentamento e dos equipamentos circulam pelo túnel causando problemas aos trabalhos que se efectuam ao longo do percurso.
- Os fumos e poeiras resultantes da perfuração ou aplicação de betão projectado (principalmente por via seca) originam uma atmosfera de reduzida visibilidade e causam problemas respiratórios para quem efectua trabalhos ao longo do túnel.



Figura 90 - Esquema de funcionamento da ventilação insuflante (adaptado de Rock excavation hand book).

Alguns dos problemas que mais atingem a ventilação são o deficiente dimensionamento da instalação e dos equipamentos instalados para o efeito, a curvatura das galerias, a área necessária para a circulação e movimentação das máquinas, os danos provocados nas condutas por projecções ou por utilização indevida de equipamentos automotores na remoção de escombros, e uma deficiente manutenção da referida instalação.

#### 4.12.2 Água

A água é necessária principalmente à furação e é obtida localmente mediante a execução de um furo de captação para servir cada emboquilhamento. A água captada é armazenada em dois depósitos, com capacidades de  $21,65\text{m}^3$  e  $11,56\text{m}^3$  perfazendo uma capacidade de armazenamento total de  $33,21\text{m}^3$ .



Figura 91 - Furo de captação na frente poente e depósitos para armazenamento de água.

#### 4.12.3 Esgoto

A instalação de esgoto nos emboquilhamentos de forma a evacuar as lamas de furação é outro aspecto a ter em conta na escavação de túneis. A abertura de trincheiras na frente de escavações (paralelas a esta) pode ajudar a reter os fluidos de furação mantendo o piso limpo e transitável. Uma valeta aberta com meios manuais permite o escoamento destes fluidos até ao exterior encaminhando-os para 4 tanques de decantação em sucessão onde são separados a maior parte dos sólidos. Posteriormente a água decantada é bombeada até uma bacia de retenção de águas, e daí para um separador de hidrocarbonetos onde é tratada. A água tratada é novamente utilizada para operações de perfuração.



Figura 92 - Tanques de decantação e vista de uma valeta de escoamento.

#### 4.12.4 Rede eléctrica

Uma rede eléctrica adequada é fundamental para o correcto funcionamento das operações de trabalho, pois é esta que alimenta o funcionamento da ventilação, iluminação, perfuração e projecção de betão. A rede eléctrica pode ser alimentada directamente da rede da câmara, o que reduz o risco de picos de corrente, ou mediante um gerador instalado no local. Um transformador (PT), também instalado no local transforma a energia de média tensão em baixa tensão (230 Volts).

Estes equipamentos devem ser escolhidos/dimensionados de forma a dar resposta às necessidades de potência dos equipamentos (Jumbo, Robô de projecção, equipamento ventilador, iluminação). Um quadro distribuidor instalado em cada emboquilhamento multiplica os circuitos para os locais onde a electricidade é necessária tal como os quadros de frente e o quadro da ventilação. Cada galeria possui um quadro de frente que alimenta o robô de projecção e o jumbo de furação. Os quadros, além da função de multiplicar circuitos, têm ainda a função de proteger os mesmos. Devem estar apetrechados de disjuntores para protecção dos condutores e diferenciais para a protecção dos utilizadores.

Os condutores são escolhidos mediante a distância que a corrente precisa percorrer para transporte de energia. Estes podem ser de alumínio ou cobre, sendo que a primeira hipótese é mais barata, enquanto que os segundos são muitas vezes alvo de furto, acarretando prejuízos óbvios.

Os condutores devem estar protegidos com tubo crepinado. A temperatura ambiente pode influenciar também o seu funcionamento.

De referir ainda a necessidade de instalação de uma rede de terra como condição de segurança para dissipar descargas acidentais.



Figura 93 - Quadro de distribuição e quadro de frente para alimentação de Jumbo e robô de projecção.

#### 4.12.5 Iluminação

A inexistência de luz natural em obras subterrâneas obriga à instalação de um sistema de iluminação de forma a providenciar uma boa visibilidade dentro do túnel e garantir:

- Boa visibilidade da frente de trabalho;
- A circulação com segurança na proximidade do túnel, interior e saída deste.

Assim, uma boa iluminação permite:

- Maior rapidez e perfeição na execução dos trabalhos subterrâneos e consequente aumento de produtividade e rendimento;
- Melhor e mais rápida mobilidade das máquinas, equipamentos e trabalhadores no interior do túnel, além de maior segurança de circulação.

Para efeitos de iluminação, foram colocados holofotes com lâmpadas de sódio e iodetos metálicos. Um imediatamente á entrada do túnel, um para iluminação da frente de escavação, e um para iluminação do exterior (para trabalhos nocturnos). Foram ainda instaladas luzes de 9 em 9 metros para efeitos de iluminação ao longo do comprimento do túnel, desde a boca até á frente de trabalho.



Figura 94 - Lâmpada fluorescentes para iluminação do interior do túnel e holofote de iluminação exterior.

#### 4.12.6 Estaleiro

A obra é servida por um estaleiro na proximidade da frente poente.

<b>Oficina de máquinas</b>		O estaleiro é servido por uma oficina de máquinas destinada ao arranjo de avarias dos equipamentos.
<b>Oficina de Aço</b>		A oficina de ferros destinada á produção de ferros para espaçadores entre cambotas, suportes de ventilação, e suportes para quadros eléctricos e armaduras de ferro
<b>Substâncias perigosas</b>		O armazenamento de substâncias perigosas é feito ao ar livre (com telheiro) na extremidade Norte do estaleiro
<b>Escritório</b>		Os escritórios encontram-se situados na extremidade sul do estaleiro em contentores metálicos acoplados, servidos por redes de electricidade, água potável, saneamento, ar condicionado e internet. Os escritórios estão dotados de instalações para direcção de obra, topografia e instrumentação, segurança e serviços administrativos, sala de reuniões, encarregado geral.
<b>Armazém</b>		Armazenamento de equipamentos, materiais, óleos e materiais de uso corrente.

Tabela 48 - Quadro resumo das instalações do estaleiro.

#### **4.12.7 Observação e controlo**

Para efeitos de controlo de execução da obra, importa ainda referir um programa de observação durante a obra.

Este programa pode ser dividido em dois tipos, o controle de assentamentos superficiais e deslocamentos profundos e o controlo de deslocamentos no interior das galerias.

Para o controlo de assentamentos superficiais e deslocamentos temos:

- Marcas topográficas de superfície;
- Medições de deslocamentos profundos com extensómetros de barras multiponto;
- Medições com inclinómetros;
- Medição da variação do nível de água com piezómetros;
- Medição de vibrações;
- Inspeção visual de taludes;
- Alvos topográficos.

Para o controlo de deslocamento no interior de galerias temos:

- Medição de convergências;
- Inspeção de betão projectado no interior do túnel;

#### **4.12.8 Localização**

A localização de alguns dos principais locais referidos neste documento encontra-se ilustrada na Figura 95.

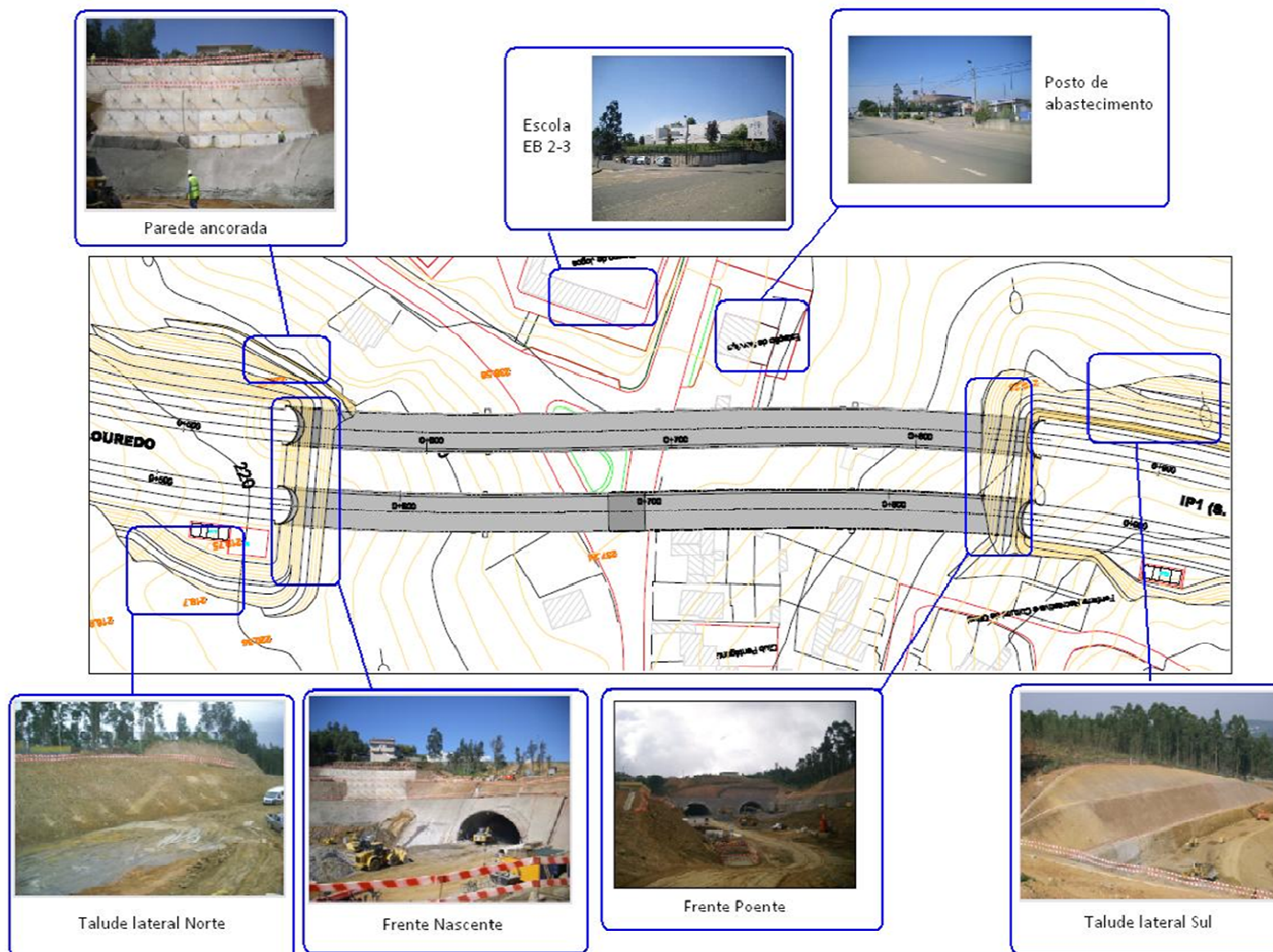


Figura 95 – Mapa ilustrativo da localização de alguns dos principais locais da obra

## 4.13 Zonamento Geotécnico do maciço intersectado

### 4.13.1 Introdução

Durante a escavação das galerias do túnel foi executado um levantamento das características geomecânicas das frentes de escavação de modo a desenvolver-se o zonamento geotécnico dos maciços intersectados.

O referido levantamento desenvolveu-se de modo sistemático nas galerias escavadas. As maiores dificuldades com que o levantamento de frentes se deparou foram os trabalhos de escavação com o martelo, a colocação de suporte primário (montagem de cambota e projecção de betão), e de pré-suporte (enfilagens). É de referir que o levantamento tem de ser realizado de forma expedita de modo a que os ciclos de produção não sejam interrompidos por um longo período de tempo, e devido também à perigosidade de execução destas operações em frentes cuja estabilidade é relativamente deficiente, centrando-se por isso estas no levantamento da atitude das discontinuidades, alteração do maciço, presença de água, enchimento, continuidade, abertura e rugosidade.

Foi feito o levantamento de 37 frentes de escavação no conjunto das 3 galerias escavadas. Foram registadas no total 200 discontinuidades, sendo estas de dois grandes tipos, nomeadamente planos de xistosidade e diáclases que intersectam o maciço. Especial atenção foi dada ao levantamento da atitude da xistosidade, devido à influência que esta vinha demonstrando sobre o rendimento obtido pelo martelo hidráulico, e porque esta se assume como o principal sistema de discontinuidade presente no maciço.



**Figura 96 - Medição de orientação da discontinuidade numa frente de escavação e ressalto com o martelo SilverSchmidt para avaliação da resistência á compressão.**

Os dados referentes aos levantamentos podem ser consultados nos anexos deste documento.

A Tabela 49 apresenta um resumo das características gerais do maciço interessado pela escavação juntamente com o número de discontinuidades levantados nas respectivas zonas.

Galeria	Zona geotécnica	Litologia	Nº de descontinuidades
Galeria poente norte	ZG2	Xisto de cor acastanhada e muito alterado e com baixa resistência á compressão.	43
	ZG3	Xisto de cor acinzentada com tons prateados. De resistência média á compressão. E presença de oxidação pontualmente	61
Galeria nascente norte	ZG2	Xisto de cor acinzentada com tons prateado/azulados. De resistência média á compressão. E presença de oxidação pontualmente	40
	ZG3	Xisto de cor acastanhada e muito alterado e com baixa resistência á compressão.	9
Galeria poente sul	ZG2	Xisto de cor acinzentada com tons prateados. De resistência média á compressão. E presença de oxidação pontualmente	10
	ZG3	Xisto de cor acastanhada e muito alterado e com baixa resistência á compressão.	37

**Tabela 49 – Características gerais da geotecnia do maciço intersectado.**

#### **4.13.2 Litologia**

A unidade litológica intersectada pela escavação foi a designada como xisto de fânzeres (Xe), considerado um micaxisto. A cor do material apresentava variações desde o acastanhado, sobretudo localizado nas imediações dos emboquilhamentos (taludes) e que corresponde a um maciço de maior grau de alteração e por vezes decomposto, até o cinza prateado, que surgiu á medida que se avançou nas galerias do túnel e que corresponde a uma litologia de menor grau de alteração. De notar ainda a presença de vestígios de matéria orgânica nas descontinuidades do maciço e a presença de pirite, assim como a presença de filonetes de quartzo. Importa por fim observar que o maciço se apresentava extremamente dobrado.

#### **4.13.3 Descontinuidades**

De modo a definirem-se as famílias que intersectam o maciço foi levantada sua atitude (direcção e pendor) mediante o uso de um clinómetro ou bússola de geólogo. Os dados registados foram tratados informaticamente através do software Dips v. 5.1 da ROCSCIENCE, com o qual foi possível obter a sua projecção estereográfica. Este processo foi feito de modo separado para os dois tipos de descontinuidades levantados.

#### 4.13.3.1 Galeria poente norte

##### 4.13.3.1.1 Planos de xistosidade

Como já foi referido, os planos de xistosidade assumem-se como o principal sistema de descontinuidades presente no maciço, importando por isso perceber a sua orientação relativamente à direcção de avanço das diferentes galerias.

Na galeria poente norte temos, como se pode observar pela Tabela 50, a xistosidade contra a orientação do túnel. Os planos apresentam duas orientações que demonstram as dobras que afectam todo o maciço. Esta é uma situação razoável do ponto de vista da estabilidade da frente e da galeria.

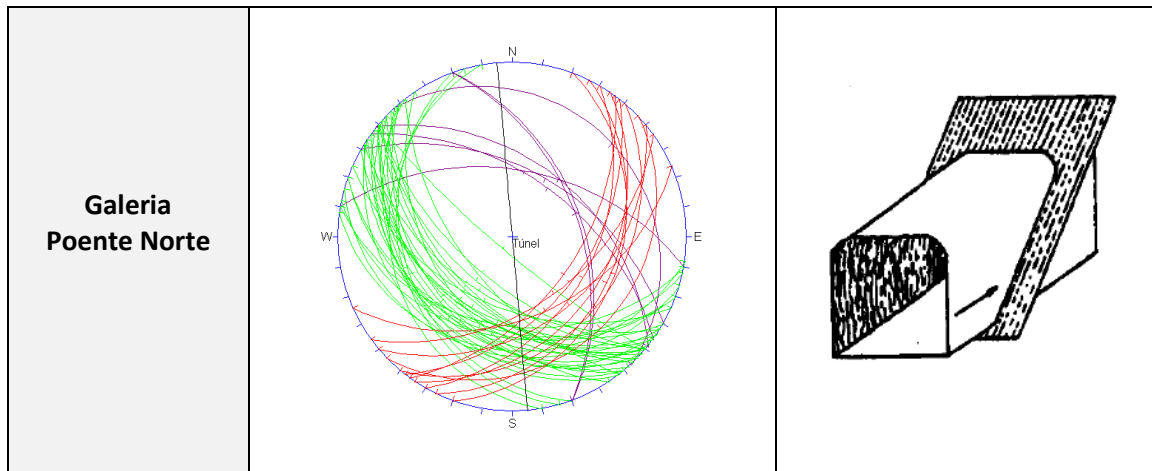


Tabela 50- Atitude da xistosidade na galeria poente norte (n=55).

##### 4.13.3.1.2 Descontinuidades

Por sua vez as diáclases apresentam-se no seguinte diagrama de contorno estrutural da Figura 97.

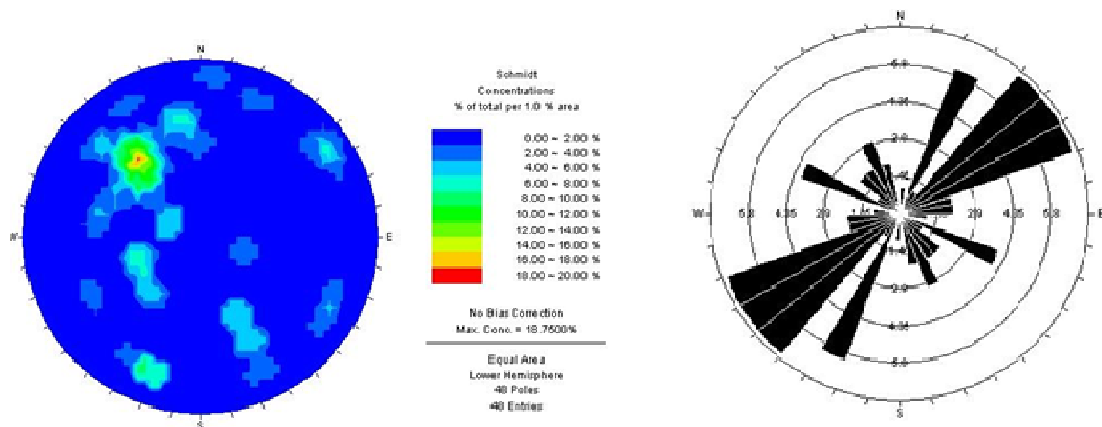


Figura 97 - Projecção estereográfica das diáclases levantadas na galeria poente norte (n=48).

Observando a Figura 97 é possível verificar a existência de uma família de diáclases. Porém, os dados não são suficientes para se obterem conclusões satisfatórias, sendo que para o efeito seria necessário acompanhar a escavação por mais alguma extensão de modo a obter-se mais informação. De qualquer modo, é perfeitamente delineada a existência de uma família com uma orientação entre os N 40-70E e de pendor 50NW.

#### 4.13.3.2 Galeria nascente norte

##### 4.13.3.2.1 Atitude da xistosidade

Na galeria nascente norte temos, como se pode observar pela Tabela 51 a xistosidade contra a orientação do túnel. Aqui também, os planos apresentam duas atitudes diferentes, resultantes do dobramento do maciço.

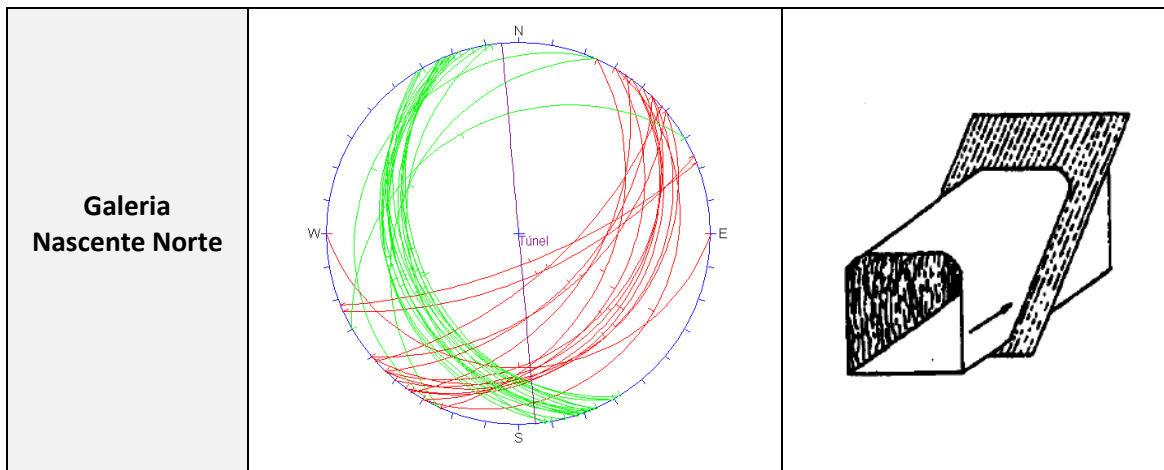


Tabela 51 - Atitude da xistosidade na galeria nascente norte (n=31).

##### 4.13.3.2.2 Planos de diáclases

Por sua vez as diáclases apresentam-se no seguinte diagrama de contorno estrutural da Figura 98.

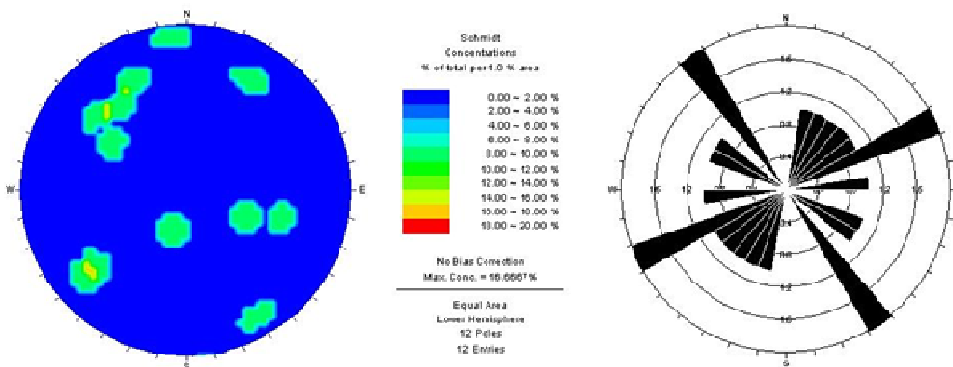


Figura 98 - Projecção estereográfica das diáclases levantadas na galeria poente sul (n=12).

Com somente 12 diaclases levantadas nesta galeria torna-se difícil definirem-se famílias principais. De qualquer modo, mediante a observação da Figura 98, é possível visualizar a tendência de algumas diaclases em agruparem-se segundo as atitudes N 60-70 E e pendor 50NW e 70SW.

#### 4.13.3.3 Galeria poente Sul

##### 4.13.3.3.1 Atitude da xistosidade

Na galeria poente sul temos também, como se pode observar pela Tabela 52, a xistosidade contra a orientação do túnel. Aqui também os planos apresentam duas atitudes diferentes, resultante do dobramento do maciço embora não seja tão evidente.

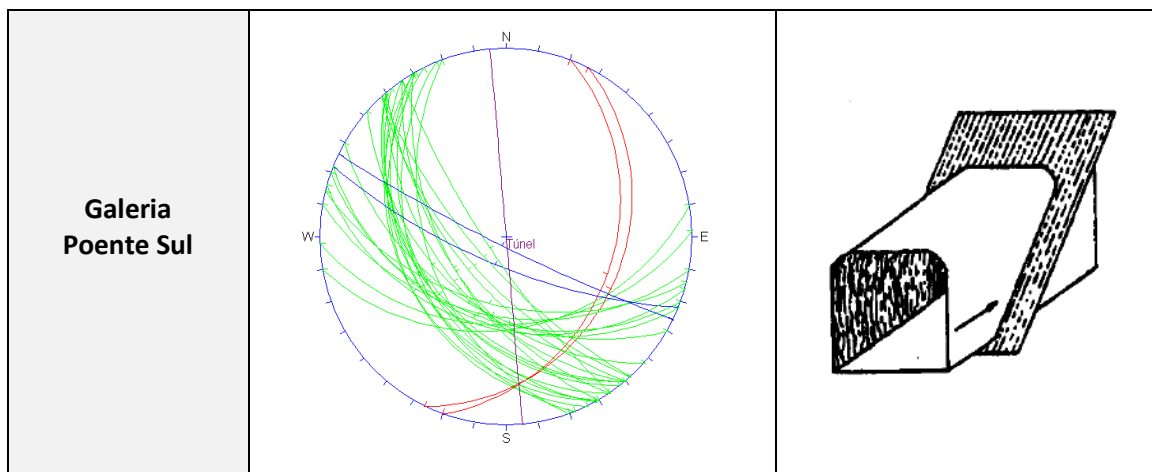


Tabela 52 - Atitude da xistosidade na galeria poente Sul (n=36).

##### 4.13.3.3.2 Planos de diaclases

Por sua vez as diaclases apresentam-se no seguinte diagrama de contorno estrutural da Figura 99.

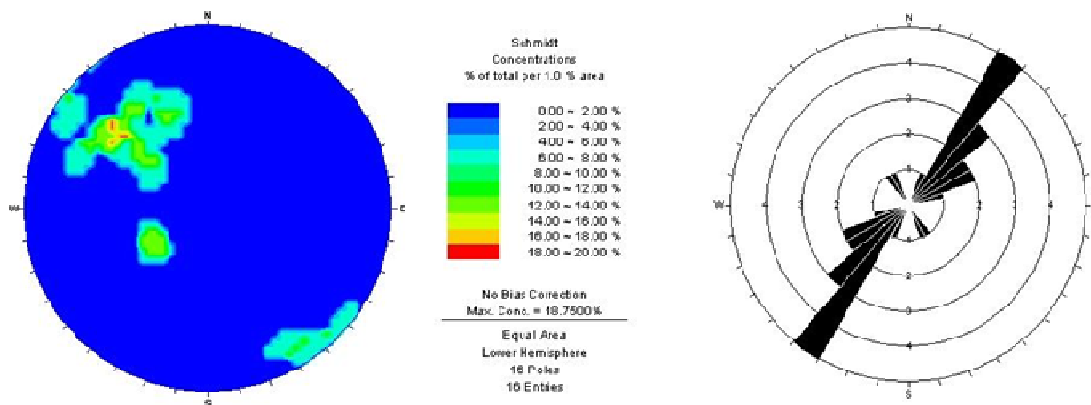


Figura 99 - Projecção estereográfica das diaclases levantadas na galeria nascente norte (n=16).

Com 16 diáclases levantadas, também aqui se torna difícil retirar conclusões esclarecedoras, Porém é perfeitamente visível a presença de uma família de orientação N30-40E e pendor 50NW.

#### 4.13.4 Alteração

A alteração do maciço nas galerias escavadas variou desde o W5 (completamente alterada) até o W3 (moderadamente alterado).

**Galeria ponte norte** – A alteração do maciço nesta galeria variou desde o W5 até o W3 a medida que se avançava na escavação. A percentagem de cada uma das alterações encontra-se na Figura 100.

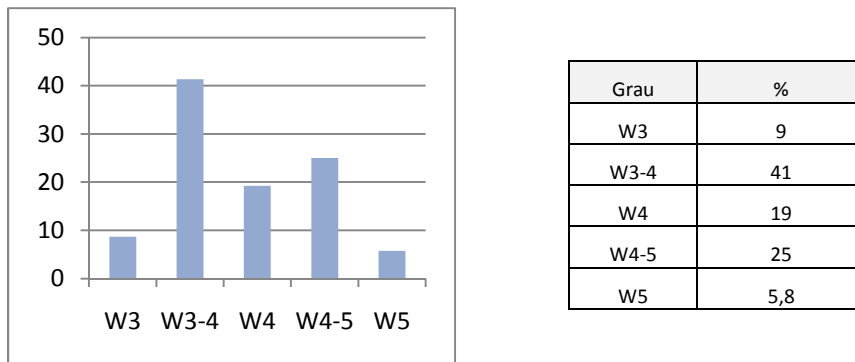


Figura 100 - Percentagem dos diferentes graus de alteração encontrados na galeria Poente Norte.

**Galeria Nascente Norte** – A alteração do maciço apresenta-se entre o W4 (muito alterado) e o W3-4 (moderadamente alterado). A percentagem de maciço escavado para cada tipo de alteração encontra-se no gráfico da Figura 101.

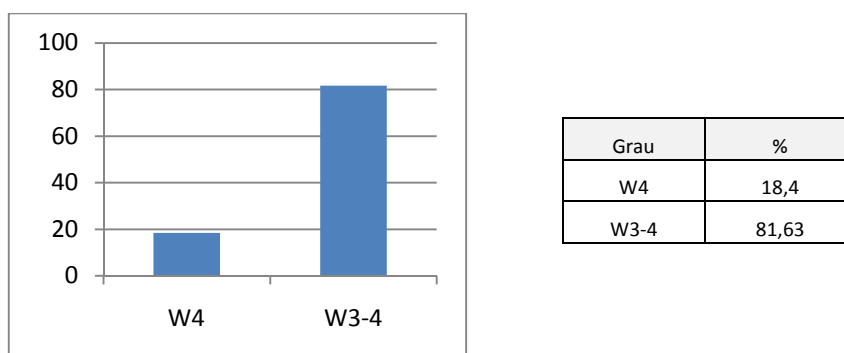


Figura 101 - Percentagem dos diferentes graus de alteração encontrados na galeria Nascente Norte.

#### 4.13.5 Fracturação

O maciço escavado nas galerias Poente Sul e Nascente Norte é na sua maioria muito fracturado (F4-5). Relativamente á galeria poente norte a fracturação do maciço interessado encontra-se entre o F4 e o F5. A Figura 102 apresenta as percentagens de fracturação para o conjunto das galerias.

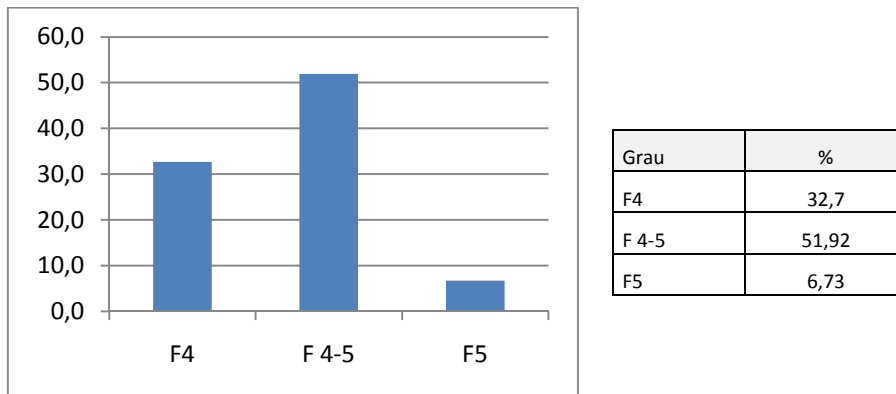


Figura 102- Percentagem dos diferentes graus de alteração encontrados na galeria Poente Norte.

#### 4.13.6 Tipos de descontinuidades

Os tipos de descontinuidades intersectadas pela escavação foram diáclases, planos de xistosidade, e uma falha situada na galeria nascente norte. As figuras seguintes demonstram a percentagem de cada tipo de descontinuidade levantadas para o estudo.

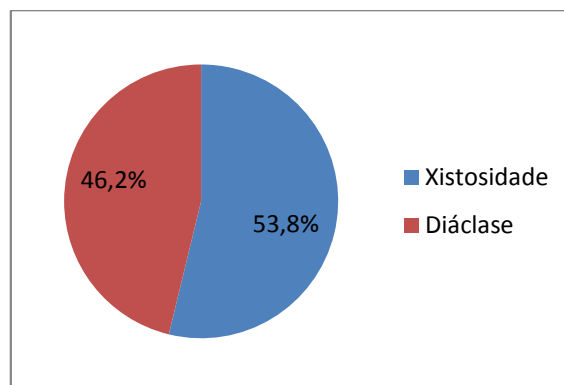


Figura 103 - Percentagem dos diferentes tipos de descontinuidade encontrados na galeria Poente Norte.

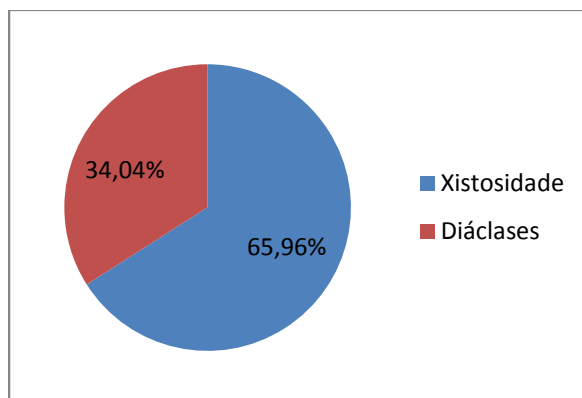


Figura 104 - Percentagem dos diferentes tipos de descontinuidade encontrados na galeria Poente Sul.

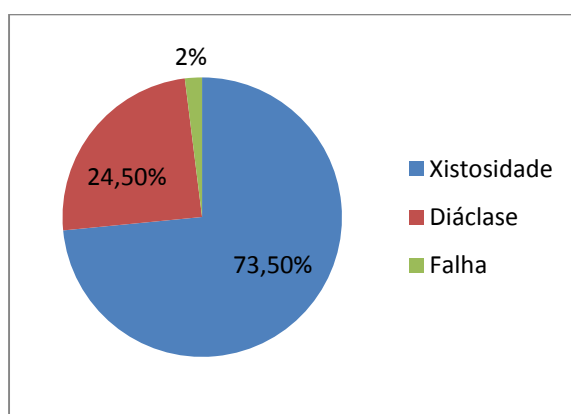


Figura 105 - Percentagem dos diferentes tipos de descontinuidade encontrados na galeria Nascente norte.

#### 4.13.7 Abertura

A abertura das descontinuidades variou entre a aberta e a fechada segundo as percentagens que se encontram evidenciadas da Figura 106 a Figura 108.

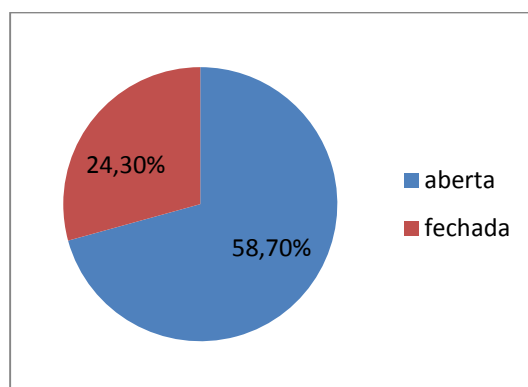
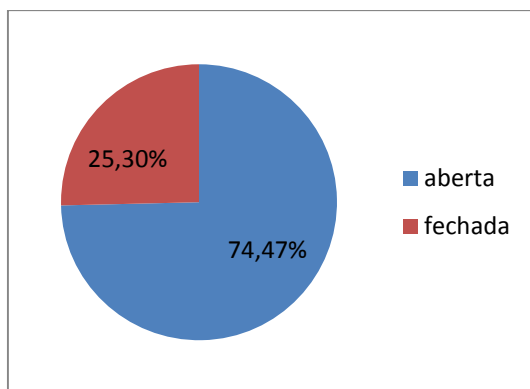
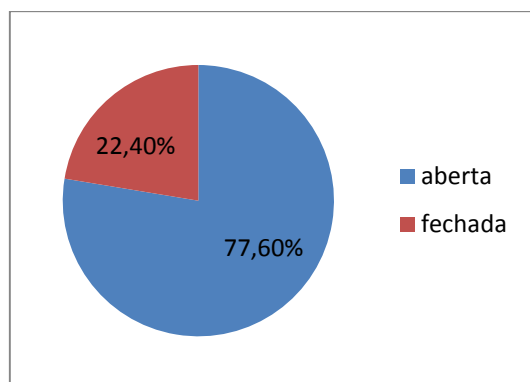


Figura 106 - Percentagem dos diferentes tipos de abertura encontrados na galeria Poente Norte.



**Figura 107 - Percentagem dos diferentes tipos de abertura encontrados na galeria poente sul.**



**Figura 108 - Percentagem dos diferentes tipos de abertura encontrados na galeria nascente norte.**

#### **4.13.8 Rugosidade**

A rugosidade das discontinuidades era lisa a pouco rugosa (R2).

#### **4.13.9 Enchimento**

O enchimento das discontinuidades era na sua grande maioria argiloso e ocasionalmente apresentava vestígios de matéria orgânica.

#### **4.13.10 Água**

A água presente no maciço encontrava-se sob a forma de ligeira humidade, ocorrendo pontualmente alguma escorrência.

#### **4.13.11 Outras observações**

O maciço apresentava vestígios de pirite, assim como intrusões de quartzo. Em certas áreas o material apresentava oxidação.

#### 4.13.12 Resistência à compressão uniaxial

A avaliação de resistência à compressão uniaxial foi avaliada mediante dois métodos.

O primeiro foi a utilização de um martelo Silver Schmidt. O segundo, e uma vez que este parâmetro é de grande importância para a avaliação de métodos de desmonte de rocha, foi a execução de ensaios “*Point Load Test*” sobre amostras recolhidas nas frentes de escavação de modo a obterem-se valores viáveis que confirmassem os obtidos pelo martelo Schmidt, e possibilitassem a escolha de métodos de escavação alternativos no caso de necessidade.

##### 4.13.12.1 Martelo SilverSchmidt

A avaliação da resistência à compressão foi feita utilizando o martelo SilverShmidt. Os dados são guardados na memória interna do martelo e posteriormente descarregados e tratados informaticamente mediante um programa complementar.

O equipamento não obteve valores válidos onde o maciço apresentava valores de alteração W 4-5, pressupondo-se por isso que a resistência à compressão uniaxial se situe em valores inferiores a 25 Mpa.

Para ZG2 foram obtidos valores representativos do maciço em questão. O martelo foi utilizado segundo a sua orientação perpendicular à frente exposta do maciço. Foram utilizados 14 estações, 6 em poente norte, 7 em nascente norte e uma em poente sul, onde se escavou em ZG2 somente em finais de Julho.

Galeria	PK	Valor resistência à compressão (N/mm <sup>2</sup> )	Designação			
Poente norte	0+814,5	31,0	S3	Resistência à compressão média		
	0+810,6	23				
	0+807,6	26,5				
	0+800,95	26,5				
	0+797,5	31,5				
	0+794,85	29				
Nascente norte	0+562,4	25,5				
	0+564,7	29				
	0+575,65	37,5				
	0+579,6	27				
	0+582,9	34,5				
	0+584,4	34				
Poente Sul	0+816,9	24,5				

**Tabela 53 – Valores de resistência á compressão obtidos nas respectivas estações geomecânicas.**

Para maciços W3 obtiveram-se valores médios entre os 23 e os 37,5 N/mm<sup>2</sup> (S3). Os resultados obtidos no programa complementar do martelo Silver Shmidt encontram-se no anexo 2.

#### 4.13.12.2 Point Load Test

##### 4.13.12.2.1 Recolha de amostras

As amostras destinadas ao ensaio foram recolhidas nas três galerias escavadas até finais do mês de Julho do ano 2010, nomeadamente as galerias Norte e Sul a poente e a galeria Norte a nascente.

As amostras foram recolhidas das frentes de escavação das respectivas galerias na fase mais avançada (1ª fase), pois era aquela de onde se poderiam obter resultados mais fiáveis para a selecção de métodos de escavação. As amostras eram retiradas em distâncias mínimas de 4 metros entre elas, para que fossem representativas da máxima extensão de maciço possível e assim mais fiáveis. A tarefa encontrava as suas maiores adversidades nos trabalhos de escavação que se desenvolviam nos locais de recolha.



Figura 109 – Recolha de amostra na frente de escavação.

##### 4.13.12.2.2 Preparação dos provetes

As amostras foram posteriormente transportadas para o laboratório de Solos e rochas do Departamento de Engenharia Geotécnica e Geoambiente do ISEP, devidamente etiquetadas relativamente à galeria e PK onde foram recolhidas, e uma vez terminada a recolha foram talhadas por meio de uma máquina de corte UNIVERSAL B300.



Figura 110 - Corte das amostras e amostras e vista das amostras organizadas por galerias e PKs.

Os provetes foram agrupados e ordenados segundo as respectivas galerias e pelos respectivos PKs, em crescendo.



**Figura 111 - Colocação do provete e ensaio deste nos laboratórios de Mecânica das rochas do LGMC – ISEP.**

Dada a natureza dos provetes a ensaiar, foi seguida a metodologia utilizada para fragmentos irregulares, sendo no mínimo ensaiadas 10 amostras por galeria. Com o auxílio de um paquímetro foram medidas as dimensões dos provetes e devidamente anotadas, tendo em atenção as normas do ensaio, nomeadamente a largura ( $W$ ), calculada mediante a equação[2].

A máquina de ensaio utilizada foi a (ELE Point Apparatus, modelo 77-0110).



**Figura 112 - Ensaio do provete nos laboratórios de Mecânica das rochas do LGMC – ISEP.**

Os provetes a ensaiar foram então colocados na máquina de modo a que o eixo de carga permanecesse perpendicular à xistosidade, de forma a obter-se a maior resistência possível da rocha (Hoek, Marinos, 2010), uma vez que se pretendia o dimensionamento de metodologias de escavação tendo em conta a pior situação possível, e de modo a garantir que os resultados fossem o mais possível independentes dos planos de fraqueza estrutural da rocha.

Sempre que a rotura passou por apenas um dos pontos de carga o ensaio foi rejeitado.

A recolha de amostras desenvolveu-se durante as últimas semanas de Julho, e estendeu-se por 10 Pks diferentes nas 3 galerias escavadas (quatro para a galeria poente norte, quatro para a galeria nascente norte e duas para a galeria poente sul). O número de amostras recolhidas foi inferior nesta última, por se terem desenvolvido menores avanços durante o período de recolha e os trabalhos que ocorreram no local não terem possibilitado uma adequada recolha.

Assim, a tabela seguinte demonstra os Pks em que foram recolhidas as amostras das respectivas galerias.

Galeria	Pk	Nº de amostras	Nº total em cada galeria	Total de amostras ensaiadas
Galeria poente norte	791,8	3	17	43
	793	6		
	794	5		
	796	3		
Galeria poente sul	822,5	6	10	
	823,25	4		
Galeria nascente norte	586	4	16	
	586,2	5		
	587	4		
	587,75	3		

**Tabela 54 - Resultados obtidos nos ensaios dos provetes nos laboratórios de Mecânica das rochas do LGMC – ISEP.**

Os resultados dos ensaios encontram-se disponíveis para consulta no anexo 2 deste documento. Não foram contabilizados os ensaios onde o ponto de rotura não passou pela perpendicular da amostra, mas sim pela xistosidade desta, o que ocorreu com 5 amostras (duas nas amostras de poente norte, duas nas amostras de nascente norte e uma a poente sul). Embora as regras refiram a eliminação dos dois maiores e dois menores valores, optou-se por eliminar somente o primeiro e último valor, dado o reduzido número de amostras recolhidas.

#### **4.13.12.2.3 Resultados**

Importa aqui referir que a resistência à compressão uniaxial obtida pelos ensaios à resistência à carga pontual, é somente uma aproximação e nunca um valor absoluto. A resistência uniaxial ( $C_0$ ) é cerca de 20 a 25 vezes a resistência à carga pontual. Hoek e Paul Marinos (2000) apontam -nos para a multiplicação pelo valor 24, no caso de formações xistosas.

Os resultados encontram-se expostos na Tabela 55

Galerias	Zona geotécnica	Ls (50) (MPa)	CO (MPa)
Poente Norte	ZG2	1,55	37,2
Poente Sul	ZG2	1,15	27,6
Nascente Norte	ZG2	1,34	33,16

**Tabela 55 – Resultados obtidos nos ensaios dos provetes nos laboratórios de Mecânica das rochas do LGMC – ISEP.**

Comparado com os valores em projecto obtidos para ZG2 temos:

Em projecto		Em obra
Resistência á carga uniaxial	Resistência á carga diametral	Em blocos irregulares
0,99-2,49	0,09-0,38	1,15 – 1,55

**Tabela 56 – Comparação de resultados obtidos em projecto e em obra.**

Os valores são próximos aos obtidos com o martelo Silverschmidt que recordamos aqui, deram valores entre 24 e os 37,5 Mpa.

#### **4.13.13 Classificações**

Após a recolha e tratamento dos dados em obra, foram utilizadas as classificações propostas por Bieniawski, Barton e Hoek, por forma a caracterizar-se o maciço e as zonas geotécnicas intersectadas. A aplicação das classificações teve como base os parâmetros mencionados e encontra-se disponível para consulta nos anexos deste documento.

Após a sua aplicação foram então obtidos os valores demonstrados na Tabela 57 e na Tabela 58.

ZG3		
Classificação	Em projecto	Em obra
RMR	<30	28
Q	-	0,023
GSI	15-30	15-25

**Tabela 57 - Quadro comparativo entre os valores das classificações em ZG3.**

ZG2		
Classificação	Em projecto	Em obra
RMR	30-45	47
Q	-	0,13
GSI	28-45	20-35

**Tabela 58 - Quadro comparativo entre os valores das classificações em ZG2.**

Como se pode observar na Tabela 57 e na Tabela 58 os valores obtidos seguem em traços gerais os valores obtidos em projecto, à excepção do valor de RMR obtido para ZG2 que ultrapassou este.

#### **4.13.14 Considerações finais**

Tendo em conta os resultados obtidos procedemos então ao resumo das duas zonas geotécnicas intersectadas.

##### **4.13.14.1 Zona geotécnica 3**

A zona geotécnica 3 é a primeira com que a escavação tomou contacto e encontra-se presente nos primeiros metros das 3 galerias escavadas. O maciço apresenta uma cor acastanhada e material muito decomposto, dobrado e fracturado. A resistência à compressão uniaxial é muito baixa como foi possível observar pela dificuldade de se obterem valores de ressalto do martelo SilverSchmidt (o que denota valores de resistência à compressão inferiores a 25 MPa). Situação que pode ainda ser demonstrada, através da maior facilidade com que o material rocha foi desmontado pelo martelo de escavação.



**Figura 113 – Zona geotécnica 3.**

##### **4.13.14.2 Zona geotécnica 2**

A zona geotécnica 2 surgiu em todas as galerias escavadas. Trata-se de um maciço de cor acinzentada com um grau de alteração médio (W 3 a W 3 - 4), bastante fracturado e xistoso. Na galeria a passagem de um ZG3 a ZG2 encontrava-se delimitada pela presença de uma falha como se pode observar na Figura 114. A resistência à compressão uniaxial da rocha é superior aos 25 MPa e pode atingir os 37 MPa. Neste maciço surgiram as principais dificuldades de escavação com o martelo, com avanços na ordem dos 0,63 metros por dia.

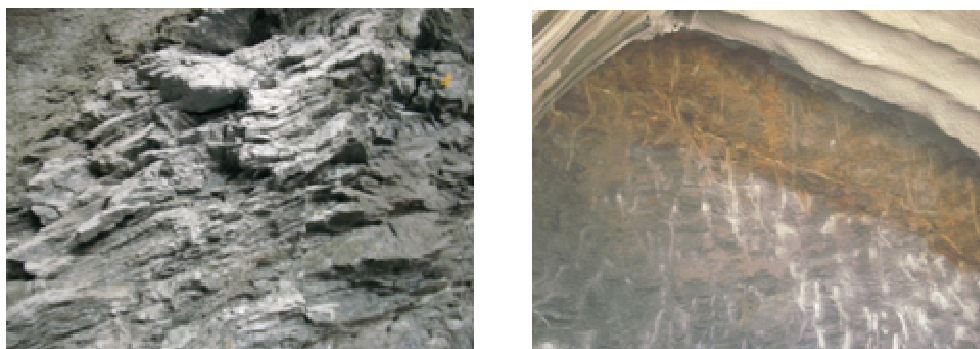


Figura 114 – Planos de xistosidade visíveis na frente de escavação e vista da falha que separa ZG2 e ZG3.

#### 4.13.14.3 Delimitação das zonas

As zonas encontram-se delimitadas segundo os PKs indicados na Tabela 59.

Galeria		Zona geotécnica		
			PK inicio	PK final
Poente	Norte	ZG3	0+860	0+806
		ZG2	0+805,3	0+791,8
	Sul	ZG3	0+850,2	0+822,8
		ZG3	0+820,8	0+820
Nascente	Norte	ZG2	0+550	0+565
		ZG3	0+565,6	0+588,3
	Sul	ZG2	-	-
		ZG3	-	-

Tabela 59 – Delimitação das zonas geotécnicas nas diferentes galerias escavadas.

### 4.14 Propostas de sustimento

#### 4.14.1 RMR

Através da consulta da Tabela 60 obtemos a seguinte proposta de sustimento para as zonas geotécnicas 2 e 3.

III	Calote e rebaixo 1,5 a 3 metros de avanço na calote. Sustimento após desmonte. Sustimento completo a 10 metros da frente de escavação.	Sistemáticas no tecto e hasteal. Comprimento de 4 metros. Espaçadas de 1,5 a 2 metros. Malha no tecto	50 a 100 mm na coroa e 30 mm nos hasteais	nenhuma
IV	Calote e rebaixo 1 a 1,5 metros de avanço na calote. Sustimento em simultâneo com a escavação até 10 metros da frente.	Sistemáticas no tecto e hasteal. Comprimento de 4 a 5 metros. Espaçadas de 1,0 a 1,5 metros. Com Malha.	100 - 150 mm na coroa e 100 mm nos hasteais.	Ligeiras a médias espaçadas 1,5 metros onde seja necessário.

— ZG2  
— ZG3

Tabela 60 - Proposta de sustimento para diferentes valores de RMR (adaptado de Bieniawski,1989)

#### 4.14.2 Q de Barton

Para o dimensionamento de suporte pelo método de Barton é necessário o cálculo do diâmetro equivalente do túnel mediante o seu ESR (Earth Support Ratio)

Tipo de escavação	ESR
Túneis piloto	2,0
Túneis para água e esgotos	1,5
Túneis de tráfego	0,5 a 1 <sup>1</sup>

Tabela 61 - ESR em função do tipo de escavação (adaptado de Bieniawski, 1989).

Cálculo da dimensão equivalente:

$$DE = \frac{L}{ESR} = \frac{16,5}{1} = 16,5 \quad [17]$$

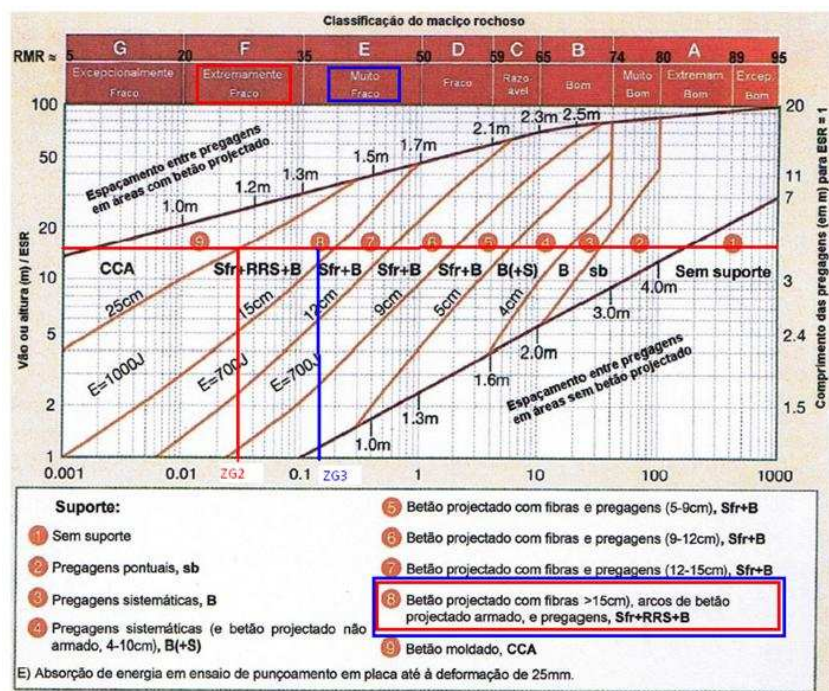


Figura 115 - Suporte para escavação (adaptado de Barton, 1995).

As propostas obtidas para suporte encontram-se assim representadas nas tabelas seguintes.

<sup>1</sup> 0,5 deve ser utilizado no caso de longos túneis destinados a comboios de alta velocidade e de tráfego automóvel. Uma vez que o túnel escavado apresenta um comprimento de cerca de 310 metros, utilizou-se o valor de ESR de 1 para o cálculo do diâmetro equivalente.



Zona Geotécnica	Figura	Barton et al. (1974)	Bieniawski (1981)	Em projecto (COBA, 2010)
Zona geotécnica 3	<ul style="list-style-type: none"> <li>• </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pregagens de 1,0 a 1,2 metros e de 4 metros de comprimento.</li> <li>• Betão projectado com fibras &gt; 15 cm.</li> <li>• Necessidade de cambotas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pregagens sistemáticas no tecto e hasteal de comprimento de 4 a 5 metros espaçadas de 1,0 a 1,5 metros com malha.</li> <li>• 100 - 150 mm de betão projectado na coroa e 100 mm nos hasteais.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pregagens de frente Y35 de 12 metros de comprimento e 3 de sobreposição</li> <li>• Betão projectado reforçado com fibras metálicas numa espessura de 250 mm.</li> <li>• Cambotas metálicas treliçadas tipo PS 115 20 30 com pata de elefante e afastados 1m.</li> <li>• Enfilagens armadas com varão de aço de 32 mm de diâmetro</li> </ul>
Zona geotécnica 2	<ul style="list-style-type: none"> <li>• </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pregagens a 1,3 a 1,5 metros e de 4 metros de comprimento.</li> <li>• Betão projectado com fibras &gt; 15 cm.</li> <li>• Necessidade de cambotas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pregagens sistemáticas no tecto e hasteal de 4 metros de comprimento. Espaçadas de 1,5 a 2 metros com malha no tecto.</li> <li>• 50 a 100 mm de betão projectado na coroa e 30 mm nos hasteais.</li> <li>• Cambotas metálicas ligeiras a médias espaçadas 1,5 metros onde seja necessário.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pregagens Tipo Swellex de 6 metros de comprimento em malha 1,5 x1,5m desfasadas em quincôncio.</li> <li>• Pregagens de frente Y35 de 12 metros de comprimento pontualmente.</li> <li>• Betão projectado reforçado com fibras metálicas numa espessura de 150 mm a 200 mm</li> <li>• Cambotas metálicas treliçadas tipo PS 115 20 30 com pata de elefante e afastados 1,25m a 1,5m.</li> </ul>

Tabela 62 - Comparação de resultados entre Barton, Bieniawski e o utilizado em projecto.

#### 4.14.3 Comentários finais relativos ao suporte.

Relativamente ao sustimento importa fazer algumas considerações finais.

O dimensionamento proposto por Bieniawski refere-se à experiência sobre rochas competentes submetidas a tensões médias e as propostas limitam-se a túneis de vão de 10 metros, em forma de ferradura escavados com explosivos, pelo que as propostas explanadas na Tabelas 62 deverão ser tidas em conta somente como guia de orientação de suporte e comparação.

De referir que a maior parte do terreno escavado foi em domínio de emboquilhamento, que abarca cerca de 60 e 65 metros para as galerias norte e Sul, respectivamente (valores relativos a cada frente de avanço).

Assim, o suporte utilizado foi o previsto para emboquilhamento, pelo que foi dimensionado tendo em conta não só a informação relativa às condições geológico-geomecânicas, como também às condicionantes de natureza geométrica/ topográfica.

#### 4.15 Análise de produções e rendimentos

A construção do túnel propriamente dito teve início em finais de maio e foram registadas produções até finais de julho.

Os avanços registados na obra e a produção diária, foram registados diariamente por forma a poder-se estudar o impacto das condicionantes sobre a efectiva produção do túnel.

Assim ao longo dos cerca de dois meses inciou-se a escavação da galeria norte na frente poente à medida que decorriam ainda os trabalhos para os taludes do lado sul. A Tabela 63 demonstra uma síntese dos metros escavados.

	Fase	PK início	PK fins de junho	Metros escavados	Volumes escavados (m3)	Volume total (m3)
Galeria poente norte	1ª fase	0+860	0+791,8	64,9	3473,07	8748.6
	2ª fase	0+860	0+823,5	36,9	1152,39	
Galeria poente sul	1ª fase	0+850	0+823,05	26,95	1442,20	
	2ª fase	0+850	0+820	10,95	341,88	
Galeria nascente norte	1ª fase	0+550	588,3	36,3	1942,56	
	2ª fase	0+550	562,7	12,7	396,494	
Galeria nascente sul	1ª fase	0+540,7	-	-	-	
	2ª fase	0+540,7	-	-	-	

Tabela 63 – Escavação efectuada até finais de Junho.

##### 4.15.1 Produção do túnel

De seguida apresentam-se os avanços e produções do túnel registados até finais do mês de Julho.

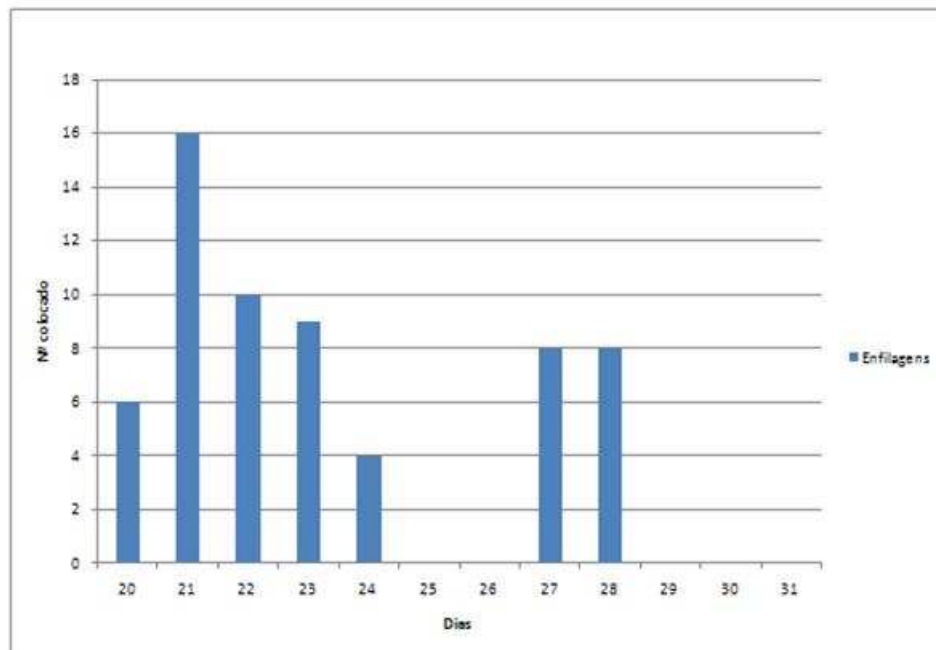
#### 4.15.1.1 Maio

Os trabalhos no local iniciaram-se a 20 de Maio de 2010 com a colocação das primeiras microestacas destinadas a pré suporte da escavação na galeria ponte norte. Como se pode verificar através da observação do gráfico da Figura 116, o maior número de estacas colocadas foi no dia 21, com 16 microestacas colocadas em 24 horas, o que perfaz uma média de 0,67 microestacas por hora. O menor número de microestacas colocadas foi no dia 24, último dia da semana de trabalho e que não completa as 24 horas diárias. Os dias 25 e 26 de Maio foram a paragem para fim-de-semana. Os trabalhos reiniciaram-se a 27 de Maio e terminaram a 28 de Maio.

A Tabela 64 demonstra a produção total para o mês de Maio.

			Totais	
Galeria Poente Norte	Avanços	Calote	1	0
			2	0
	Sustimento		Microestacas	61
			Fibras de vidro	16

**Tabela 64 – Produção de mês de Maio.**



**Figura 116 - Produção de enfilagens em Maio.**

#### 4.15.1.2 Junho

A escavação da galeria poente norte teve início no dia 1 de Junho de 2010, e obtiveram-se avanços médios de 1,7 metros/dia na primeira fase, como se pode observar através da análise da Figura 117. As principais quedas de produção ocorreram devido às avarias de gerador e também devido e obviamente às paragens para fim-de-semana que ocorreram de 15 em 15 dias. O maciço escavado pertence à zona geotécnica 3. É possível verificar também a diminuição de produção durante os períodos de colocação de enfilagens, nomeadamente nos dias 5, 6, 17 e 22. As produções mensais para a galeria poente norte encontram-se na Tabela 65.

				Totais	
Galeria Poente norte	Avanços	Calote(m)	1	44,1	
			2	15,25	
	Sustimento	Enfilagens			92
		Perfis metálicos	PS 115 20 30	1ª fase	51
				2ª fase	23
		Fibras de vidro			25
		Perfis provisórios			46

**Tabela 65 – Produção de mês de Junho para a galeria poente norte.**

Em Junho, também ocorreu o início dos trabalhos na galeria norte mas do lado nascente (emboquilhamento de entrada), com a colocação do chapéu duplo de microestacas no dia 7 (ver Figura 63).

O maior número de estacas colocadas deu-se nos dias 10 e 14, em que se colocaram 16 microestacas em 24 horas perfazendo uma média de 0,67 microestacas por hora como já havia ocorrido em Maio. No dia 18 começaram os trabalhos de escavação propriamente ditos, obtendo-se avanços médios de 1,5 metros por dia, valor mais baixo que o ocorrido do lado poente da galeria norte e que pode ser explicado pelo começo de escavação da zona geotécnica 2 ao dia 25 do mês. As quebras de produção mais acentuadas ocorreram no dia 26 de 26 e 27 com as paragens para fim-de-semana e nos dias 29 e 30 com o começo de colocação de um chapéu de enfilagens. A Tabela 66 apresenta as produções totais do mês para a galeria nascente norte

				Totais	
Galeria nascente norte	Avanços	Calote (m)	1ª fase	13,8	
			2ª fase	7,4	
	Sustimento	Enfilagens			30
		Microestacas			94
		Perfis metálicos	PS 115 20 30	1ª fase	14
				2ª fase	8
		Perfis provisórios			6
Fibras de vidro			15		

**Tabela 66 - Produção de mês de Junho para a galeria nascente norte.**

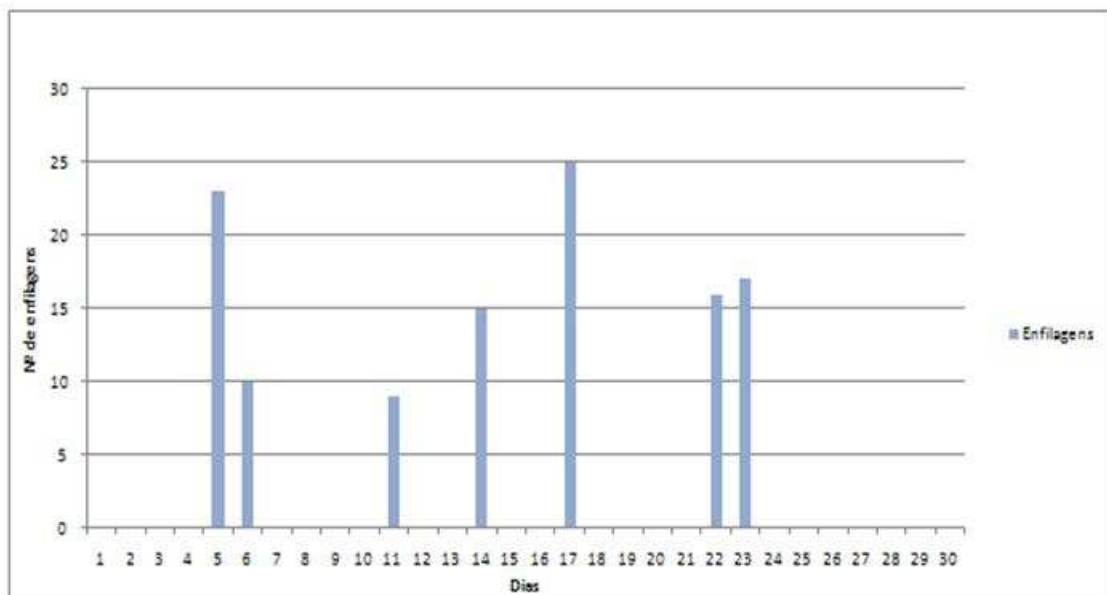
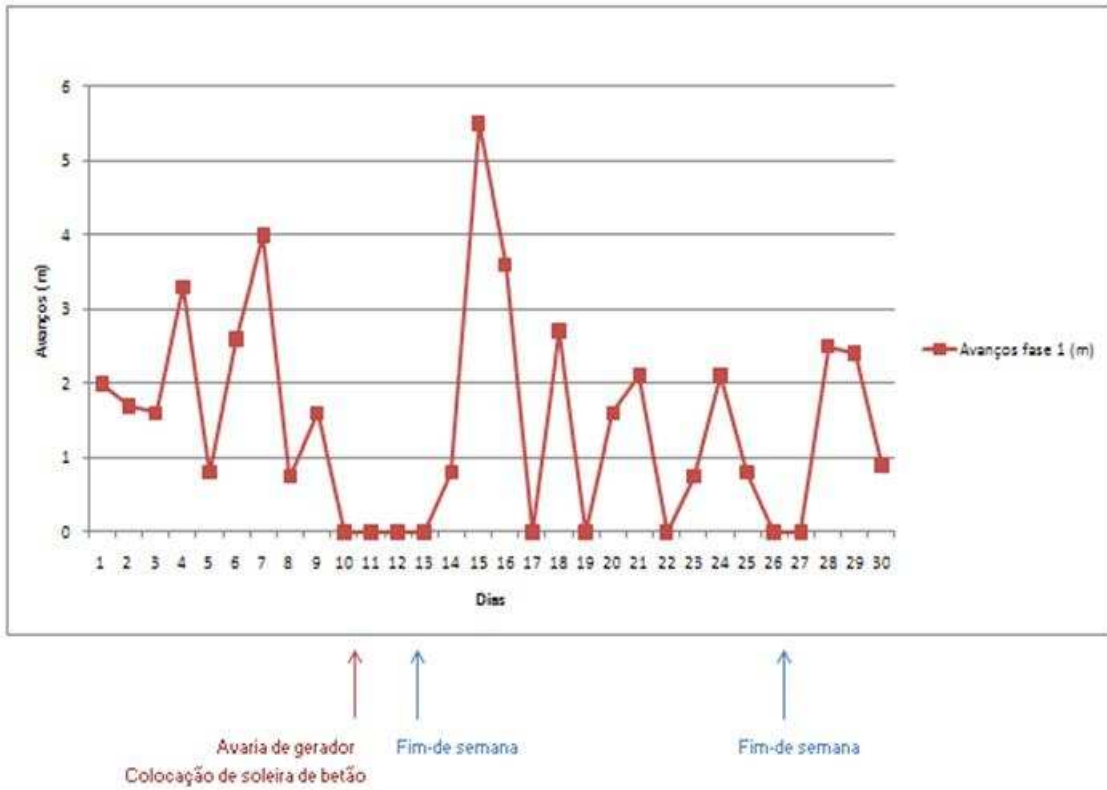


Figura 117 - Avanços na primeira fase e produção de enfilagens na galeria poente norte no mês de Junho.

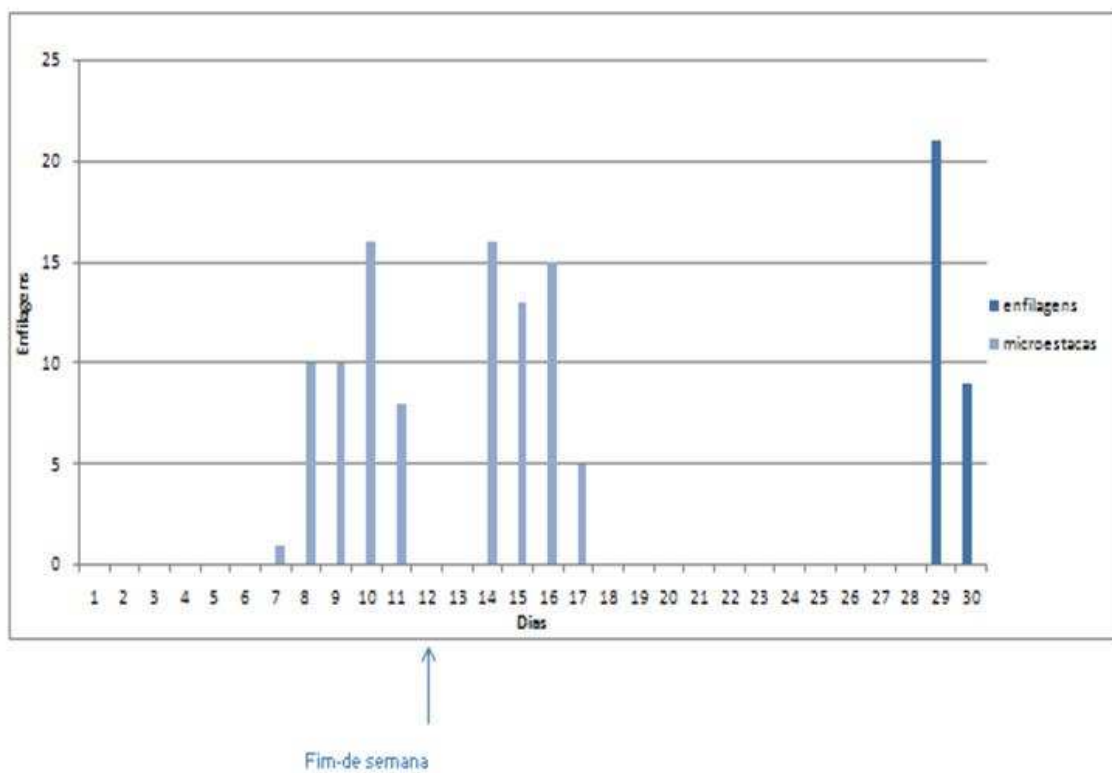
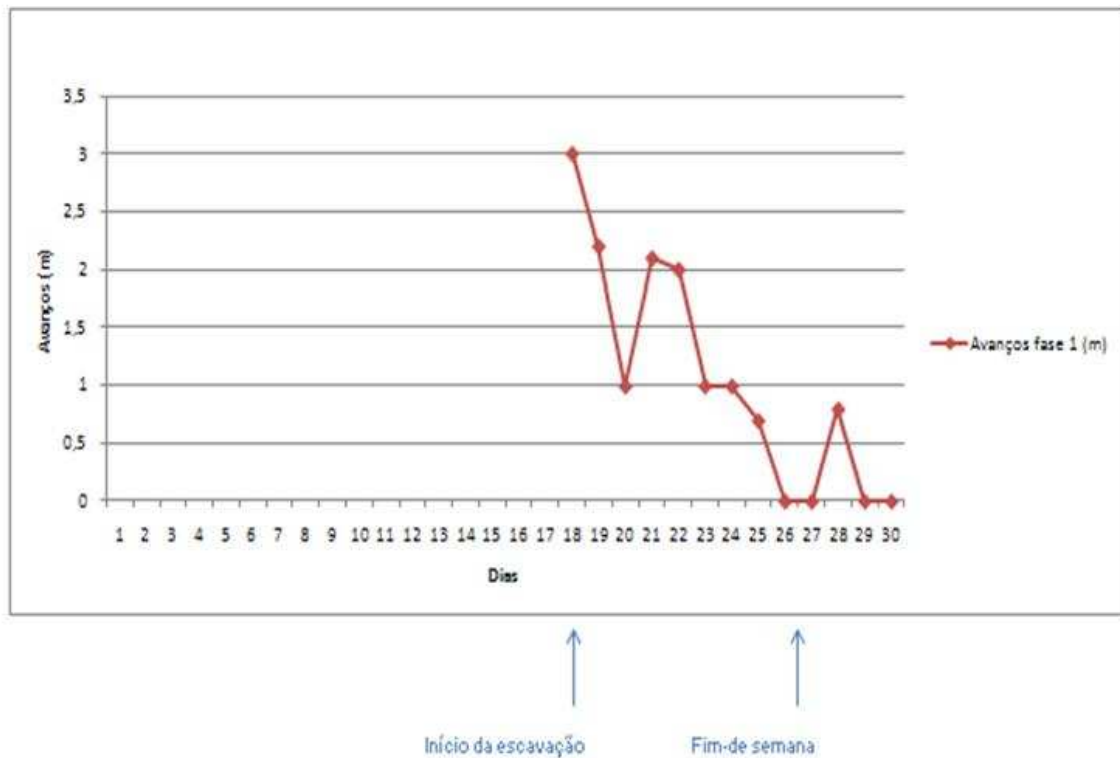


Figura 118 - Avanços na primeira fase e produção de enfilagens na galeria nascente norte no mês de Junho.

#### 4.15.1.3 Julho

A escavação da galeria poente norte prosseguiu durante o mês de Julho. A escavação ocorreu em ZG3 até ao dia 6, entrando no dia 7 em maciço considerado como ZG2. Os avanços médios obtidos neste mês foram de 0,86 metros por dia (ver Figura 119), o que demonstra uma queda substancial dos avanços obtidos no mês anterior. Sendo a principal razão de tal queda, a mudança de zona geotécnica. As principais razões de quebra de produção mensal foram as paragens de fim-de-semana, a paragem para a instalação da ventilação no dia 14, e uma avaria no gerador ocorrida no dia 21. Iniciou-se neste mês a colocação de pregagens Swellex.

Como já havia ocorrido em Maio, verificou-se também uma queda de produção durante os períodos de colocação de enfilagens, nomeadamente nos dias 7,8, 17 e 18 do mês. A Tabela 67 apresenta as produções mensais para a galeria poente norte.

				Totais	
Galeria Poente Norte	Avanços	Calote (m)	1	20,75	
			2	21,65	
	Sustimento	Swellex		L=4 m	0
				L=6m	32
		Enfilagens			56
		Microestacas			0
		Perfis metálicos	PS 115 20 30	1ª fase	23
				2ª fase	28
		Fibras de vidro			3
		Perfis provisórios			23

**Tabela 67 - Produção de mês de Julho para a galeria poente norte.**

Na galeria nascente norte a escavação do maciço prosseguiu também ao longo deste mês. Relativamente aos avanços na galeria, estes seguem a tendência já observada para a galeria poente norte, de diminuição, sobretudo devido à mudança do tipo de maciço. Os avanços neste mês foram em média de 0,9 metros por dia

A paragens de fim de semana foram as principais razões de quebra de produção, e tal como ocorreu no mês anterior é possível observar a queda durante os períodos de colocação de enfilagens, nomeadamente nos dias 8,9,18,19, 22 e 23.

				Totais	
Galeria Nascente Norte	Avanços	Calote (m)	1	22,5	
			2	5,3	
	Sustimento	Enfilagens			94
		Perfis metálicos	PS 115 20 30	1ª fase	27
				2ª fase	7
		Perfis provisórios			26

**Tabela 68 - Produção de mês de Julho para a galeria nascente norte.**

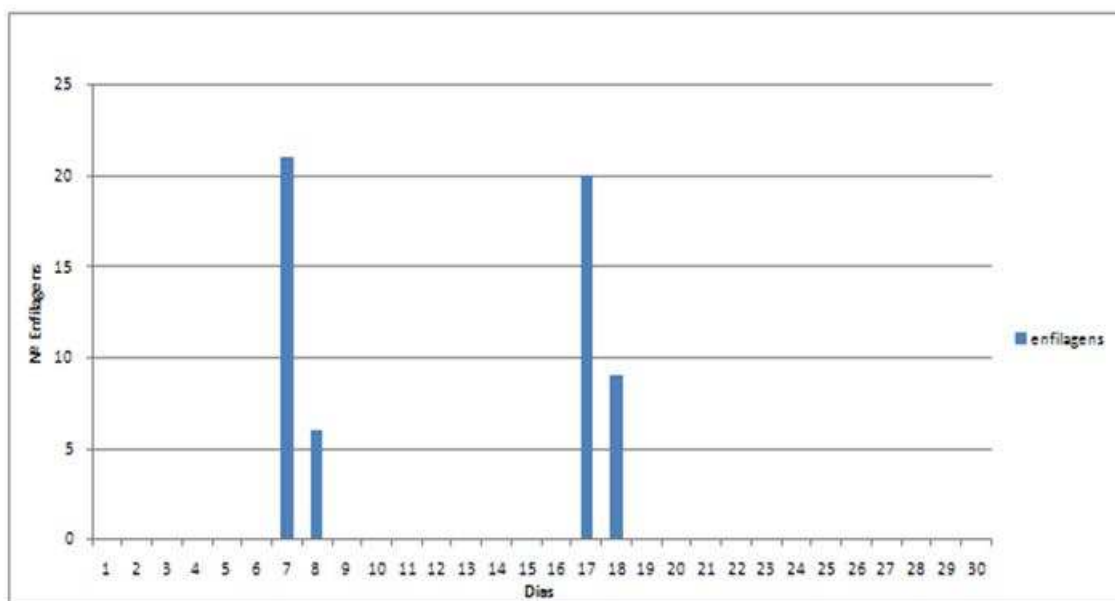
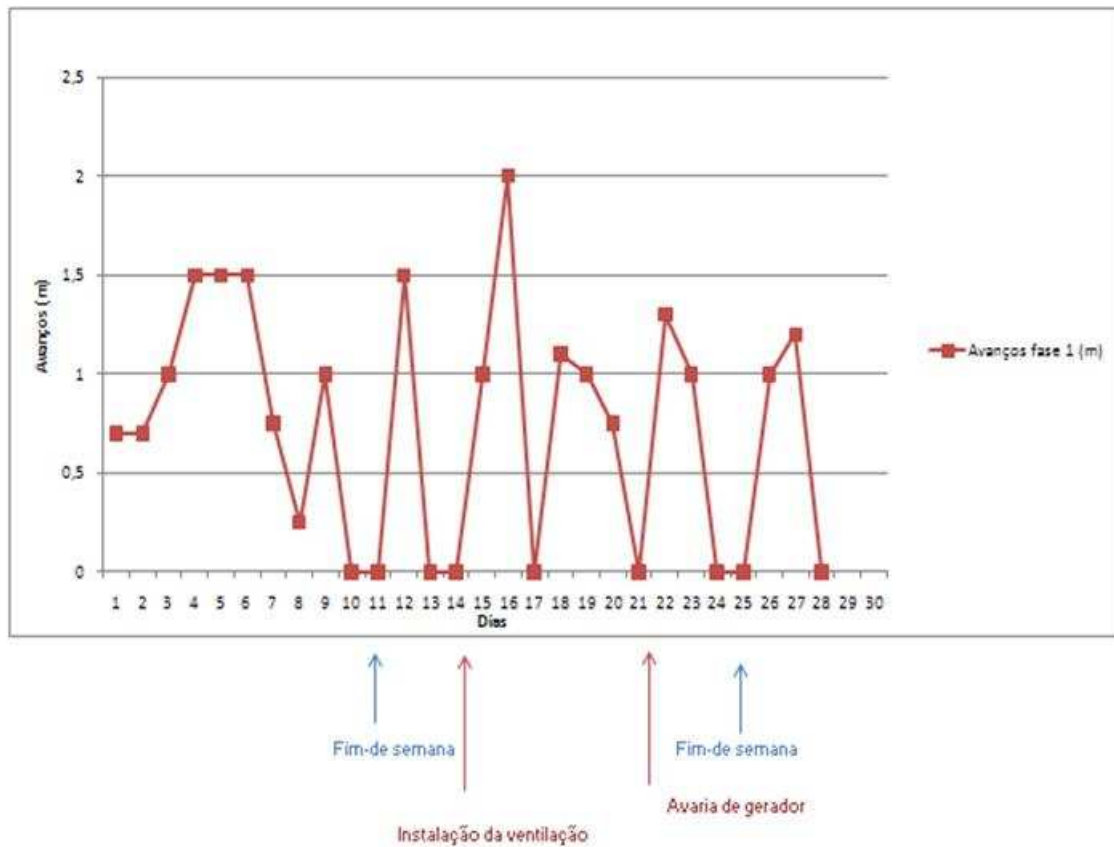


Figura 119 - Avanços na primeira fase e produção de enfilagens na galeria ponte norte no mês de Julho.



A galeria Sul do lado poente, começou também a ser escavada durante o mês de Julho (ver Figura 122), nomeadamente no dia 8. A escavação foi precedida pela colocação de microestacas, para o pré-suporte do maciço. As microestacas foram colocadas desde o dia 2 ao dia 6 do mês. O maior número de microestacas foi colocado no dia 5 de Julho, designadamente 18 microestacas em 24 horas, o que perfaz uma média de 0,75 estacas por hora, o maior valor obtido na obra. Pode-se verificar também a queda de produção nos fins-de-semana, nos períodos de colocação de enfilagens e com a avaria de gerador no dia 21. O maciço escavado é predominantemente um maciço ZG3, tendo sido atingido o ZG2 em finais do mês Julho. A Tabela 69 apresenta as produção total relativa ao mês de Julho para a galeria poente sul.

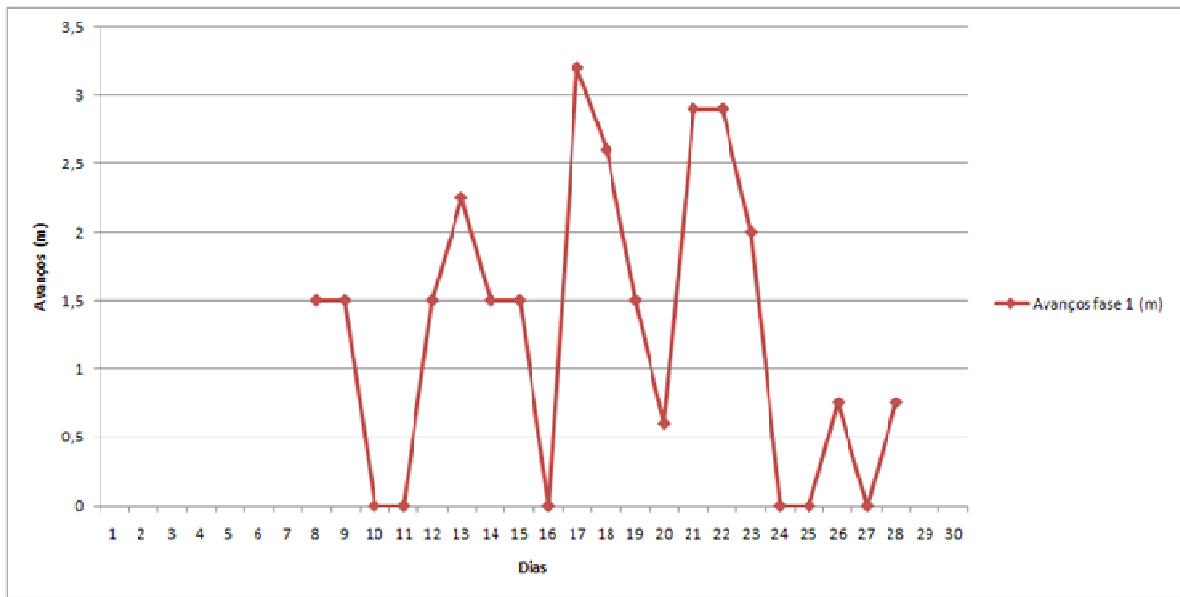
				Totais	
Galeria Poente Sul	Avanços	Calote	1	26,95	
			2	10,95	
	Sustimento	Enfilagens			60
		Microestacas			46
		Perfis metálicos	PS 115 20 30	1ª fase	32
				2ª fase	11
		Fibras de vidro			13
		Perfis provisórios			32

**Tabela 69 - Produção de mês de Julho para a galeria Poente Sul.**

Por fim, importa referir a galeria nascente Sul, cuja escavação não chegou a iniciar-se durante o mês Julho, sobretudo porque ainda se desenvolviam trabalhos nos taludes próximos da galeria. Porém, foram ainda colocadas as primeiras microestacas de pré-suporte aproveitando os turnos nocturnos em que não havia trabalhos nos taludes. Foram colocadas 31 no total (7 dia 21, 14 dia 22 e 10 dia 23).



**Figura 121 – Vista do lado nascente com as primeiras micro - estacas instaladas na galeria Nascente Sul.**



↑ Início da escavação  
 ↑ Fim-de semana  
 ↑ Avaria de gerador  
 ↑ Fim-de semana

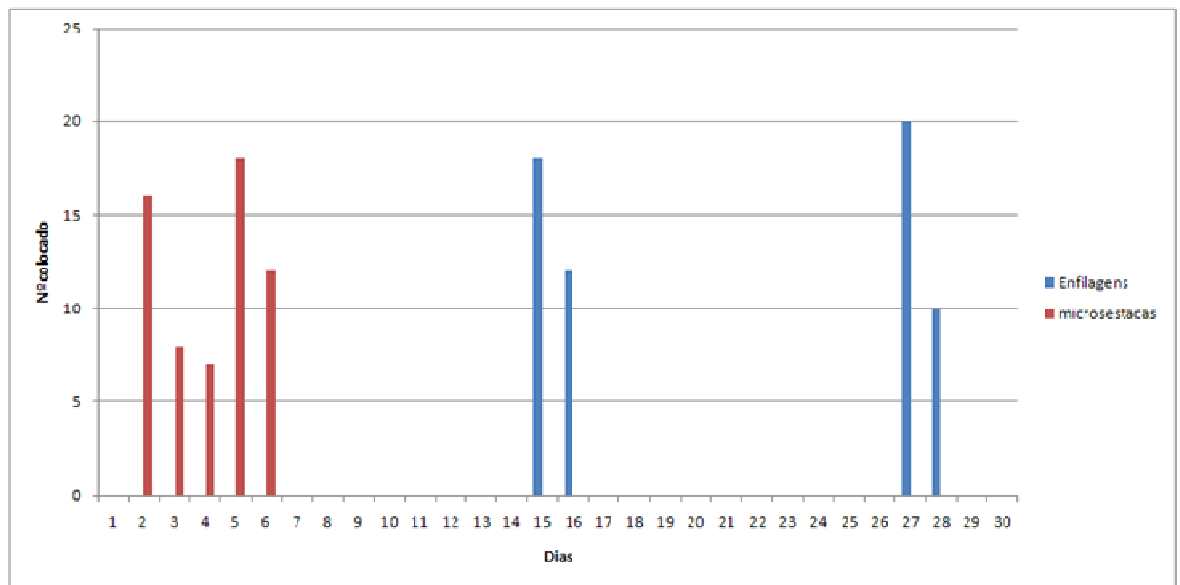
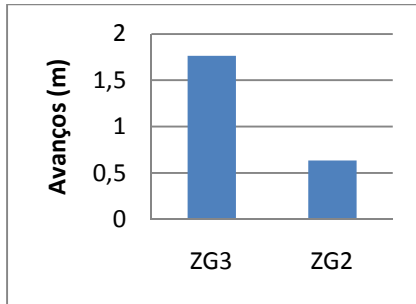


Figura 122 - Avanços na primeira fase e produção de enfilagens na galeria poente Sul no mês de Julho.

A análise dos gráficos demonstra haver quedas de produção devido aos mais diversos factores, tais como avarias de gerador, paragens de fim de semana, e pela colocação de enfilagens. O efeito das alterações das características geomecânicas também é evidente, particularmente na galeria poente Norte, a partir do dia 7 de julho.

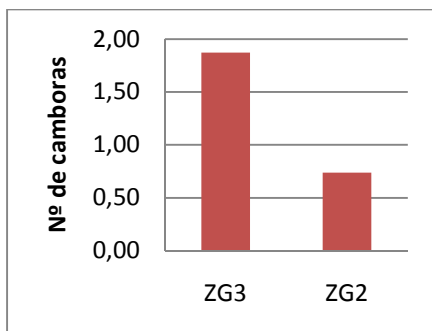
Esta evidência será demonstrada e corroborada mediante o gráfico da Figura 123 que apresenta a média de avanços nas diferentes zonas geotécnicas.



Avanços (m)			
	Junho	Julho	Média
ZG3	1,709	1,817	1,763
ZG2	0,375	0,9	0,635

**Figura 123 – Avanços obtidos nas diferentes zonas geotécnicas intersectadas pela escavação.**

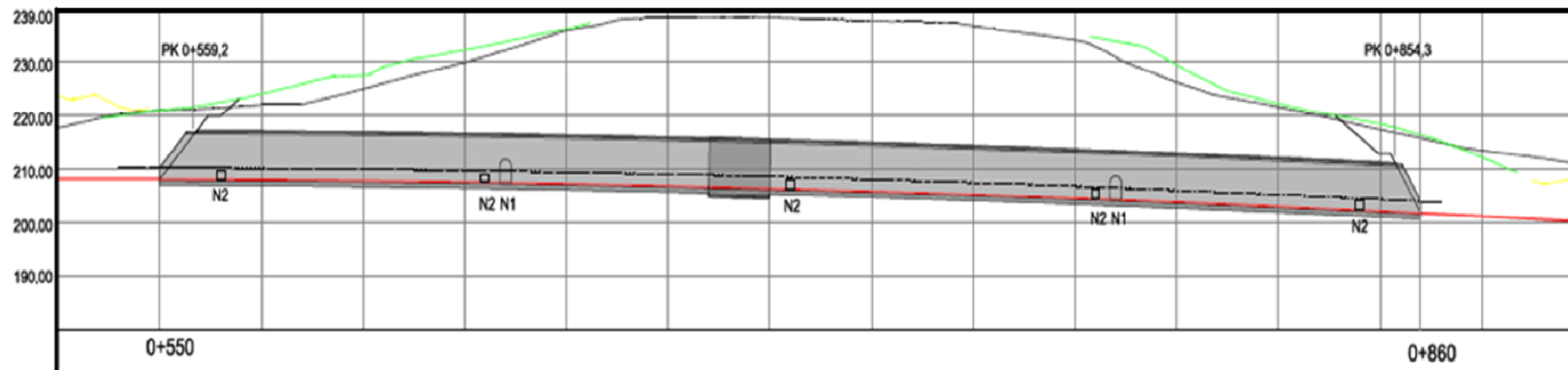
A principal causa desta queda na produção é a incapacidade do martelo desmontar a rocha, sobretudo nos primeiros momentos da escavação, onde não existe uma cavidade para onde esta se possa movimentar. Esta situação, aliada ao menor grau de alteração que a rocha apresenta e o facto dos planos de xistosidade se encontrarem contra a direcção de escavação, explica o baixo rendimento obtido na obra e o grande número de avarias ocorridas com o martelo.



Nº de cambotas/dia			
	Junho	Julho	Média
ZG3	1,9	1,86	1,87
ZG2	0,5	0,98	0,74

**Figura 124 – Nº médio de cambotas colocadas por dia em cada zona geotécnica.**

Como se pode observar na Figura 124 o número de perfis colocados por dia na 1ª fase segue a tendência de queda produtiva já observada nos avanços. Os metros escavados em cada uma das galerias podem também ser observados na Figura 125 e Figura 126.

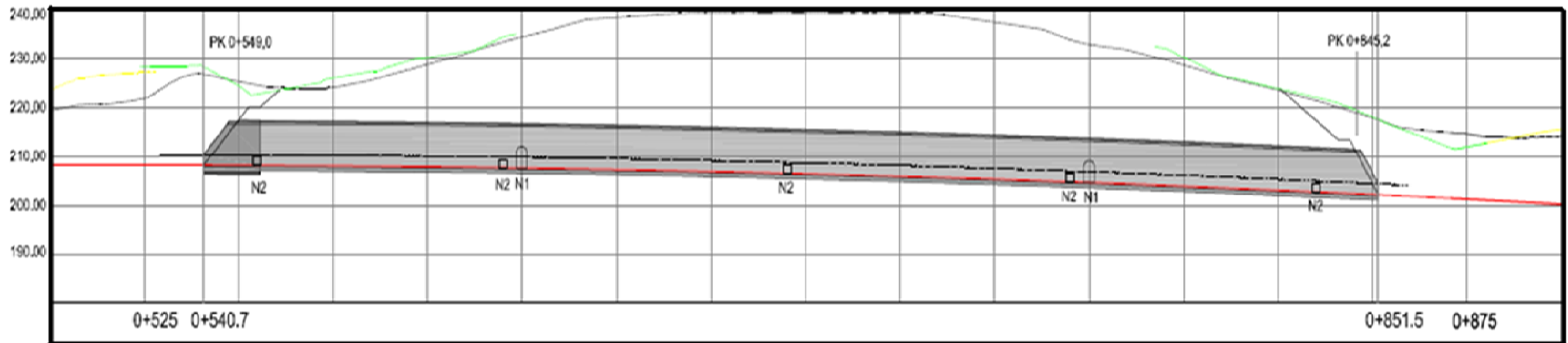


Galeria Norte (frente nasc.)	Mês		Galeria Norte (frente poente)
	Junho	Julho	
	avanco		
ZG	ZG3	ZG2	
m. escavados	13,8	22,5	

Galeria Norte (frente poente)	Mês	
	Julho	Junho
	avanco	
ZG	ZG3	ZG2
m. escavados	44,1	20,75

Figura 125 – Maciço de 1ª fase escavado na galeria norte.



Galeria Sul (frente nasc.)	Mês		Julho	Mês	Galeria Sul (frente ponte)
	avanço			avanço	
	ZG		23,2	ZG	
	m. escavados		23,2	escavados	

Figura 126 - Maciço de 1ª fase escavado na galeria Sul.

#### 4.15.2 Avarias

As avarias mais frequentes ocorreram com o martelo, nomeadamente o entupimento provocado por poeiras provenientes da escavação, fugas de óleo ou quebra da ferramenta de corte.



Figura 127 – Ferramenta de corte quebrada e martelo avariado.

#### 4.15.3 Produção de Taludes

De forma expedita serão expostas de seguida as produções de taludes desde o mês de Abril até o mês de Julho.

Produções Poente						
Abril:	Maio:	Junho:	Julho:	Elementos	Totais	Obs.
44	92	51	8	<b>Drenos</b>	195	
42	143	55	0	<b>Pregagens de 6 metros</b>	240	Não incluídas as destinadas a ensaios
0	14	0	84	<b>Pregagens 12 m</b>	98	
6	23	12	2	<b>Pregagens Diwidag 12 metros</b>	43	

Tabela 70 - Produção relativa à frente poente.

Produções Nascente						
Abril:	Maio:	Junho:	Julho:	Elementos	Totais	Obs.
34	76	22	77	<b>Drenos</b>	235	
3	6	0	0	<b>Pregagens de 6 metros</b>	185	Não incluídas as destinadas a ensaios
10	32	13	81	<b>Pregagens 12 metros</b>	108	
0	22	22	42	<b>Pregagens Diwidag 12 metros</b>	93	
0	0	0	0	<b>Pregagens Diwidag 6 metros</b>	12	

Tabela 71 - Produção relativa à frente nascente para o mês de Abril.

Os mapas relativos às produções diárias discriminadas por taludes, podem ser encontrados no anexo 4, juntamente com as projecções de betão efectuadas e as camadas de betão colocadas em cada um dos taludes.

#### 4.15.4 Mapa de produção da parede ancorada

A produção mensal do túnel foi registada e encontra-se exposta na Tabela 72. Para mais informações relativas à produção do túnel e à sua articulação com a produção das restantes estruturas de emboquilhamento, encontram-se no anexo 4 os mapas de produção completos relativamente aos trabalhos de superfície.

				Abril		Maio						Junho					Julho													
				23	26	27	5	12	17	18	19	20	21	24	27	31	1	8	14	15	16	22	28	1	5	9	12			
1º nível	Muroberlim	1ª fase	Painéis primários	2	2																									
			Painéis secundários		2	1																								
		Ancoragens	colocação				14																							
			tensionamento					14																						
	2ª fase	Painéis primários						2	1																					
		Painéis secundários									2	2																		
		Ancoragens	colocação											5	9															
			tensionamento														10	4												
2º nível	Muro berlim	1ª fase	Painéis primários													2														
			Painéis secundários															2												
			Ancoragens	colocação																8										
		tensionamento																			8									
		2ª fase	Painéis primários																		2									
			Painéis secundários																			2								
	Ancoragens		colocação																			7								
		tensionamento																					7							
	3ª fase	Painéis primários																							2					
		Painéis secundários																								2				
		Ancoragens	colocação																								7			
	tensionamento																										7			

Tabela 72 - Mapa de produção do túnel.

				Totais
1º nível	Muroberlim	1ª fase	Painéis primários	4
			Painéis secundários	3
			Ancoragens colocação	14
		Ancoragens tensionamento	14	
		2ª fase	Painéis primários	3
			Painéis secundários	4
Ancoragens colocação	14			
Ancoragens tensionamento	14			
2º nível	Muro berlim	1ª fase	Painéis primários	2
			Painéis secundários	2
			Ancoragens colocação	8
		Ancoragens tensionamento	8	
		2ª fase	Painéis primários	2
			Painéis secundários	2
			Ancoragens colocação	7
		Ancoragens tensionamento	7	
		3ª fase	Painéis primários	2
			Painéis secundários	2
			Ancoragens colocação	7
		Ancoragens tensionamento	7	

Tabela 73 - total dos elementos colocados no mapa de produção.

## 4.16 Proposta de soluções

Tendo em conta os baixos avanços registados na escavação, sobretudo quando esta começou a desenvolver-se em ZG2, propõe-se um olhar para outras alternativas de forma a solucionar o problema em questão. Assim, apresentar-se-ão de seguida dois exemplos de desmonte da rocha.

### 4.16.1 Escavação por ataque pontual

A escavação por ataque pontual depende fortemente das características do maciço, principalmente da resistência à compressão da rocha. Dessa forma, e de modo a obterem-se valores viáveis que confirmassem os obtidos pelo martelo Schmidt, foram recolhidas amostras das frentes de escavação, e enviadas para laboratório de forma a serem ensaiadas em relação à sua resistência à carga pontual e por correlação obter-se a resistência à compressão.

#### 4.16.1.1 Cálculo da potência a instalar na cabeça de corte.

A potência a instalar na cabeça de corte pode ser obtida mediante a fórmula [13]

Assim, temos que para uma resistência à compressão uniaxial de 37,2 MPa a potência a instalar será de 62,05 Kw.

#### 4.16.1.2 Seleção da Máquina

A seleção da máquina tomou em conta a potência necessária a fornecer à cabeça, e a área de secção da escavação.

Assim, a máquina escolhida foi a cabeça de corte adaptável da Sandvik MA520.



Figura 128 - Pormenor da Cabeça de corte MA520 e cabeça de corte MA520 em acção (adaptado de catálogos Sandvik).

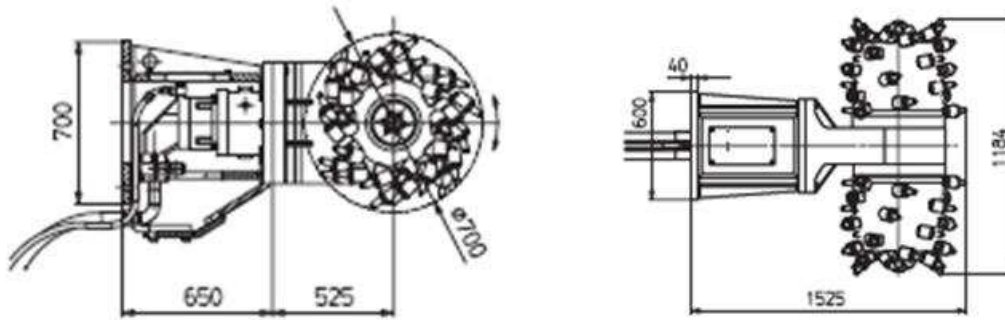


Figura 129 - Dimensões da cabeça de corte MA520 (adaptado de catálogos Sandvik).

Velocidade	86,30 min <sup>-1</sup>
Diâmetro da cabeça de corte	700 mm
Força de corte	31,615 N
Velocidade de corte	3,2 m/s
Peso da unidade	2,140 kg
Potência requerida mínima	100 KW
Óleo	188 l/ min.
Peso do carregador recomendado	>20 ton.

Tabela 74 - Características gerais da cabeça de corte MA520 (adaptado de catálogos Sandvik).

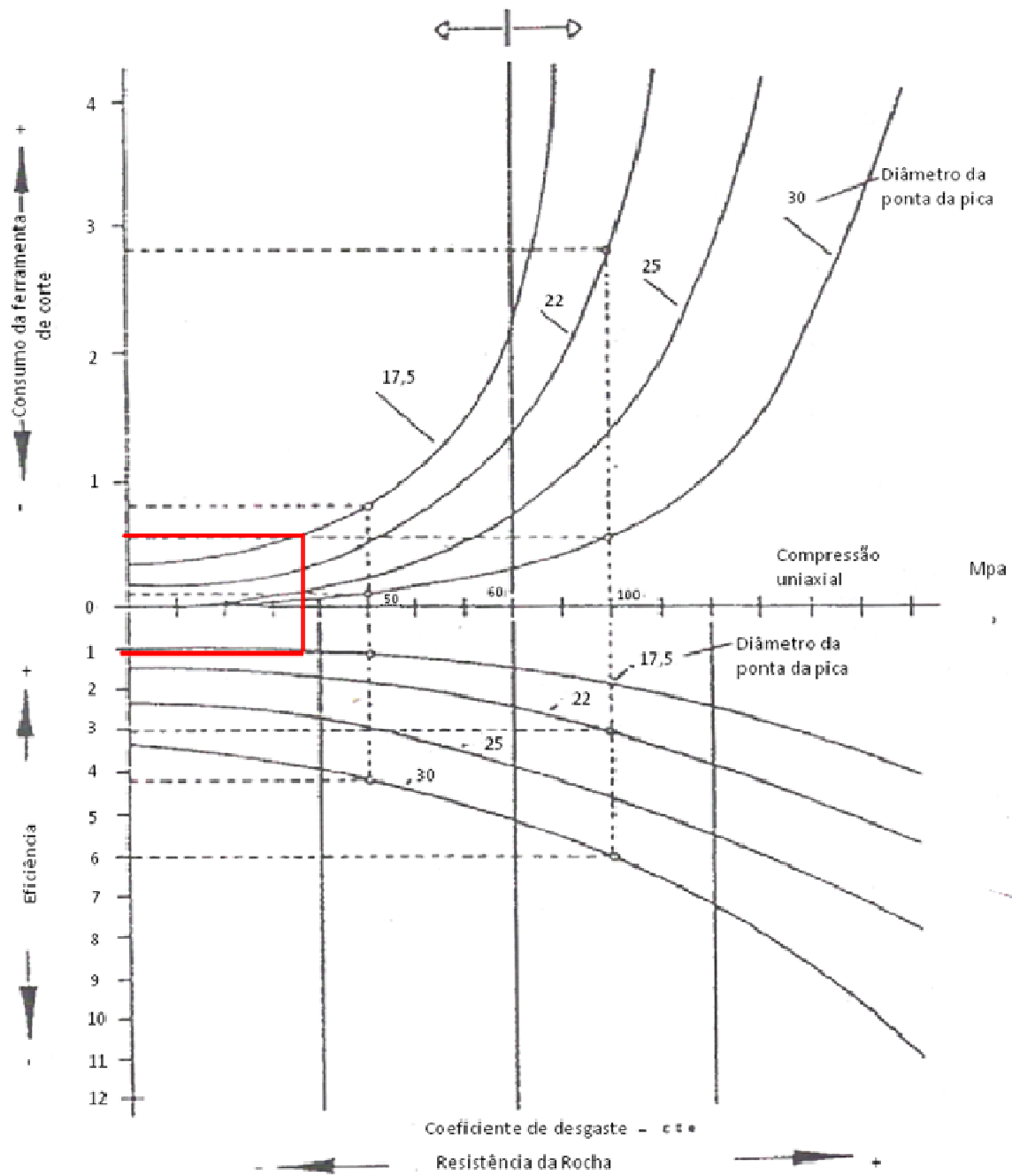
Esta unidade hidráulica é uma adaptação ideal para complementar a escavação, atenuando o intervalo entre martelo hidráulico e o balde.

Uma vez que é só uma adaptação para utilizar numa escavadora hidráulica, evita gastos desnecessários em máquinas completas e rentabiliza o investimento realizado nas giratórias.

A potência requerida mínima (100 kW – a menor de todas as cabeças da série) é superior à potência mínima calculada (62,05 kW) estando por isso apta a trabalhar no maciço. Qualquer uma das carregadoras presentes em obra pesa mais de 20 toneladas e fluxo de óleo superior a 188 l/minuto.

#### 4.16.1.3 Seleção do diâmetro das picas

Para a seleção do diâmetro da pica foi utilizado o gráfico da Figura 130.



**Figura 130 - Relação entre a compressão uniaxial da rocha, o diâmetro da ponta, o consumo de picas e a eficiência de corte (adaptado de Galiza et al.2007/2008).**

Para uma resistência máxima de 37 MPa serão utilizados diâmetros de 17,5mm.

#### 4.16.1.4 Rendimento da escavação

De modo a determinar-se o rendimento da escavação previsto para a cabeça de corte calculou-se o índice de “cortabilidade” – Rock Mass Cuttability Index mediante a equação [14].

Assim, para uma resistência à compressão de 37 MPa e um RQD de 35, temos um índice de 3,96.

A partir deste valor calcula-se o rendimento de corte instantâneo mediante a fórmula [15], obtendo um rendimento de corte instantâneo de 30,88 m<sup>3</sup>/h.

O rendimento real é então calculado pela fórmula [17] utilizando o rendimento instantâneo calculado e os valores explanados na Tabela 75.

Factor	Valor usado	Observações
Coefficiente de eficiência - CE	0,86	Soleira em más condições. Pouco pó
Coefficiente relativo a tempo disponível - CD	20%	Várias fases de execução, sustimento sistemático
Rendimento instantâneo	30,88 m <sup>3</sup> /h	Valor calculado pela equação [16]
Número de horas de trabalho por dia	24 horas	Laboração contínua
Coefficiente de tempos mortos -C1	0,15	Valor intermédio

**Tabela 75 – Factores utilizados para o cálculo do rendimento**

Assim temos um rendimento de 108,35 m<sup>3</sup>. O avanço diário para cada fase é obtido mediante a seguinte equação:

$$\text{Avanço} = \frac{\text{Rendimento Real}}{\text{Área da frente de escavação}} \quad [18]$$

Para cada fase teremos assim os avanços demonstrados na Tabela 76 e na Tabela 77.

Secção tipo 1		Área (m <sup>2</sup> )	Avanço (m/dia)
Calote	1	53,5141	2,025
	2	31,2217	3,470
Rebaixo	3	19,0569	5,686
	4 a	16,9476	5,432
	4 b	16,9476	5,432

**Tabela 76 – Avanços para cada sub - fase de escavação da 1ª Secção tipo 1.**

Secção tipo 2		Área (m <sup>2</sup> )	Avanço (m/dia)
Calote	1	56,0633	1,932
	2	30,7573	3,523
Rebaixo	3	26,3050	4,119
	4 a	22,1925	4,882
	4 b	22,1925	4,882

**Tabela 77 – Avanços para cada sub - fase da escavação da Secção tipo 2.**

A Tabela 78 compara os avanços obtidos em obra e os avanços diários que podem ser obtidos mediante a utilização de uma máquina de ataque pontual.

Avanços obtidos em obra (m/dia) ZG2	Avanço teórico com ataque pontual (m/dia) ZG2
0,635	2,025

**Tabela 78 – Quadro comparativo de avanços em obra e com máquina de ataque pontual.**

Como se pode concluir através da observação da tabela, é possível obter um aumento dos avanços diários de cerca de 1,39 metros.

Com duas máquinas de ataque pontual por frente, é possível obterem-se avanços em cada galeria de 4,05 metros por dia, ou seja 2,025 por frente de escavação. Obtendo-se assim o varamento de cada uma das galerias nos tempos expostos na Tabela 79 – Cálculo dos dias para varamento da primeira fase de escavação.

Galeria	Avanços diários (m)	Metros restantes	Dias
Galeria Norte	4,05	234,45	58
Galeria Sul	4,05	263,8	66

**Tabela 79 – Cálculo dos dias para varamento da primeira fase de escavação.**

Para a conclusão da galeria, sabendo que o desfasamento entre a 1ª fase de escavação e a última fase de rebaixo é de cerca de 90 metros obtemos assim os seguintes prazos de conclusão para a obra.

Galeria	Metros para início da última fase de rebaixo	Dias para início da última fase de rebaixo	Extensão do túnel	Dias para conclusão de rebaixo	Dias para conclusão da galeria	Prazo de conclusão alargado (dias)
Galeria Norte – frente poente	25,15	7	299,30	74	88	113
Galeria Norte – frente Nascente	53,7	14				
Galeria Sul – frente poente	23,2	6	300,10	74	97	122
Galeria Sul – frente nascente	90	23				

**Tabela 80 - Prazo de conclusão previsto da obra recorrendo a uma máquina de ataque pontual.**

Temos deste modo um prazo de conclusão alargado para a escavação e suporte primário de 122 dias, com a adição de mais 25 dias que têm em conta atrasos e paragens de produção.

#### 4.16.2 Caldeiro

Uma outra hipótese de escavação possível de utilizar é o desmonte com recurso a explosivos. No caso de uma rocha branda com a xistosidade orientada contra o sentido da escavação como é o caso do maciço em questão, a criação de uma cavidade na frente de escavação que servisse como vazio para onde a rocha desmontada pelo martelo hidráulico se pudesse movimentar seria uma solução a adoptar. Isso poderia ser conseguido, segundo a nossa opinião, mediante a execução de apenas um caldeiro carregado com explosivos.

Desta forma evitava-se a execução de pegas de fogo alargadas a toda a frente, que poderiam desequilibrar a estabilidade de um maciço desta natureza, e rentabilizava-se o investimento feito nas giratórias. De referir no entanto que para o uso deste método seria necessário a permissão das entidades administrativas responsáveis, nomeadamente a Câmara de Vila Nova de Gaia.

##### 4.16.2.1 Determinação do diâmetro de furo largo

Numa rocha de natureza instável como é o caso do maciço em questão, não convém que os avanços a aplicar sejam exagerados, o que pode incorrer em desestabilização do maciço envolvente, e uma vez que este tem fracturação média a elevada pode incorrer em desvios de furação. Assim, e pela consulta da tabela que relaciona os avanços com o rendimento proporcionado pelo furo largo temos que para avanços de 2,5 metros e furação com bit de 102 mm (o maior encontrado na obra) obtemos rendimentos de avanço de 96%, o que se traduz em avanços reais de 2,4 metros.

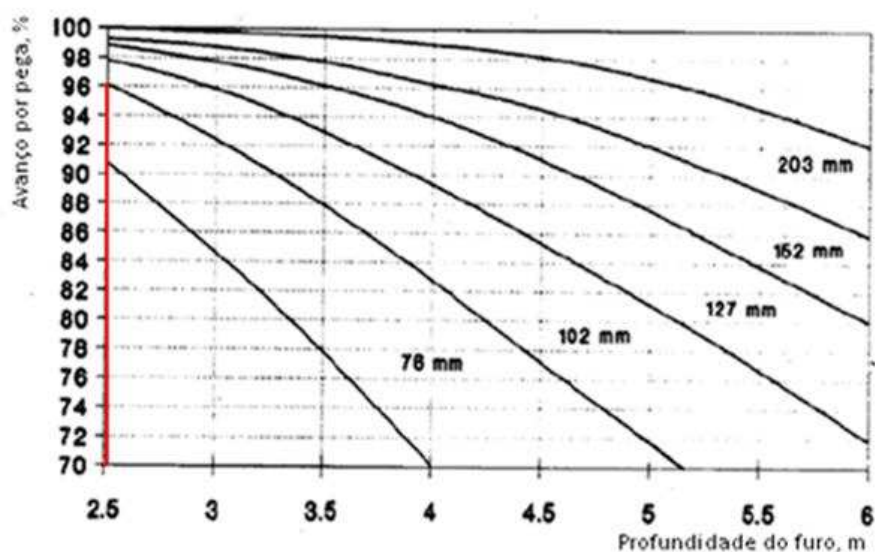


Figura 131 - Relação entre o avanço em % da perfuração e os diferentes diâmetros do furo não carregado (Adaptado de Galiza et al. 2007/2008).

#### 4.16.2.2 Critérios de escolha de explosivo

A escolha do explosivo deve ter em conta as suas características técnicas, a segurança que garante, e a resistência à presença de água.

Actualmente, as emulsões são o explosivo que oferece maiores garantias, quer na segurança de manuseamento quer no seu armazenamento, oferecendo elevadas velocidades de detonação devido ao seu elevado poder energético e promovendo assim uma boa fragmentação do maciço.

A escolha do explosivo a utilizar deve ter em conta a impedância do maciço. A impedância do explosivo deve ser superior à do maciço de forma a garantir a propagação da onda gerada pela detonação, obtendo-se deste modo uma melhor fragmentação do material o que favorece a tarefa de remoção.

A impedância do maciço é calculada mediante a seguinte fórmula:

$$\text{Impedância} = \text{velocidade de propagação sísmica} \left( \frac{m}{s} \right) \times \text{densidade} \left( \frac{g}{cm^3} \right) \quad [19]$$

Assim para um xisto com as seguintes características:

Xisto	
Velocidade de Propagação Sísmica (m/s)	Densidade
2400	2.65

**Tabela 81 - Velocidade de propagação de ondas sísmicas e densidade do xisto.**

Teremos uma impedância do maciço de 6360.

O quadro seguinte mostra 3 tipos de emulsões comercializadas actualmente:

Emulsão	Velocidade de detonação (m/s)	Densidade do explosivo
Emulex 711	6350	1,25
Emulex 721	6200	1,25
Emulex 731	5850	1,25

**Figura 132 - Velocidade de detonação e densidade dos explosivos EMULEX**

A impedância do explosivo é determinada pela seguinte fórmula:

$$\text{Impedância explosivo} = \text{velocidade de detonação} \left( \frac{m}{s} \right) \times \text{densidade} \left( \frac{g}{cm^3} \right) \quad [20]$$

Assim temos as seguintes impedâncias para os explosivos:

Emulsão	Impedância
Emulex 711	7938
Emulex 721	7750
Emulex 731	7313

**Tabela 82 - Impedâncias dos explosivos EMULEX.**

Verifica-se para o Emulex 731 a melhor adaptabilidade ao maciço em causa.



**Figura 133 - Explosivos EMULEX (adaptado de catálogos da MAXAM)**

#### **4.16.2.3 Distância à frente**

O gráfico da Figura 134 fornece-nos informações relativamente à distância à frente a dar aos furos em função de uma determinada carga de fundo. Assim, para um maciço que atinge alterações de W3, e uma fracturação moderada, uma carga de fundo de 35 mm será suficiente para o destaque do maciço, Pelo que teremos por isso distâncias à frente máximas de 0,923 metros e concentrações de carga na ordem dos 1,16 kg/m.

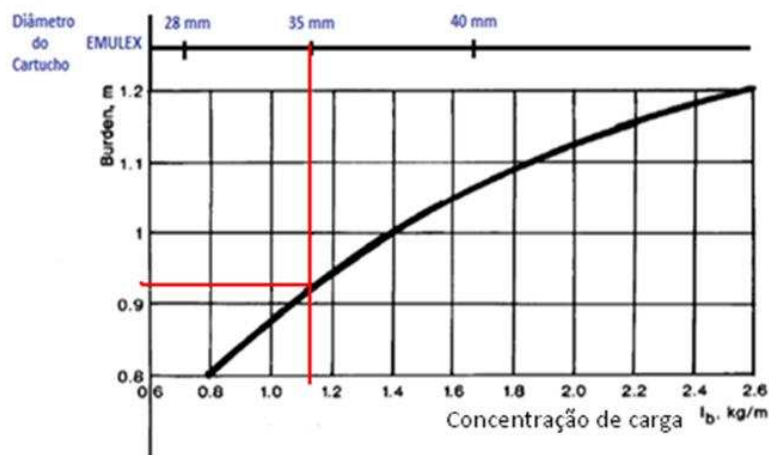


Figura 134 - Concentração de carga e distância á frente para furos de alargamento (adaptado de Galiza et al 2007/2008).

### Cálculo das cargas específicas

As cargas de coluna necessárias foram calculadas mediante os gráficos seguintes:

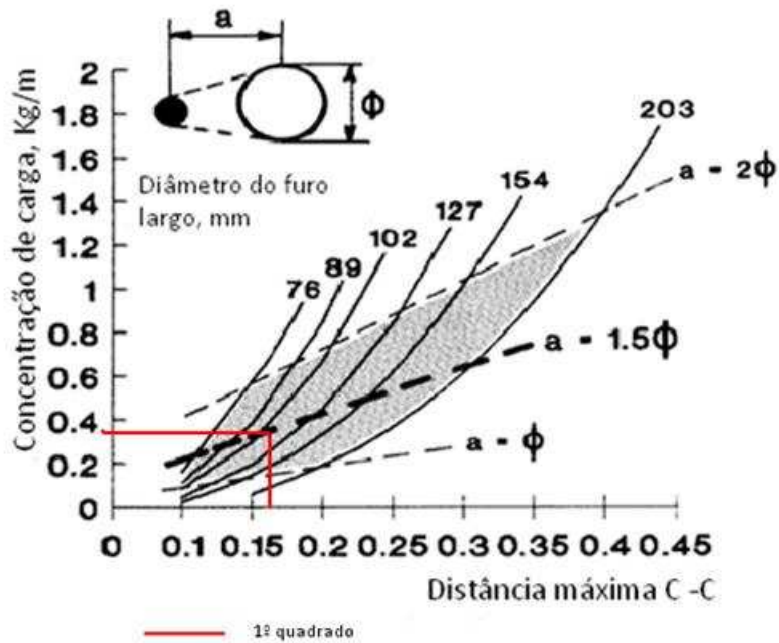


Figura 135 Determinação da concentração de carga (Adaptado de Galiza et al. 2007/2008).

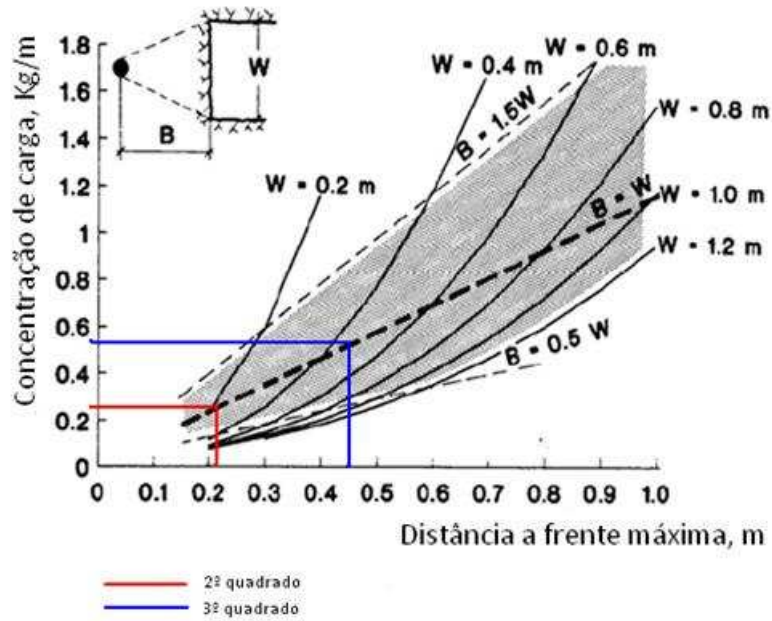


Figura 136 - Exemplo de explosivos Emulex 731 (Adaptado de Galiza et al. 2007/2008).

A distância à frente do quarto quadrado é já superior à distância calculada no gráfico da Figura 134, pelo que será adoptado o valor deste último, economizando no explosivo e rentabilizando da melhor forma o investimento.

As cargas de fundo adoptadas para cada quadrado (à excepção do primeiro) são o dobro da carga de coluna retirada pelos gráficos, uma vez que o papel principal da carga de fundo é o destaque da rocha, ficando a carga de coluna relegada à movimentação desta para o vazio criado pelas detonações sucessivas.

As características dos cartuchos foram escolhidas tendo em conta a necessidade de se conseguir obter um valor igual ou superior às cargas calculadas. Por questões económicas os cartuchos seleccionados eram aqueles de menor calibre com os quais se conseguem obter as cargas obtidas em cálculo.

Neste sentido, as concentrações de carga totais foram recalculadas tendo em conta as condições reais dos cartuchos EMULEX utilizadas. Os valores obtidos encontram-se na página seguinte.

CALDEIRO	B (m)	E (m)	h0 (m)	CARGA DE FUNDO								
				lb(Kg/m)	hb (m)	Qb (kg)	Tipo de explosivo - Emulex 731			N.º Cartuchos fundo	hbreal (m)	Qb real (kg)
							Ø (mm)	Peso (Kg)	Comprimento (m)			
1º Quadrado	0,153	0,216	0,051	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2º Quadrado	0,216	0,459	0,108	0,534	0,325	0,173	28	0,147	0,200	2	0,400	0,294
3º Quadrado	0,459	0,974	0,229	1,12	0,688	0,771	35	0,250	0,220	4	0,880	1,000
4º Quadrado	0,923	1,958	0,462	1,16	1,385	1,606	40	0,333	0,200	5	1,000	1,665

Tabela 83 - Carga de fundo e distâncias á frente.

CALDEIRO	CARGA DE COLUNA								
	lc (Kg/m)	hc (m)	Qc (Kg)	Tipo de explosivo - Emulex 731			N.º Cartuchos coluna	hc real (m)	Qc real (Kg)
				Ø (mm)	Peso (Kg)	Comprimento (m)			
1º Quadrado	0,35	2,449	0,857	28	0,147	0,200	6	1,200	0,882
2º Quadrado	0,267	1,992	0,532	28	0,147	0,200	4	0,800	0,588
3º Quadrado	0,56	1,3905	0,779	28	0,147	0,200	6	1,200	0,882
4º Quadrado	0,58	1,0385	0,602	28	0,147	0,200	5	1,000	0,735

Tabela 84 - Cargas de coluna.

CALDEIRO	Espaçamento entre cartuchos (m)	Q Total por furo (kg)	N.º de Furos	Q total (Kg)
1º Quadrado	0,250	0,882	4	3,528
2º Quadrado	0,238	0,882	4	3,528
3º Quadrado	0,021	1,882	4	7,528
4º Quadrado	0,250	2,4	4	9,6
Total caldeiro = $\Sigma$			16	24,184 kg

Tabela 85 - número total de furos e carga total.

#### 4.16.2.4 Cordão detonante

Para o caso das emulsões recorre-se à utilização de cordão detonante quando o espaçamento entre cartuchos é superior a 0,04mm, devido ao seu coeficiente de auto-excitação ser no máximo esse valor.

#### 4.16.2.5 Espaço Anelar

É necessário ter em conta o espaço anelar, nome dado a uma margem de segurança entre o cartucho e a parede do furo, para que não haja encravamento dos cartuchos. Uma margem de 7 mm é o suficiente para o efeito.

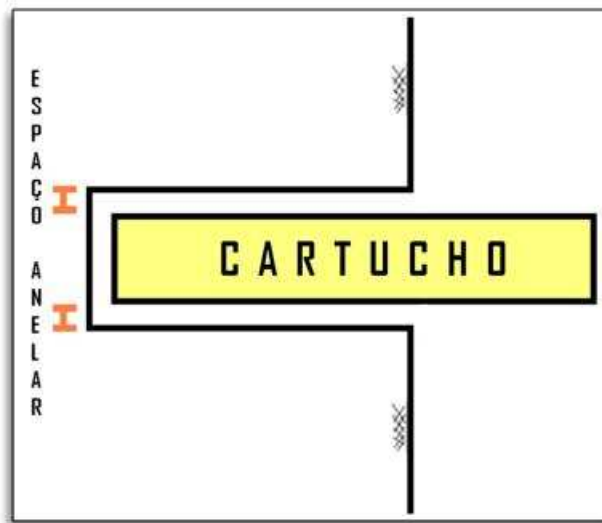


Figura 137 - Espaço anelar.

#### 4.16.2.6 Diâmetros de furação

Os diâmetros de furação são calculados mediante os cartuchos de explosivo utilizados e o espaço anelar.

Assim teremos para os furos de cada quadrado:

Quadrado	Diâmetro de explosivo máximo (mm)	Diâmetro de furação (mm)
1º	28	35
2º	28	35
3º	35	42
4º	40	47

Tabela 86 - Diâmetros de furação.

#### 4.16.2.7 Acessórios de furação

##### 4.16.2.7.1 Vara

Para a selecção da vara foram tidas em conta três condições:

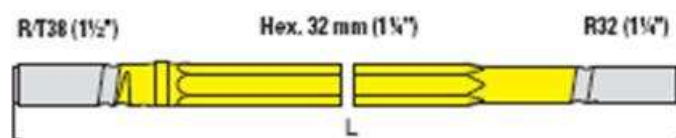
A primeira é a compatibilidade com a coluna em obra. Segundo o catálogo podemos utilizar varas entre os 2,500 e os 4,310 metros de comprimento.

Tipo de coluna	Martelo	Comprimento de varas min/max mm	Profundidade de furação (max/min) mm	Comprimento mm	Peso Kg
BMHT 6314 - 08	COP 1238	2500 - 4310	2221 - 4036	4090 - 5900	635
BMHT 6316 - 10	COP 1238	3090 - 4920	2813 - 4638	4680 - 6500	655
BMHT 6318 - 10	COP 1238	3090 - 5530	2813 - 5258	4680 - 7125	680
BMHT 6614 - 08	COP 1532	2500 - 4310	2130 - 3940	3725 - 5535	610
BMHT 6616 - 10	COP 1532	3090 - 4920	2720 - 4545	4315 - 6140	640
BMHT 6620 - 12	COP 1532	3700 - 6100	3330 - 5730	4925 - 7325	690
BMHT 6814 - 08	COP 1838	2500 - 4310	2221 - 4036	4090 - 5900	635
BMHT 6816 - 10	COP 1838	3090 - 4920	2813 - 4638	4680 - 6500	680
BMHT 6818 - 10	COP 1838	3090 - 5530	2813 - 5258	4680 - 7125	690

Tabela 87 - Selecção de coluna de furação (adaptado de catálogos da ATLAS COPCO).

A segunda condição prende-se com o tipo de rosca utilizada para a ligação dos vários acessórios. Visto tratar-se de uma escavação subterrânea, na qual se utiliza somente uma vara para perfuração, uma vez que os avanços neste tipo de escavação são curtos, não se perdem tempos de enroscamento entre varas, utilizar-se-á por isso Roscas tipo R que formam menores ângulos de passe, permitindo maiores superfícies de contacto e menores dispersões de energia, garantindo melhor rendimento.

A terceira e última condição prende -se com o martelo seleccionado e a sua capacidade de se adaptar a varas de diferentes tipos de ligação. Assim, e tendo em conta que não encontramos varas com ligação fêmea que se adequassem aos objectivos, a selecção da vara recaiu sobre uma vara de rosca macho. A vara seleccionada foi a seguinte:



comprimento		Nº de produto	Peso Kg
mm	pés		
2700	8'10 1/4"	90509478	17,2

Tabela 88 - selecção de vara de furação (adaptado de catálogos de ATLAS COPCO).

Esta vara cumpre as condições referidas e tem capacidade de se ligar ao martelo mediante uma união o que se traduz em maiores perdas de energia de furação porém aumenta a flexibilidade do acoplamento com o encabadouro diminuindo o desgaste entre estes.

#### 4.16.2.7.2 Bit

Diâmetro		Produto nº	código do produto	nº botões	Botões x diâm. (mm)		orifício fluidos		Peso kg
mm	pol.				lateral	Centro	lado	Centro	
Botões balísticos									
48	1 7/8	90509464	103-5048-37-67,39-20	9	6x10	3x9	1	3	0,9
48	1 7/8	90509463	103-5048-37-30-67,39-20	9	6x10	3x8	1	3	1,2

Tabela 89 - seleção de bit de furação (adaptado de catálogos de ATLASCOPCO).

O bit seleccionado, possui 48 milímetros de diâmetro, o que permite furar o diâmetro máximo necessário.

Os bits têm botões balísticos adequados à rocha de natureza branda. Dentro das possibilidades de bits para 48 milímetros a escolha incidiu sobre aquele com furos centrais de maior área (3 x 9) na zona central, pois em obras subterrâneas os bits centrais sofrem maiores desgastes.

#### 4.16.2.7.3 União

A escolha da união para ligar o encabadouro do martelo e a vara (duas roscas macho) recaiu sobre a indicada na Figura 138.

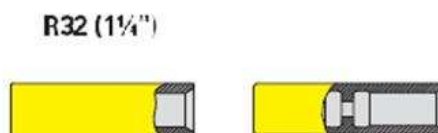


Figura 138 – União seleccionada (adaptado de catálogos de ATLASCOPCO).

#### 4.16.2.7.4 Bits Alargadores

Os bits alargadores serão necessários para a execução dos furos não carregados dos caldeiros. Sabendo que pretendemos a furação de 102 milímetros e que já se encontra um bit em obra capaz de executar o trabalho não há necessidade de compra de um novo.

#### 4.16.2.7.5 Volumes movimentados pelo desmonte

Os volumes desmontados pela detonação de cada furo encontram-se apresentados na seguinte tabela. Através desta é possível observar que cada existe espaço vazio disponível para a movimentação do material aquando da detonação.

	Volume disponível(m3)	Área(m2)	Comprimento do furo (m)	Volume movimentado (m3)	Factor empolamento	Volume movimentado empolado (m3)	Diferença(m3)
1	0,02041785	0,005094	2,5	0,012735	1,3	0,0165555	0,00386235
2	0,03315285	0,005094	2,5	0,012735	1,3	0,0066222	0,02653065
3	0,04588785	0,014345	2,5	0,0358625	1,3	0,0186485	0,02723935
4	0,08175035	0,014345	2,5	0,0358625	1,3	0,02539065	0,0563597
5	0,11761285	0,023318	2,5	0,058295	1,3	0,04127286	0,07633999
6	0,17590785	0,023318	2,5	0,058295	1,3	0,04127286	0,13463499
7	0,23420285	0,057693	2,5	0,1442325	1,3	0,10211661	0,13208624
8	0,37843535	0,057693	2,5	0,1442325	1,3	0,10211661	0,27631874
9	0,52266785	0,104324	2,5	0,26081	1,3	0,18465348	0,33801437
10	0,78347785	0,104324	2,5	0,26081	1,3	0,18465348	0,59882437
11	1,04428785	0,257838	2,5	0,644595	1,3	0,45637326	0,58791459
12	1,68888285	0,257838	2,5	0,644595	1,3	0,45637326	1,23250959
13	2,33347785	0,442653	2,5	1,1066325	1,3	0,78349581	1,54998204
14	3,44011035	0,442653	2,5	1,1066325	1,3	0,78349581	2,65661454
15	4,54674285	1,04881	2,5	2,622025	1,3	1,8563937	2,69034915
16	7,16876785	1,04881	2,5	2,622025	1,3	1,8563937	5,31237415

Tabela 90 - Volumes movimentados pelo rebentamento de cada um dos furos e a sua relação com o espaço disponível.







## 5 Conclusões

Do desenvolvimento deste estudo, e tendo em conta os objectivos do trabalho pretendidos, podemos retirar várias conclusões:

O zonamento geotécnico do projecto apresenta aproximadamente a mesma configuração que o zonamento geotécnico efectuado ao longo do avanço para as zonas escavadas até finais de Julho, o que denuncia uma adequada campanha de prospecção ao nível de definição de malha de sondagens, escolha de parâmetros a avaliar, e definição de zonas com características geotécnicas aproximadamente iguais.

O projecto indicava-nos a passagem de ZG3 para ZG2 na galeria poente Norte algures entre o PK 812,5 e o Pk 800, corroborado pelo zonamento geotécnico em obra que indicou o PK 805 como sendo o PK de mudança.

Relativamente à galeria Norte mas do lado nascente, o projecto indica-nos a fase de transição como gradual, tendo sido expectável que a transição ocorresse desde a soleira da frente de escavação até à calote, à medida que o avanço prosseguisse. Em obra foi considerado como ponto de transição aquele em que a frente de escavação se apresentava na sua grande maioria como um maciço com qualidades que permitissem considera-lo como ZG2, o que ocorreu ao PK 565,5. No entanto o projecto indicava a fase de transição como sendo algures entre o PK 600 e o PK 625. Importa aqui salientar o cuidado acrescido por parte do projectista em classificar o maciço de modo conservativo (i.e. ZG3), uma vez que a linha de separação entre as duas zonas prossegue numa orientação paralela à orientação do túnel no tecto deste, o que poderia ser enganoso e levar a que os avanços fossem demasiados elevados ou que o suporte fosse dimensionado por defeito, provocando aluimentos na galeria.

Na galeria Sul do lado poente, a fase de transição era indicada como sendo algures entre o Pk 820 e o Pk 800. No decorrer dos trabalhos verificou-se a alteração das características do maciço da frente, como sendo algures ao PK 822,5, o que corrobora o zonamento geotécnico feito previamente à obra. É de referir que aqui temos a mesma situação que ocorreu a nascente norte, ou seja, embora o maciço escavável seja ZG2, o maciço do tecto apresenta piores qualidades, pelo que o projectista considera como sendo ZG3 até ao PK800.

A importância de um zonamento geotécnico fica aqui de certo modo evidenciada tanto a nível de projecto, como no decorrer da obra. Evidenciada também, e de forma irrefutável, fica a influência que as características geotécnicas do maciço detêm sobre a produção mensal de uma obra. Com efeito, nos avanços na galeria norte poente durante o mês de Julho ocorreram quedas de produção de 52,95% relativamente ao mês de Junho, sendo que os avanços na galeria norte

nascente foram de 20,75% para os referidos meses. A escavação da galeria Sul ocorreu somente no mês de Julho e na sua maioria em ZG3 pelo que não se podem tirar daqui ilações.

A influência dos planos de xistosidade na escavação com martelo hidráulico, é mais evidente na 1ª fase de escavação. Na 2ª fase, devido à existência de um vazio deixado pela escavação da primeira fase a movimentação da rocha encontra-se facilitada.

O PLT conjuntamente com o Schmidt demonstrou ser uma ferramenta de grande utilidade para a determinação da resistência à compressão uniaxial do maciço e de forma expedita confirmar a possibilidade de utilização de outros métodos de escavação, tais como a cabeça de corte.

De referir ainda outras ocorrências que tiveram influência directa na queda de produtividade nos avanços durante o mês de Junho, concretamente, as avarias verificadas no gerador de energia.

Durante o mês de Julho a situação foi resolvida com o recurso à rede eléctrica municipal. Outros factores são a colocação de enfilagens, e obviamente a ocasional paragem para fim-de-semana.

Também foi evidenciada a importância de que se reveste uma criteriosa selecção das equipas de trabalho e do seu correcto dimensionamento, tendo em vista a concretização dos objectivos pretendidos, quer seja ao nível de produção, quer seja no aspecto da segurança.

Verificou-se também ser importante que os equipamentos sejam dimensionados de acordo com as condições geotécnicas no local, de forma que se obtenha o melhor rendimento. Através do uso da máquina de ataque pontual obter-se-ia rendimentos mais elevados.

O desmonte recorrendo a explosivos demonstra uma grande capacidade de adaptação a diferentes condições da obra, mesmo em condições em que a sua utilização poderia ser a partida desfavorável, como é o caso prático apresentado neste documento. Através da sua utilização, seria possível a abertura de um caldeiro, e expectável um aumento dos rendimentos obtidos com a utilização do martelo hidráulico uma vez que ficaria solucionado o problema de inexistência de um vazio no maciço para o qual o maciço se poderia movimentar.

Por último, importa salientar a importância da engenharia geotécnica na construção de túneis, sobretudo na interpretação de dados e desenvolvimento de soluções para os problemas que se põem na execução de uma obra deste género.





## 6 Referências bibliográficas

Barton, N.R., Lien, R. and Lunde, J. 1974. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock mech.* pp. 189 – 239.

Bastos M., 1998. A Geotecnia na concepção, projecto e execução de túneis em maciços rochosos. Instituto Superior Técnico de Lisboa. 153 pp. (Tese de Mestrado)

Bieniawski, Z. T. 1989. *Engineering Rock mass classification*. New York. 251 pp.

Cargill J.S. & Shakoor A. (1990). Evaluation of empirical methods for measuring the uniaxial compressive strength of rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, pp. 495–503.

Deere, D.U., Hendrom, A.J., Patton; F.D. & Cording, E.J. 1967. Design of surface and near surface construction in rock. In *Failure and breakage of rock, proc. 8th U.S. Symp. Rock mech.*, (ed. C. Fairhurst) pp. 237

Deere, D.U., & Deere, D. W: 1988. The rock quality designation (RQD) index in practice. In *Rock classification systems for engineering purposes*, (ed. L. Kirkaldie ), ASTM Special Publication 984pp.

Deere, D.U. 1989. Rock quality designation (RQD). U.S. Army Corps Engrs Contract Report GL-89-1. Vicksburg, MS

Dinis Gama, C. 1976. Cálculo expedito da estabilidade de túneis e suas necessidades de suporte. VI Simpósio de mineração. USP. *Revista Geologia e mineração*. São Paulo. pp. 101-133.

Estefanía Puebla, S., 1997. Revestimiento com hormigón y dovelas. *Manual de túneles y obras subterráneas*. Ed. C. López Jimeno. Entorno gráfico, Madrid pp. 625-652.

Galiza, C., Vieira, A., Gomes, L. 2007,2008. *Escavações subterâneas 1* 218 pp.

Galiza, C., Vieira, A., Gomes, L. 2007,2008. *Escavações subterâneas 2* 150 pp.

González de Vallejo, L. I.; Ferrer, M.; Ortuño, L. & Oteo, C., 2002. *Ingeniería geológica*. Prentice Hall, Madrid, 715 pp.

GSE - Geological Society Engineering Group Working Party Report (1995). The description and classification of weathered rocks for engineering purposes. *Quarterly Journal of Engineering Geology*,: 207-242.

ISRM–International Society for Rock Mechanics (1981). Basic geotechnical description of rock masses. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geom. Abstr.*, 18: 85-110.

ISRM–International Society for Rock Mechanics (1985). Suggested method for determining point load strength. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geom. Abstr.*, 22: 51-60pp..

Hoek, E. (2007). *Practical rock engineering*. RocScience: Hoek's Corner, 342 pp.

Hoek, E & Brown, E.T. 1980. Underground excavation in rock. Institution of mining and metalurgy, London, 627 pp.

Hoek, E. & Marinos, P. 2000. Predicting tunnel squeezing problems in weak heterogeneous rock masses. *Tunels and Tunneling international*. 2 pp.

Hoek E., 1999. Support for very weak rock associated with faults and shear zones. Lecture for the opening of the international Symp. On rock support and Reinforcement Practice in mining, Australia. 20pp.

Hoek, E., 2001. Big tunnels in bad rock 2000 Terzaghi lecture. *ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Enginnering* Vol. 127, N°9. September 2001, pp. 726-740

Hoek, E., Marinos, P., 2001. Estimating the geotechnical properties of heterogeneous rock masses such as Flysch. Published in *Bull. Engg. Geol. Ev.* 60, 85-92pp.

Hoek E., Wood, D. F., Support in underground hard rock mines. Published in *Uderground support systems*. Sd. J. Udd (Montreal; Canadian institute of mining and metallurgy). Special Volume 35, 1987, pp. 1-6.

ISRM–International Society for Rock Mechanics (2007). The complete ISRM suggested methods for characterization, testing and monitoring: 1974-2006. In: Ulusay, R. & Hudson, J.A. (eds.), suggested methods prepared by the Commission on Testing Methods, ISRM. Ankara, Turkey. 628 pp.

Jimeno, C. L., 2003. Manual de túneles y obras subterráneas. ETSIM, Univ. Polit. Madrid. 1082 pp.

Miranda, T. (2003). Contribuição para a obtenção de parâmetros geomecânicos para a modelação de obras subterrâneas em maciços graníticos. Universidade do Minho, Guimarães, 186 pp. (Tese de Mestrado).

Melâneo, F., 1994. Suportes provisórios e definitivos. Seminário de túneis rodoviários. IST, Lisboa. pp. 109 – 124.

Oliveira R., 1986. Estudos Geológicos e geotécnicos para projecto de túneis. Sociedade Portuguesa de Geotecnia. *Revista de geotecnia*, pp. 9-20

Rivas Vargas, F., 1997. Sostenimiento com entibación metálica. Manual de túneles y obras subterráneas. Ed. C. López Jimeno. Entorno Gráfico, S.L. Madrid. pp. 515-546.

Rock Excavation Handbook. pp. 91

Rocha, M., 1976. Estruturas subterrâneas – Túneis, cavernas, poços. Laboratório nacional de engenharia Civil. Lisboa

Schmidt, E., 1951. A non-destructive concrete tester. *Concrete*, 59 (8): pp. 34-35.

Sites consultados:

Rockscience. 2003. Hoek interview.PDF. In: <http://www.rocscience.com/>  
COBA S.A. 2010. Projecto de execução do túnel de Seixo Alvo.  
Caterpillar. In: <http://www.cat.com/> consulta em Julho/Agosto 2010.  
Putzmeister. In: <http://www.putzmeister.com/> consulta em Julho/Agosto 2010.  
DOOSAN. In: <http://www.doosan.com/> consulta em Julho/Agosto 2010  
Atlas Copco. In <http://www.atlascopco.pt/> consulta em Julho/Agosto 2010  
Proceq In: [www.proceq .com](http://www.proceq.com) consulta em Julho/Agosto 2010  
Manitou. In <http://www.manitou.com/> consulta em Julho/Agosto 2010  
<http://www.ritchiespecs.com/> consulta em Julho/Agosto 2010

**ANEXOS**



**Anexo 1 – Fichas de levantamentos geológico geomecânicos**

**Anexo 2 – Resistência à compressão uniaxial (Martelo SilverShmidt e PLT)**

**Anexo 3 – Classificações geomecânicas**

**Anexo 4 – Mapas de produção dos taludes**

**Anexo 5 – Mapas de produção do túnel**

**Anexo 6 – Plantas**

**Anexo 7 – Caldeiro de desmonte**



**Anexo 1**

**Fichas de levantamento geológico geomecânico**



Parâmetros geológico-geotécnicos e geomecânicos																	
Frente	fase	PK	Descontinuidade	Distância à origem (m) D	Litologia	Grau de alteração		(Atitude pend./Ori.)*	Tipo de descontinuidade (x-xistosidade; D-diaclase)	Abertura (mm)		Classificação F	Tipo de Enchimento	Rugosidade	Continuidade	Presença de água	Observações
						Tipo	Classificação			Valor	Classificação						
Galeria poente norte	2ª	854,3	1	5,70	Xisto	W 4-5	mt.alterado	40/134	Diaclase	0,25 - 2,5 mm	aberta	F4-5	argiloso	R2	1-3 m	pouca humidade	
			2		Xisto	W 4-5	mt.alterado	20/260	xistosidade	0,25 - 2,5 mm	aberta	F5		R2	1-3 m	pouca humidade	
			3		Xisto	W 4-5	mt.alterado	26/250	xistosidade	0,25 - 2,5 mm	aberta	F5		R2	1-3 m	pouca humidade	
			4		Xisto	W 4-5	mt.alterado	52/140	Diaclase	0,25 - 2,5 mm	aberta	F4-5	argiloso	R2	1-3 m	pouca humidade	
	1ª	853,6	5	6,40	Xisto	W 4-5	mt.alterado	44/39	xistosidade	0,25 - 2,5 mm	aberta	F5		R2	1-3 m	pouca humidade	
			6		Xisto	W 4-5	mt.alterado	52/36	xistosidade	0,25 - 2,5 mm	aberta	F5		R2	1-3 m	pouca humidade	
			7		Xisto	W 4-5	mt.alterado	16/114	Diaclase	0,25 - 2,5 mm	aberta	F4-5	mat.orgânica	R2	1-3 m	pouca humidade	
			8		Xisto	W 4-5	mt.alterado	48/30	xistosidade	0,25 - 2,5 mm	aberta	F5		R2	1-3 m	pouca humidade	
			9		Xisto	W 4-5	mt.alterado	50/98	Diaclase	0,25 - 2,5 mm	aberta	F4-5	mat.orgânica	R2	1-3 m	pouca humidade	
			10		Xisto	W 4-5	mt.alterado	16/114	Diaclase	0,25 - 2,5 mm	aberta	F4-5	mat.orgânica	R2	1-3 m	pouca humidade	
			11		Xisto	W 4-5	mt.alterado	56/336	Diaclase	0,25 - 2,5 mm	aberta	F4-5	mat.orgânica	R2	1-3 m	pouca humidade	
	1ª	852,7	12	7,30	Xisto	W5	mt.alterado	24/214	xistosidade	0,25 - 2,5 mm	aberta	F4-5	argiloso mat. org.	R3	1-3 m	pouca humidade	
			13		Xisto	W4-5	mt.alterado	22/196	xistosidade	0,25 - 2,5 mm	aberta	F4-5	argiloso mat. org.	R3	1-3 m	pouca humidade	
			14		Xisto	W5	mt.alterado	24/188	xistosidade	0,25 - 2,5 mm	aberta	F4-5	argiloso mat. org.	R3	1-3 m	pouca humidade	
			15		Xisto	W4-5	mt.alterado	72/202	Diaclase	0,25 - 2,5 mm	aberta	F5	argiloso mat. org.	R3	1-3 m	pouca humidade	
			16		Xisto	W5	mt.alterado	80/184	Diaclase	0,25 - 2,5 mm	aberta	F4-5	argiloso mat. org.	R3	1-3 m	pouca humidade	
			17		Xisto	W4-5	mt.alterado	72/336	Diaclase	0,25 - 2,5 mm	aberta	F5	argiloso mat. org.	R3	1-3 m	pouca humidade	
			18		Xisto	W5	mt.alterado	78/350	xistosidade	0,25 - 2,5 mm	aberta	F4-5	argiloso mat. org.	R3	1-3 m	pouca humidade	
			19		Xisto	W5	mt.alterado	46/70	xistosidade	0,25 - 2,5 mm	aberta	F4-5	argiloso mat. org.	R3	1-3 m	pouca humidade	
	1ª	850,3	20	9,70	Xisto	W5	mt.alterado	48/70	xistosidade	0,25 - 2,5 mm	aberta	F4-5	argiloso mat. org.	R3	1-3 m	pouca humidade	
			21		Xisto	W4-5	mt.alterado	36/184	xistosidade	0,25 - 2,5 mm	aberta	F4-5	argiloso mat. org.	R3	1-3 m	pouca humidade	
			22		Xisto	W4-5	mt.alterado	32/200	xistosidade	0,25 - 2,5 mm	aberta	F4-5	argiloso mat. org.	R3	1-3 m	pouca humidade	
			23		Xisto	W4-5	mt.alterado	70/294	Diaclase	0,25 - 2,5 mm	aberta	F4-5	argiloso mat. org.	R3	1-3 m	pouca humidade	
			24		Xisto	W4-5	mt.alterado	72/304	Diaclase	0,25 - 2,5 mm	aberta	F4-5	argiloso mat. org.	R3	1-3 m	pouca humidade	
			25		Xisto	W4-5	mt.alterado	52/142	Diaclase	0,25 - 2,5 mm	aberta	F4-5	argiloso mat. org.	R3	1-3 m	pouca humidade	
	2ª	847,9	26	12,10	Xisto	W4-5	mt.alterado	48/130	Diaclase	0,25 - 2,5 mm	aberta	F4-5	argiloso mat. org.	R3	1-3 m	pouca humidade	
			27		Xisto	W4-5	mt.alterado	40/138	Diaclase	0,25 - 2,5 mm	aberta	F4-5	arg.	R2	1-3 m	pouca humidade	
			28		Xisto	W4-5	mt.alterado	54/138	Diaclase	0,25 - 2,5 mm	aberta	F4-5	arg.	R2	1-3 m	pouca humidade	
			29		Xisto	W4-5	mt.alterado	50/150	Diaclase	0,25 - 2,5 mm	aberta	F4-5	arg.	R2	1-3 m	pouca humidade	
			30		Xisto	W4-5	mt.alterado	58/232	xistosidade	0,25 - 2,5 mm	aberta	F4-5	arg.	R2	1-3 m	pouca humidade	
			31		Xisto	W4-5	mt.alterado	44/218	xistosidade	0,25 - 2,5 mm	aberta	F4-5	arg.	R2	1-3 m	pouca humidade	
	1ª	844,1	32	15,90	Xisto	W4-5	mt.alterado	70/200	Diaclase	0,25 - 2,5 mm	aberta	F4-5	arg.	R2	1-3 m	pouca humidade	
			33		Xisto	W4	alterado	70/232	Diaclase	0,25 - 2,5 mm	aberta	F4-5	arg.	R2	1-3 m	ligeira humidade	mat. Org/oxidação
			34		Xisto	W4	alterado	74/240	Diaclase	0,25 - 2,5 mm	aberta	F4-5	arg.	R2	1-3 m	ligeira humidade	mat. Org/oxidação
			35		Xisto	W4	alterado	80/234	Diaclase	0,25 - 2,5 mm	aberta	F4-5	arg.	R2	1-3 m	ligeira humidade	mat. Org/oxidação
			36		Xisto	W4	alterado	30/070	Diaclase	0,25 - 2,5 mm	aberta	F4-5	arg.	R2	1-3 m	ligeira humidade	mat. Org/oxidação
			37		Xisto	W4	alterado	34/068	Diaclase	0,25 - 2,5 mm	aberta	F4-5	arg.	R2	1-3 m	ligeira humidade	mat. Org/oxidação
			38		Xisto	W4	alterado	28/072	Diaclase	0,25 - 2,5 mm	aberta	F4-5	arg.	R2	1-3 m	ligeira humidade	mat. Org/oxidação
			39		Xisto	W4	alterado	60/172	Diaclase	0,25 - 2,5 mm	aberta	F4-5	arg.	R2	1-3 m	ligeira humidade	mat. Org/oxidação
			40		Xisto	W4	alterado	52/168	Diaclase	0,25 - 2,5 mm	aberta	F4-5	arg.	R2	1-3 m	ligeira humidade	mat. Org/oxidação
			41		Xisto	W4	alterado	34/200	xistosidade	0,25 - 2,5 mm	aberta	F4-5	arg.	R2	1-3 m	ligeira humidade	mat. Org/oxidação
			42		Xisto	W4	alterado	30/192	xistosidade	0,25 - 2,5 mm	aberta	F4-5	arg.	R2	1-3 m	ligeira humidade	mat. Org/oxidação
			43		Xisto	W4	alterado	36/190	xistosidade	0,25 - 2,5 mm	aberta	F4-5	arg.	R2	1-3 m	ligeira humidade	mat. Org/oxidação
	1ª	833,4	44	26,60	Xisto	W3-4	alterado	48/110	Diaclase	0,50 - 2,50	aberta	F4-5	arg.	R2	1-3 m	ligeira humidade	mat. Org/oxidação
			45		Xisto	W3-4	alterado	40/119	Diaclase	0,50 - 2,50	aberta	F4-5	arg.	R2	1-3 m	ligeira humidade	mat. Org/oxidação
			46		Xisto	W3-4	alterado	14/047	xistosidade	0,50 - 2,50	aberta	F4-5	arg.	R2	1-3 m	ligeira humidade	mat. Org/oxidação
			47		Xisto	W3-4	alterado	40/035	xistosidade	0,50 - 2,50	aberta	F4-5	arg.	R2	1-3 m	ligeira humidade	mat. Org/oxidação
			48		Xisto	W3-4	alterado	54/335	Diaclase	0,50 - 2,50	aberta	F4-5	arg.	R2	1-3 m	ligeira humidade	mat. Org/oxidação

\*Dados convertidos para sistema pend/orientação de modo a serem introduzidos no programa informático dips

Frente	fase	PK	Descontinuidade	Distância à origem (m) D	Litologia	Grau de alteração		(Atitude pend./Ori.)*	Tipo de descontinuidade (x-xistosidade; D-diaclase)	Abertura (mm)			Tipo de Enchimento	Rugosidade	Continuidade	Presença de água	Observações
						Tipo	Classificação			Valor	Classificação	Classificação F					
Galeria poente norte	1º	829,8	49	30,20	Xisto	W3-4	alterado	40/336	Diaclase	0,50 - 2,50	aberta	F4-5	argiloso mat. org.	R3	1-3 m	pouca humidade	
			50		Xisto	W3-4	alterado	40/220	xistosidade	0,50 - 2,50	aberta	F4-5	argiloso mat. org.	R3	1-3 m	pouca humidade	
			51		Xisto	W3-4	alterado	60/220	xistosidade	0,50 - 2,50	aberta	F4-5	argiloso mat. org.	R3	1-3 m	pouca humidade	
			52		Xisto	W3-4	alterado	70/20	Diaclase	0,50 - 2,50	aberta	F4-5	argiloso mat. org.	R3	1-3 m	pouca humidade	
	1º	827,1	32,90	53	Xisto	W4	alterado	40/220	xistosidade	0,25 - 2,50	aberta	F4-5	arg.	R2	1-3 m	ligeira humidade	mat.orgânica
				54	Xisto	W4	alterado	60/220	xistosidade	0,25 - 2,51	aberta	F4-5	arg.	R2	1-3 m	ligeira humidade	mat.orgânica
				55	Xisto	W4	alterado	40/336	Diaclase	0,25 - 2,52	aberta	F4-5	arg.	R2	1-3 m	ligeira humidade	mat.orgânica
				56	Xisto	W4	alterado	70/020	Diaclase	0,25 - 2,53	aberta	F4-5	arg.	R2	1-3 m	ligeira humidade	mat.orgânica
	1º	811,3	48,70	57	Xisto	W4	alterado	80/220	xistosidade	0,25 - 2,54	aberta	F4	arg.	R2	1-3 m	ligeira humidade	
				58	Xisto	W4	alterado	46/224	xistosidade	0,25 - 2,55	aberta	F4	arg.	R2	1-3 m	ligeira humidade	
				59	Xisto	W4	alterado	74/150	Diaclase	>5mm	aberta	F4	arg.	R2	1-3 m	ligeira humidade	
				60	Xisto	W4	alterado	44/178	Diaclase	>5mm	aberta	F4	arg.	R2	1-3 m	ligeira humidade	
				61	Xisto	W4	alterado	60/062	Diaclase	>5mm	aberta	F4	arg.	R2	1-3 m	ligeira humidade	
	1º	807,1	52,90	62	Xisto	W3	alterado	40/236	xistosidade	<0,5mm	fechada	F4	arg.	R2	1-3 m	ligeira humidade	
				63	Xisto	W3	alterado	24/232	xistosidade	<0,5mm	fechada	F4	arg.	R2	1-3 m	ligeira humidade	
				64	Xisto	W3	alterado	46/204	xistosidade	<0,5mm	fechada	F4	arg.	R2	1-3 m	ligeira humidade	
				65	Xisto	W3	alterado	68/130	Diaclase	<0,5mm	fechada	F4	arg.	R2	1-3 m	ligeira humidade	
	1º	804,6	55,40	66	Xisto	W3	alterado	34/046	Diaclase	<0,5mm	fechada	F4	arg.	R2	<1m	ligeira humidade	
				67	Xisto	W3	mod. Alterado.	28/218	xistosidade	>5mm	aberta	F4	arg.	R2	<1m	ligeira humidade	
				68	Xisto	W3	mod. Alterado.	30/224	xistosidade	>5mm	aberta	F4	arg.	R2	<1m	ligeira humidade	
				69	Xisto	W3	mod. Alterado.	36/220	xistosidade	>5mm	aberta	F4	arg.	R2	<1m	ligeira humidade	
	1º	803,5	56,50	70	Xisto	W3	mod. Alterado.	26/230	xistosidade	>5mm	aberta	F4	arg.	R2	<1m	ligeira humidade	
				71	Xisto	W3-4	alterado	44/148	Diaclase	>0,5mm	aberta	F4-5	arg.	R2	1-3 m	ligeira humidade	mat. Org/oxidação
				72	Xisto	W3-4	alterado	40/140	Diaclase	>0,5mm	aberta	F4-5	arg.	R2	1-3 m	ligeira humidade	mat. Org/oxidação
				73	Xisto	W3-4	alterado	38/214	xistosidade	>0,5mm	aberta	F4-5	arg.	R2	1-3 m	ligeira humidade	mat. Org/oxidação
				74	Xisto	W3-4	alterado	32/228	xistosidade	>0,5mm	aberta	F4-5	arg.	R2	1-3 m	ligeira humidade	mat. Org/oxidação
	1º	800,95	59,05	75	Xisto	W3-4	alterado	68/030	Diaclase	>0,5mm	aberta	F4-5	arg.	R2	1-3 m	ligeira humidade	mat. Org/oxidação
				76	Xisto	W3-4	alterado	44/222	xistosidade	0,1 -0,5	fechada	F4	arg.	R2	1-3 m	ligeira humidade	mat. Org/oxidação
				77	Xisto	W3-4	alterado	38/216	xistosidade	0,1 -0,5	fechada	F4	arg.	R2	1-3 m	ligeira humidade	mat. Org/oxidação
				78	Xisto	W3-4	alterado	40/210	xistosidade	0,1 -0,5	fechada	F4	arg.	R2	1-3 m	ligeira humidade	mat. Org/oxidação
				79	Xisto	W3-4	alterado	38/146	Diaclase	0,1 -0,5	fechada	F4	arg.	R2	1-3 m	ligeira humidade	mat. Org/oxidação
	1º	797,5	62,50	80	Xisto	W3-4	alterado	30/132	Diaclase	0,1 -0,5	fechada	F4	arg.	R2	1-3 m	ligeira humidade	mat. Org/oxidação
				81	Xisto	W3-4	alterado	48/226	xistosidade	<0,50	fechada	F4	arg.	R2	1-3 m	ligeira humidade	mat.orgânica
				82	Xisto	W3-4	alterado	50/212	xistosidade	<0,50	fechada	F4	arg.	R2	1-3 m	ligeira humidade	mat.orgânica
				83	Xisto	W3-4	alterado	54/220	xistosidade	<0,50	fechada	F4	arg.	R2	1-3 m	ligeira humidade	mat.orgânica
				84	Xisto	W3-4	alterado	40/156	xistosidade	<0,50	fechada	F4	arg.	R2	1-3 m	ligeira humidade	mat.orgânica
				85	Xisto	W3-4	alterado	26/130	xistosidade	<0,50	fechada	F4	arg.	R2	1-3 m	ligeira humidade	mat.orgânica
				86	Xisto	W3-4	alterado	50/126	xistosidade	<0,50	fechada	F4	arg.	R2	1-3 m	ligeira humidade	mat.orgânica
				87	Xisto	W3-4	alterado	18/136	xistosidade	<0,50	fechada	F4	arg.	R2	1-3 m	ligeira humidade	mat.orgânica
				88	Xisto	W3-4	alterado	36/040	Diaclase	<0,50	fechada	F4	arg.	R2	1-3 m	ligeira humidade	mat.orgânica
				89	Xisto	W3-4	alterado	46/140	Diaclase	<0,50	fechada	F4	arg.	R2	1-3 m	ligeira humidade	mat.orgânica
	1º	794,8	65,20	90	Xisto	W3-4	alterado	26/222	xistosidade	<0,50	fechada	F4	arg.	R2	1-3 m	ligeira humidade	mat.orgânica
				91	Xisto	W3-4	alterado	34/230	xistosidade	<0,50	fechada	F4	arg.	R2	1-3 m	ligeira humidade	mat.orgânica
				92	Xisto	W3-4	alterado	28/116	xistosidade	<0,50	fechada	F4	arg.	R2	1-3 m	ligeira humidade	mat.orgânica
				93	Xisto	W3-4	alterado	32/124	xistosidade	<0,50	fechada	F4	arg.	R2	1-3 m	ligeira humidade	mat.orgânica
				94	Xisto	W3-4	alterado	20/290	Diaclase	<0,50	fechada	F4	arg.	R2	1-3 m	ligeira humidade	mat.orgânica
	1º	793,2	66,80	95	Xisto	W3-4	alterado	30/212	xistosidade	<0,50	fechada	F4	arg.	R2	1-3 m	ligeira humidade	mat.orgânica
				96	Xisto	W3-4	alterado	26/110	xistosidade	<0,50	fechada	F4	arg.	R2	1-3 m	ligeira humidade	mat.orgânica
				97	Xisto	W3-4	alterado	56/146	Diaclase	<0,50	fechada	F4	arg.	R2	1-3 m	ligeira humidade	mat.orgânica
				98	Xisto	W3-4	alterado	64/136	Diaclase	<0,50	fechada	F4	arg.	R2	1-3 m	ligeira humidade	mat.orgânica
	1º	792	68,00	99	Xisto	W3-4	alterado	20/260	xistosidade	<0,50	fechada	F4	arg.	R2	1-3 m	ligeira humidade	mat.orgânica
				100	Xisto	W3-4	alterado	24/254	xistosidade	<0,50	fechada	F4	arg.	R2	1-3 m	ligeira humidade	mat.orgânica
				101	Xisto	W3-4	alterado	40/120	xistosidade	<0,50	fechada	F4	arg.	R2	1-3 m	ligeira humidade	mat.orgânica
				102	Xisto	W3-4	alterado	36/140	xistosidade	<0,50	fechada	F4	arg.	R2	1-3 m	ligeira humidade	mat.orgânica
				103	Xisto	W3-4	alterado	46/144	xistosidade	<0,50	fechada	F4	arg.	R2	1-3 m	ligeira humidade	mat.orgânica
				104	Xisto	W3-4	alterado	58/168	Diaclase	<0,50	fechada	F4	arg.	R2	1-3 m	ligeira humidade	mat.orgânica

\*Dados convertidos para sistema pend/orientação de modo a serem introduzidos no programa informático dips

Frente	fase	PK	Descontinuidade	Distância à origem (m) D	Litologia	Grau de alteração		(Atitude Pendor/orientação)*	Tipo de descontinuidade (F-falha; D-diaclase X-xistosidade)	Abertura (mm)		Tipo de Enchimento	Rugosidade	Continuidade	Presença de água	Observações	
						Tipo	Classificação			Valor	Classificação						Classificação F
Nascente Norte	1ª	558,3	1	5	Xisto	W4	mt. Alterado	20/134	xistosidade	<0,5mm	fechada	F4-5	argiloso	R2	1-3m	lig. Humidade	vestígios de pirite
			2		Xisto	W4	mt. Alterado	28/134	xistosidade	<0,5mm	fechada	F4-5	argiloso	R2	1-3m	lig. Humidade	vestígios de pirite
			3		Xisto	W4	mt. Alterado	66/210	Diaclase	<0,5mm	fechada	F4-5	argiloso	R2	1-3m	lig. Humidade	vestígios de pirite
			4		Xisto	W4	mt. Alterado	70/050	Diaclase	<0,5mm	fechada	F4-5	argiloso	R2	1-3m	lig. Humidade	vestígios de pirite
	1ª	561,6	8,3	5	Xisto	W4	mt. Alterado	40/006	Falha	<0,5mm	fechada	F4-5	argiloso	R2	3-10 (8)	lig. Humidade	Falha separando material W5 de W4
				6	Xisto	W4	mt. Alterado	64/138	xistosidade	<0,5mm	fechada	F4-5	argiloso	R2	1 - 3m	lig. Humidade	
				7	Xisto	W4	mt. Alterado	64/156	xistosidade	<0,5mm	fechada	F4-5	argiloso	R2	1 - 3m	lig. Humidade	
				8	Xisto	W4	mt. Alterado	10/294	xistosidade	<0,5mm	fechada	F4-5	argiloso	R2	1 - 3m	lig. Humidade	
				9	Xisto	W4	mt. Alterado	26/294	xistosidade	<0,5mm	fechada	F4-5	argiloso	R2	1 - 3m	lig. Humidade	
	1ª	564,7	11,4	10	Xisto	W3-4	Alterado	22/126	xistosidade	<0,5mm	fechada	F4-5	argiloso	R2	1 - 3m	lig. Humidade	Presença quartzo e pirite
				11	Xisto	W3-4	Alterado	12/120	xistosidade	<0,5mm	fechada	F4-5	argiloso	R2	1 - 3m	lig. Humidade	Presença quartzo e pirite
				12	Xisto	W3-4	Alterado	20/140	xistosidade	<0,5mm	fechada	F4-5	argiloso	R2	1 - 3m	lig. Humidade	Presença quartzo e pirite
				13	Xisto	W3-4	Alterado	20/180	xistosidade	<0,5mm	fechada	F4-5	argiloso	R2	1 - 3m	lig. Humidade	Presença quartzo e pirite
	1ª	571,7	18,40	14	Xisto	W3-4	Alterado	60/50	Diaclase	<0,5mm	fechada	F4-5	argiloso	R2	1 - 3m	lig. Humidade	Presença quartzo e pirite
				15	Xisto	W3-4	alterado	24/126	xistosidade	<5mm	aberta	F4-5	argiloso	R2	3-10 m	lig. Humidade	
				16	Xisto	W3-4	alterado	26/130	xistosidade	<5mm	aberta	F4-5	argiloso	R2	3-10 m	lig. Humidade	oxidação
				17	Xisto	W3-4	alterado	30/120	xistosidade	<5mm	aberta	F4-5	argiloso	R2	3-10 m	lig. Humidade	oxidação
	1ª	575,6	22,30	18	Xisto	W3-4	alterado	82/174	Diaclase	<5mm	aberta	F4-5	argiloso	R2	3-10 m	lig. Humidade	oxidação
				19	Xisto	W3-4	alterado	76/330	Diaclase	<5mm	aberta	F4-5	argiloso	R2	1-3m	lig. Humidade	oxidação
				20	Xisto	W3-4	alterado	46/124	xistosidade	<5mm	aberta	F4-5	argiloso	R2	1-3m	lig. Humidade	oxidação
				21	Xisto	W3-4	alterado	38/114	xistosidade	<5mm	aberta	F4-5	argiloso	R2	1-3m	lig. Humidade	oxidação
				22	Xisto	W3-4	alterado	72/158	xistosidade	<5mm	aberta	F4-5	argiloso	R2	1-3m	lig. Humidade	oxidação
				23	Xisto	W3-4	alterado	30/262	xistosidade	<5mm	aberta	F4-5	argiloso	R2	1-3m	lig. Humidade	oxidação
				24	Xisto	W3-4	alterado	20/256	xistosidade	<5mm	aberta	F4-5	argiloso	R2	1-3m	lig. Humidade	oxidação
				25	Xisto	W3-4	alterado	28/252	xistosidade	<5mm	aberta	F4-5	argiloso	R2	1-3m	lig. Humidade	oxidação/ pres. quartzo
	1ª	579,6	26,3	26	Xisto	W3-4	alterado	20/260	xistosidade	<0,5mm	fechada	F4-5	argiloso	R2	1-3m	lig. Humidade	oxidação/ pres. quartzo
				27	Xisto	W3-4	alterado	32/246	xistosidade	<0,5mm	fechada	F4-5	argiloso	R2	1-3m	lig. Humidade	oxidação/ pres. quartzo
				28	Xisto	W3-4	alterado	24/252	xistosidade	<0,5mm	fechada	F4-5	argiloso	R2	1-3m	lig. Humidade	oxidação/ pres. quartzo
				29	Xisto	W3-4	alterado	44/122	Diaclase	<0,5mm	fechada	F4-5	argiloso	R2	1-3m	lig. Humidade	oxidação/ pres. quartzo
				30	Xisto	W3-4	alterado	50/286	Diaclase	<0,5mm	fechada	F4-5	argiloso	R2	1-3m	lig. Humidade	oxidação/ pres. quartzo
	1ª	582,9	29,6	31	Xisto	W 3-4	alterado	24/250	xistosidade	<0,5mm	fechada	F4-5	argiloso	R2	1-3m	lig. Humidade	
				32	Xisto	W 3-4	alterado	28/230	xistosidade	<0,5mm	fechada	F4-5	argiloso	R2	1-3m	lig. Humidade	
				33	Xisto	W 3-4	alterado	32/248	xistosidade	<0,5mm	fechada	F4-5	argiloso	R2	1-3m	lig. Humidade	
				34	Xisto	W 3-4	alterado	54/142	Diaclase	<0,5mm	fechada	F4-5	argiloso	R2	1-3m	lig. Humidade	
				35	Xisto	W 3-4	alterado	60/130	Diaclase	<0,5mm	fechada	F4-5	argiloso	R2	1-3m	lig. Humidade	
	1ª	584,4	31,1	36	Xisto	W3-4	mt. Alterado	26/240	xistosidade	<0,5mm	fechada	F4-5	argiloso	R2	1-3m	lig. Humidade	presença de quartzo
				37	Xisto	W3-4	mt. Alterado	34/246	xistosidade	<0,5mm	fechada	F4-5	argiloso	R2	1-3m	lig. Humidade	presença de quartzo
				38	Xisto	W3-4	mt. Alterado	30/250	xistosidade	<0,5mm	fechada	F4-5	argiloso	R2	1-3m	lig. Humidade	presença de quartzo
				39	Xisto	W3-4	mt. Alterado	52/134	xistosidade	<0,5mm	fechada	F4-5	argiloso	R2	1-3m	lig. Humidade	presença de quartzo
				40	Xisto	W3-4	mt. Alterado	48/140	xistosidade	<0,5mm	fechada	F4-5	argiloso	R2	1-3m	lig. Humidade	presença de quartzo
	1ª	587,7	34,4	41	Xisto	W3-4	Alterado	20/250	xistosidade	<0,5mm	fechada	F4-5	argiloso	R2	1 - 3m	lig. Humidade	vestígios de oxidação
				42	Xisto	W3-4	Alterado	30/240	xistosidade	<0,5mm	fechada	F4-5	argiloso	R2	1 - 3m	lig. Humidade	vestígios de oxidação
				43	Xisto	W3-4	Alterado	24/248	xistosidade	<0,5mm	fechada	F4-5	argiloso	R2	1 - 3m	lig. Humidade	vestígios de oxidação
				44	Xisto	W3-4	Alterado	32/294	Diaclase	<0,5mm	fechada	F4-5	argiloso	R2	1 - 3m	lig. Humidade	vestígios de oxidação
				45	Xisto	W3-4	Alterado	20/200	Diaclase	<0,5mm	fechada	F4-5	argiloso	R2	1 - 3m	lig. Humidade	vestígios de oxidação
	1ª	591,2	37,9	46	Xisto	W3-4	Alterado	22/246	xistosidade	<0,5mm	fechada	F4-5	argiloso	R2	1 - 3m	lig. Humidade	Presença quartzo e pirite
				47	Xisto	W3-4	Alterado	28/238	xistosidade	<0,5mm	fechada	F4-5	argiloso	R2	1 - 3m	lig. Humidade	Presença quartzo e pirite
				48	Xisto	W3-4	Alterado	30/240	xistosidade	<0,5mm	fechada	F4-5	argiloso	R2	1 - 3m	lig. Humidade	Presença quartzo e pirite
				49	Xisto	W3-4	Alterado	62/154	Diaclase	<0,5mm	fechada	F4-5	argiloso	R2	1 - 3m	lig. Humidade	Presença quartzo e pirite

\* Dados convertidos para sistema pend/orientação de modo a serem introduzidos no programa informático dips

Frente	fase	PK	Descontinuidade	Distância à origem (m) D	Litologia	Grau de alteração		(Atitude pend/ori.)*	Tipo de descontinuidade (X-xistosidade; D-diacfase)	Abertura (mm)			Tipo de Enchimento	Rugosidade	Continuidade	Presença de água	Observações
						Tipo	Classificação			Valor	Classificação	Classificação F					
Galeria poente Sul	1ª	844,5	1	5,5	Xisto	W4	muito alterado	54/240	Xistosidade	<0,5	fechada	F 4-5	argiloso	R2	<1 m	ligeira	
			2		Xisto	W4	muito alterado	38/232	Xistosidade	<0,5	fechada	F 4-5	argiloso	R2	<1 m	ligeira	
			3		Xisto	W4	muito alterado	64/228	Xistosidade	<0,5	fechada	F 4-5	argiloso	R2	<1 m	ligeira	
			4		Xisto	W4	muito alterado	72/202	Xistosidade	<0,5	fechada	F 4-5	argiloso	R2	<1 m	ligeira	
			5		Xisto	W4	muito alterado	80/124	Diacfase	<0,5	fechada	F 4-5	argiloso	R2	<1 m	ligeira	
	2ª fase	840,6	6	9,4	Xisto	W4	muito alterado	38/196	Xistosidade	>5	aberta	F 4-5	argiloso	R2	1-3m	ligeira	
			7		Xisto	W4	muito alterado	40/202	Xistosidade	>5	aberta	F 4-5	argiloso	R2	1-3m	ligeira	
			8		Xisto	W4	muito alterado	44/190	Xistosidade	>5	aberta	F 4-5	argiloso	R2	1-3m	ligeira	
			9		Xisto	W4	muito alterado	54/138	Diacfase	>5	aberta	F 4-5	argiloso	R2	1-3m	ligeira	
			10		Xisto	W4	muito alterado	46/126	Diacfase	>5	aberta	F 4-5	argiloso	R2	1-3m	ligeira	
	1ª	837,2	11	12,8	Xisto	W4	muito alterado	60/230	Xistosidade	<0,5	fechada	F 4-5	argiloso	R2	<1m	ligeira	
			12		Xisto	W4	muito alterado	72/228	Xistosidade	<0,5	fechada	F 4-5	argiloso	R2	<1m	ligeira	
			13		Xisto	W4	muito alterado	78/236	Xistosidade	<0,5	fechada	F 4-5	argiloso	R2	<1m	ligeira	
			14		Xisto	W4	muito alterado	28/062	Diacfase	<0,5	fechada	F 4-5	argiloso	R2	<1m	ligeira	
			15		Xisto	W4	muito alterado	30/054	Diacfase	<0,5	fechada	F 4-5	argiloso	R2	<1m	ligeira	
			16		Xisto	W4	muito alterado	50/160	Diacfase	<0,5	fechada	F 4-5	argiloso	R2	<1m	ligeira	
			17		Xisto	W4	muito alterado	42/154	Diacfase	<0,5	fechada	F 4-5	argiloso	R2	<1m	ligeira	
	1ª	833,5	18	16,5	Xisto	W4	muito alterado	64/112	Diacfase	>5	aberta	F 4-5	argiloso	R2	1-3m	ligeira	
			19		Xisto	W4	muito alterado	60/124	Diacfase	>5	aberta	F 4-5	argiloso	R2	1-3m	ligeira	
			20		Xisto	W4	muito alterado	84/206	Xistosidade	>5	aberta	F 4-5	argiloso	R2	1-3m	ligeira	
			21		Xisto	W4	muito alterado	50/230	Xistosidade	>5	aberta	F 4-5	argiloso	R2	1-3m	ligeira	
			22		Xisto	W4	muito alterado	38/232	Xistosidade	>5	aberta	F 4-5	argiloso	R2	1-3m	ligeira	
	1ª	829,1	23	20,9	Xisto	W4	muito alterado	44/250	Xistosidade	>5	aberta	F 4-5	argiloso	R2	1-3m	ligeira	
			24		Xisto	W4	muito alterado	36/248	Xistosidade	>5	aberta	F 4-5	argiloso	R2	1-3m	ligeira	
			25		Xisto	W4	muito alterado	38/240	Xistosidade	>5	aberta	F 4-5	argiloso	R2	1-3m	ligeira	
			26		Xisto	W4	muito alterado	56/128	Diacfase	>5	aberta	F 4-5	argiloso	R2	1-3m	ligeira	
			27		Xisto	W4	muito alterado	74/330	Diacfase	>5	aberta	F 4-5	argiloso	R2	1-3m	ligeira	
	1ª	825,6	28	24,4	Xisto	W4	muito alterado	48/222	Xistosidade	>5	aberta	F 4-5	argiloso	R2	1-3m	ligeira	
			29		Xisto	W4	muito alterado	54/236	Xistosidade	>5	aberta	F 4-5	argiloso	R2	1-3m	ligeira	
			30		Xisto	W4	muito alterado	40/230	Xistosidade	>5	aberta	F 4-5	argiloso	R2	1-3m	ligeira	
			31		Xisto	W4	muito alterado	30/124	Diacfase	>5	aberta	F 4-5	argiloso	R2	1-3m	ligeira	
			32		Xisto	W4	muito alterado	38/132	Diacfase	>5	aberta	F 4-5	argiloso	R2	1-3m	ligeira	
	1ª	823	33	27	Xisto	W4	muito alterado	34/240	Xistosidade	>5	aberta	F 4-5	argiloso	R2	1-3m	ligeira	
			34		Xisto	W4	muito alterado	30/244	Xistosidade	>5	aberta	F 4-5	argiloso	R2	1-3m	ligeira	
			35		Xisto	W4	muito alterado	26/116	Xistosidade	>5	aberta	F 4-5	argiloso	R2	1-3m	ligeira	
			36		Xisto	W4	muito alterado	30/110	Xistosidade	>5	aberta	F 4-5	argiloso	R2	1-3m	ligeira	
			37		Xisto	W4	muito alterado	84/324	Diacfase	>5	aberta	F 4-5	argiloso	R2	1-3m	ligeira	
	1ª	820,8	38	29,2	Xisto	W3-4	muito alterado	50/194	Xistosidade	>5	aberta	F 4-5	argiloso	R2	1-3m	húmido	
			39		Xisto	W3-4	muito alterado	46/210	Xistosidade	>5	aberta	F 4-5	argiloso	R2	1-3m	húmido	
			40		Xisto	W3-4	muito alterado	42/200	Xistosidade	>5	aberta	F 4-5	argiloso	R2	1-3m	húmido	
			41		Xisto	W3-4	muito alterado	38/170	Xistosidade	>5	aberta	F 4-5	argiloso	R2	1-3m	húmido	
			42		Xisto	W3-4	muito alterado	40/178	Xistosidade	>5	aberta	F 4-5	argiloso	R2	1-3m	húmido	
			43		Xisto	W3-4	muito alterado	86/310	Diacfase	>5	aberta	F 4-5	argiloso	R2	1-3m	húmido	
	1ª	820	44	30	Xisto	W3-4	muito alterado	38/230	Xistosidade	>5	aberta	F 4-5	argiloso	R2	1-3m	húmido	
			45		Xisto	W3-4	muito alterado	30/240	Xistosidade	>5	aberta	F 4-5	argiloso	R2	1-3m	húmido	
			46		Xisto	W3-4	muito alterado	34/236	Xistosidade	>5	aberta	F 4-5	argiloso	R2	1-3m	húmido	
			47		Xisto	W3-4	muito alterado	60/148	Diacfase	>5	aberta	F 4-5	argiloso	R2	1-3m	húmido	

\* Dados convertidos para sistema pend/orientação de modo a serem introduzidos no programa informático dips

**Anexo 2**

**Resistência à compressão uniaxial (Martelo SilverShmidt e PLT)**

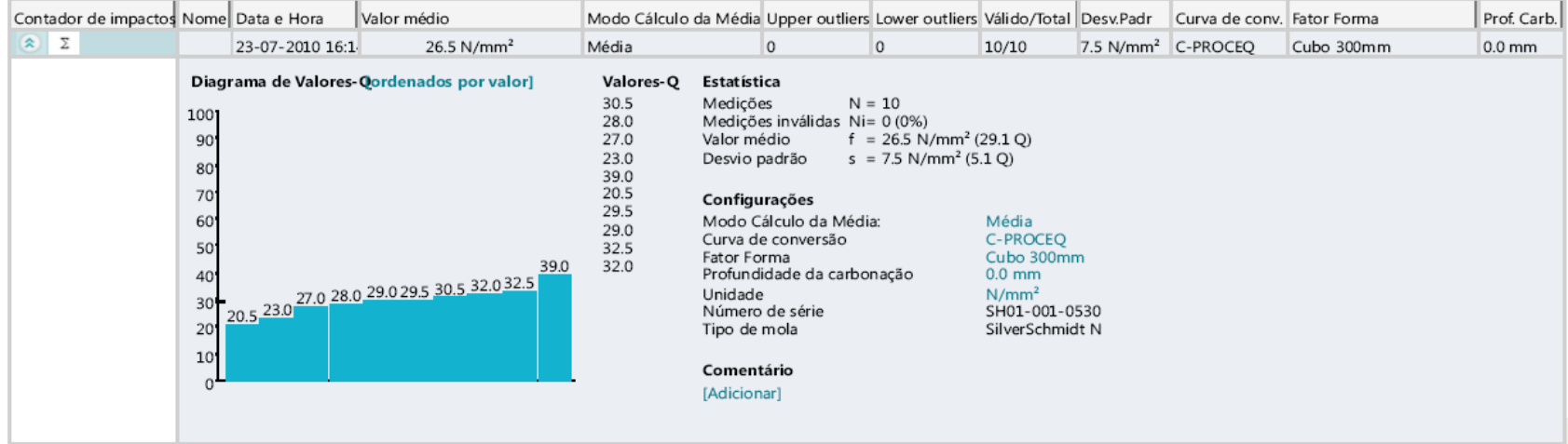


## Resultados martelo Silver Shmidt

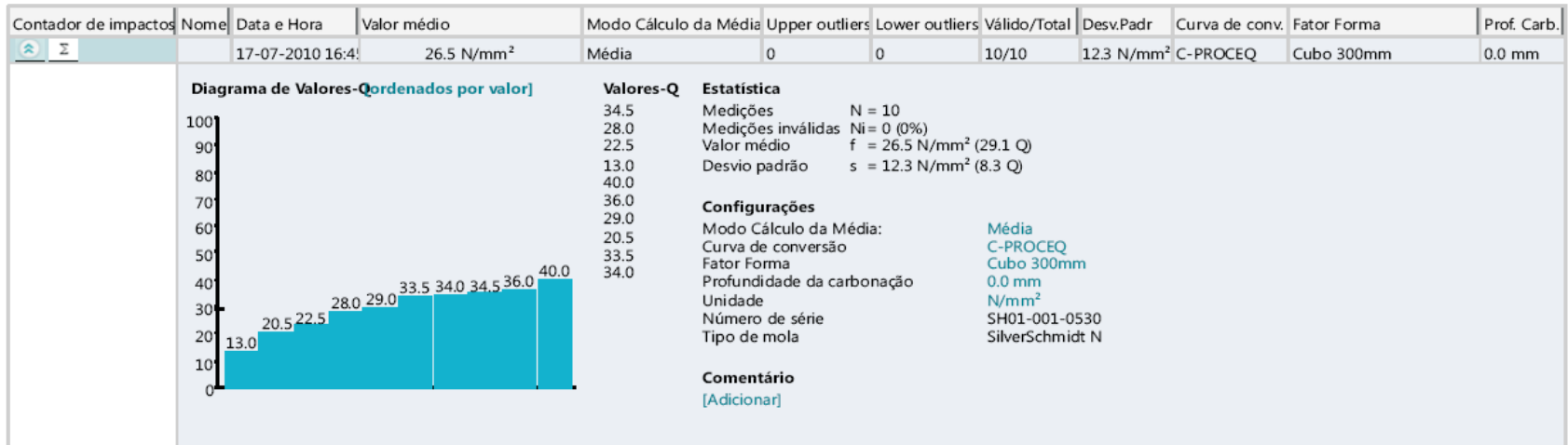
POENTE NORTE												
PK 0+814,5	Contador de impactos	Nome	Data e Hora	Valor médio	Modo Cálculo da Média	Upper outliers	Lower outliers	Válido/Total	Desv.Padr	Curva de conv.	Fator Forma	Prof. Carb.
		Σ		17-07-2010 16:3	31.0 N/mm <sup>2</sup>	Média	0	0	10/10	6.3 N/mm <sup>2</sup>	C-PROCEQ	Cubo 300mm
	<b>Diagrama de Valores-Q [ordenados por valor]</b>				<b>Valores-Q</b>	<b>Estatística</b>						
				36.0	Medições	N = 10						
				38.0	Medições inválidas	Ni = 0 (0%)						
				30.0	Valor médio	f = 31.0 N/mm <sup>2</sup> (32.2 Q)						
				27.0	Desvio padrão	s = 6.3 N/mm <sup>2</sup> (3.7 Q)						
				35.0	<b>Configurações</b>							
				35.0	Modo Cálculo da Média:	Média						
				32.5	Curva de conversão	C-PROCEQ						
				28.5	Fator Forma	Cubo 300mm						
				28.5	Profundidade da carbonação	0.0 mm						
				31.5	Unidade	N/mm <sup>2</sup>						
					Número de série	SH01-001-0530						
					Tipo de mola	SilverSchmidt N						
					<b>Comentário</b>							
					<a href="#">[Adicionar]</a>							
PK 0+810,6	Contador de impactos	Nome	Data e Hora	Valor médio	Modo Cálculo da Média	Upper outliers	Lower outliers	Válido/Total	Desv.Padr	Curva de conv.	Fator Forma	Prof. Carb.
	Σ		20-07-2010 11:2	31.5 N/mm <sup>2</sup>	Média	0	0	10/10	15.3 N/mm <sup>2</sup>	C-PROCEQ	Cubo 300mm	0.0 mm
	<b>Diagrama de Valores-Q [ordenados por valor]</b>				<b>Valores-Q</b>	<b>Estatística</b>						
				32.0	Medições	N = 10						
				46.0	Medições inválidas	Ni = 0 (0%)						
				23.5	Valor médio	f = 31.5 N/mm <sup>2</sup> (32.4 Q)						
				36.0	Desvio padrão	s = 15.3 N/mm <sup>2</sup> (9.1 Q)						
				41.0	<b>Configurações</b>							
				22.5	Modo Cálculo da Média:	Média						
				32.5	Curva de conversão	C-PROCEQ						
				17.0	Fator Forma	Cubo 300mm						
				40.0	Profundidade da carbonação	0.0 mm						
				41.0	Unidade	N/mm <sup>2</sup>						
				46.0	Número de série	SH01-001-0530						
					Tipo de mola	SilverSchmidt N						
					<b>Comentário</b>							
					<a href="#">[Adicionar]</a>							

POENTE NORTE

PK 0+807,6

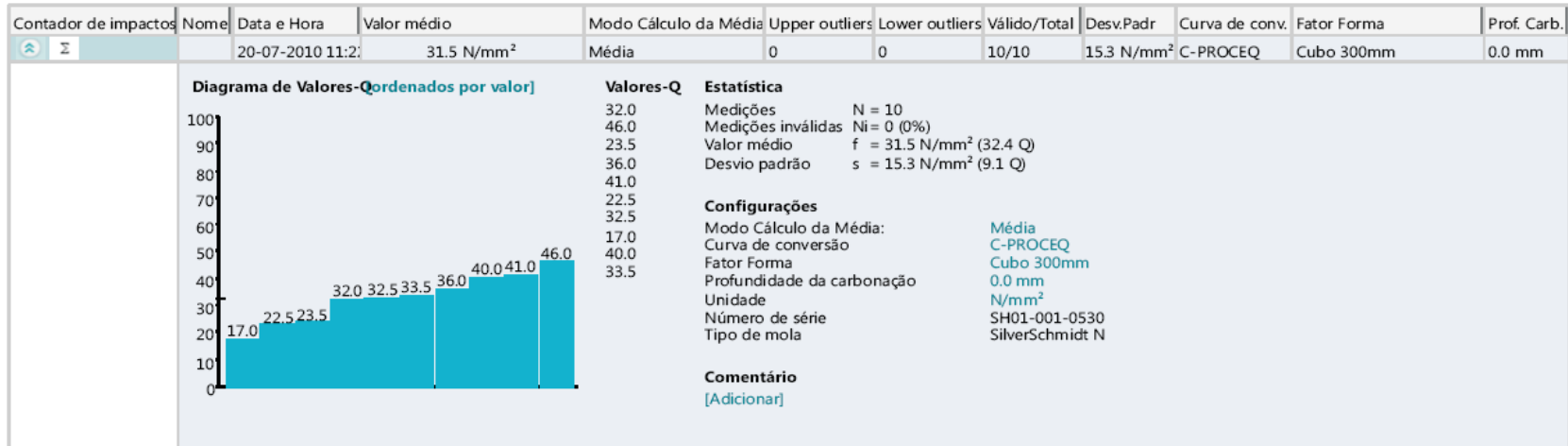


PK 0+800,95

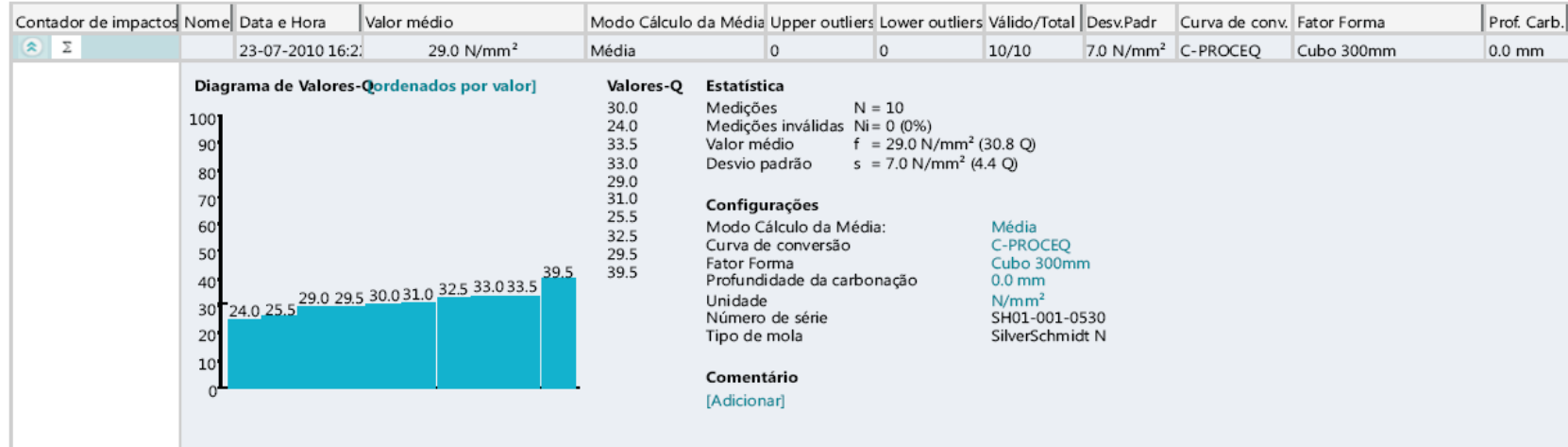


POENTE NORTE

PK 0+797,5

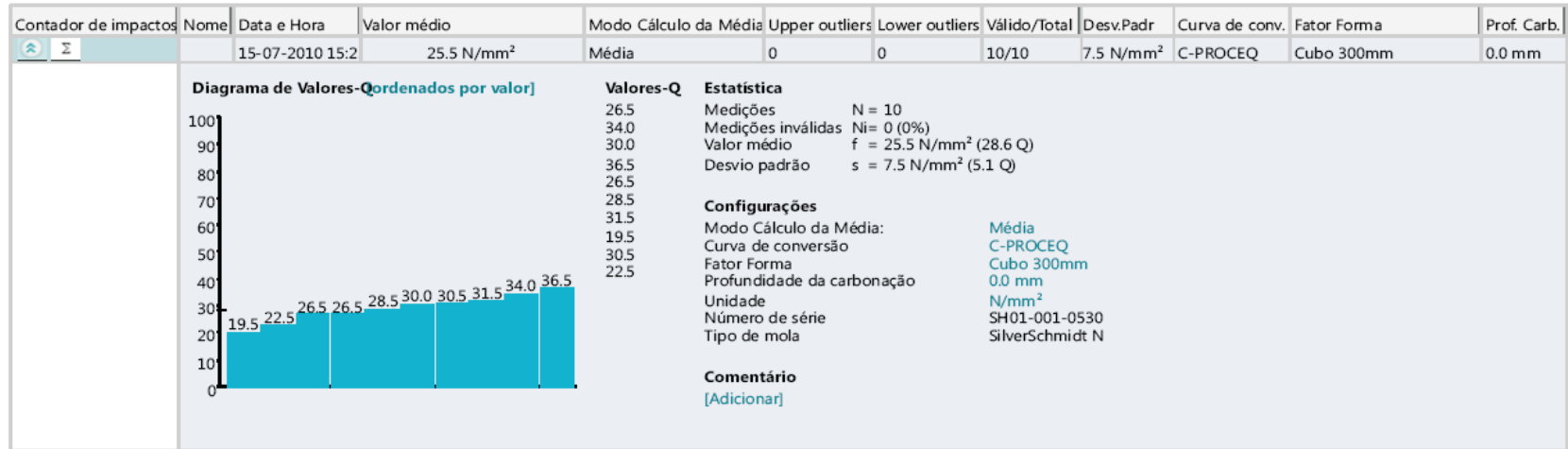


PK 0+794,85

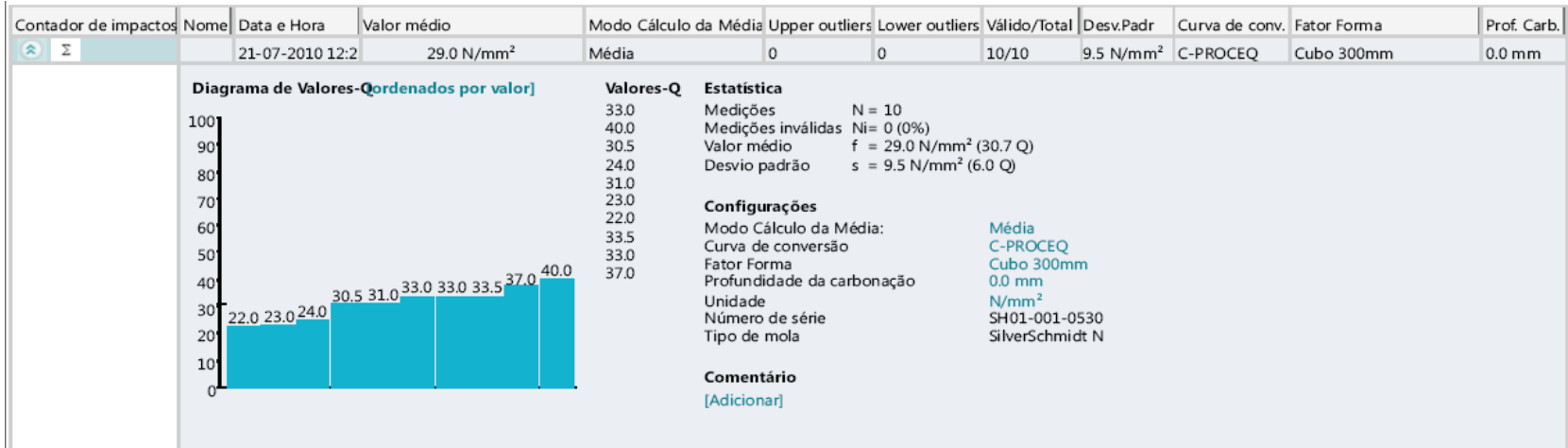


NASCENTE NORTE

PK 0+562,4

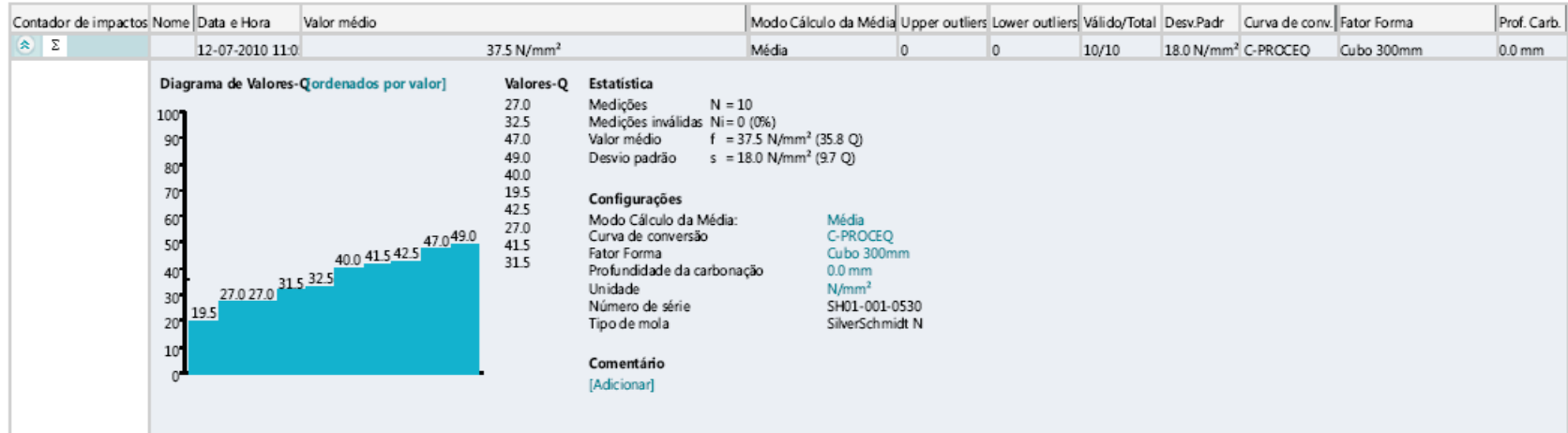


PK 0+564,7

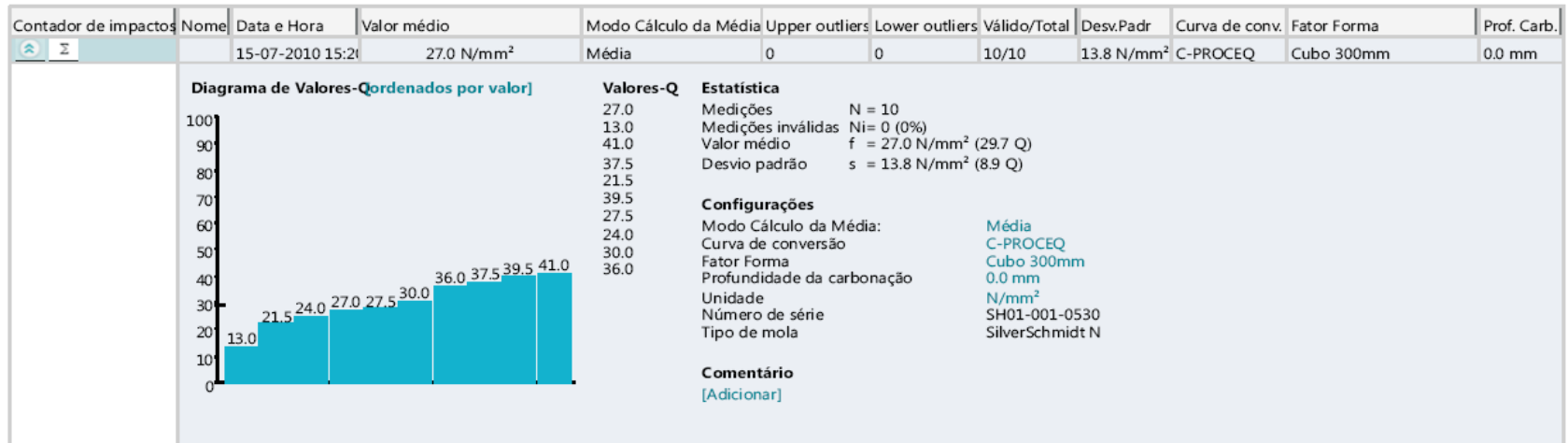


## NASCENTE NORTE

PK 0+575,65

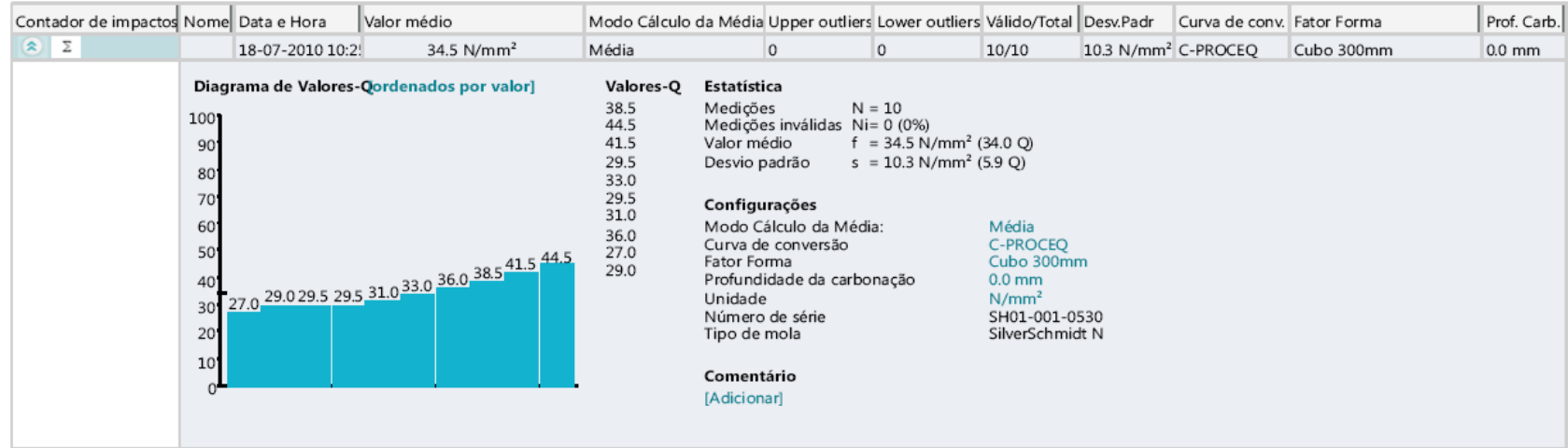


PK 0+579,6

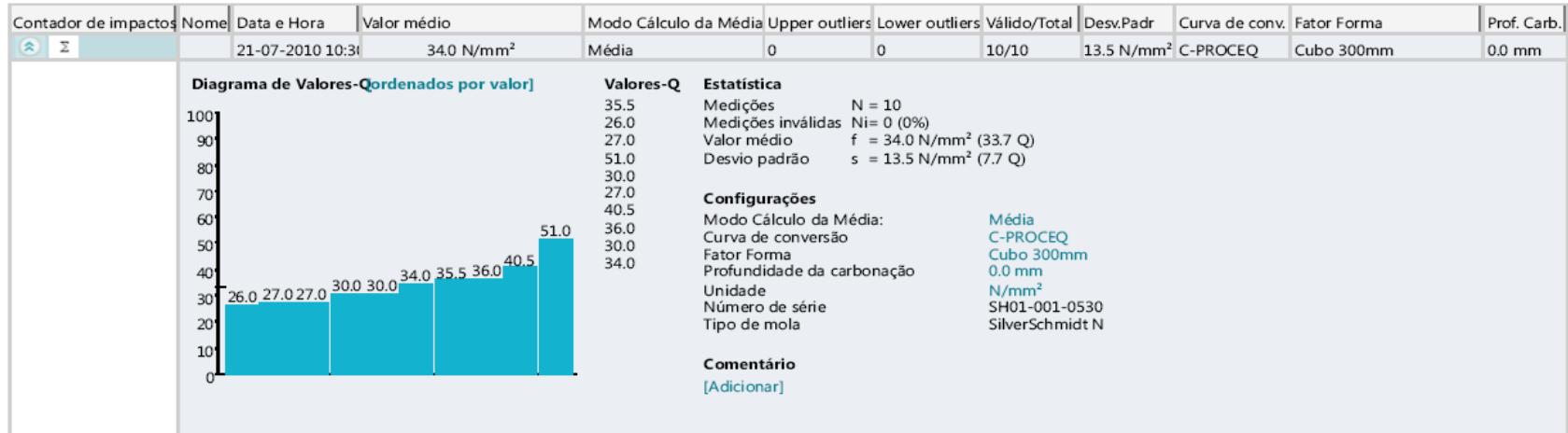


NASCENTE NORTE

PK 0+582,9



PK 0+584,4

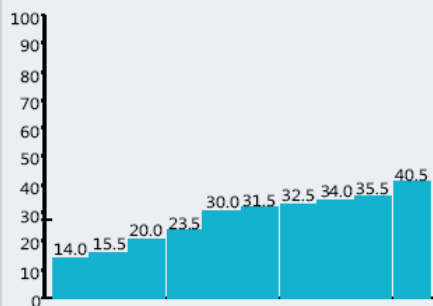


POENTE SUL

PK 0+816,9

Contador de impactos	Nome	Data e Hora	Valor médio	Modo Cálculo da Média	Upper outliers	Lower outliers	Válido/Total	Desv.Padr	Curva de conv.	Fator Forma	Prof. Carb.
Σ		29-07-2010 10:5	24.5 N/mm <sup>2</sup>	Média	0	0	10/10	12.8 N/mm <sup>2</sup>	C-PROCEQ	Cubo 300mm	0.0 mm

Diagrama de Valores-Q [Ordenados por valor]



Valores-Q

- 32.5
- 20.0
- 40.5
- 34.0
- 30.0
- 14.0
- 23.5
- 31.5
- 35.5
- 15.5

Estatística

Medições N = 10  
 Medições inválidas Ni = 0 (0%)  
 Valor médio f = 24.5 N/mm<sup>2</sup> (27.7 Q)  
 Desvio padrão s = 12.8 N/mm<sup>2</sup> (8.9 Q)

Configurações

Modo Cálculo da Média: Média  
 Curva de conversão C-PROCEQ  
 Fator Forma Cubo 300mm  
 Profundidade da carbonação 0.0 mm  
 Unidade N/mm<sup>2</sup>  
 Número de série SH01-001-0530  
 Tipo de mola SilverSchmidt N

Comentário

[Adicionar]

Resultados ensaio PLT.

Nascente norte													
Amostra n°	Distância (m)	Orientação do ensaio	Dimensões			A (mm <sup>2</sup> )	De (mm)	De <sup>2</sup> (mm <sup>2</sup> )	P ( kN )	Is ( MPa)	F	IS(50) (MPa)	Média Is(50) ↓ (MPa)
			comp (mm)	largura (mm)	altura (mm)								
1	PK 586	↓	119	44	37,4	1645,60	45,79	2096,31	2,32	1,11	0,96	1,06	1,34
2		↓	101	45,6	38,1	1737,36	47,04	2213,20	5,47	2,47	0,97	2,40	
3		↓	109,3	42,7	48,6	2075,22	51,42	2643,59	4,94	1,87	1,01	1,89	
4		↓	172,6	62	51	3162,00	63,47	4028,03	3,10	0,77	1,11	0,86	
5	PK 586,2	↓	181,6	46,6	66	3075,60	62,59	3917,96	3,84	0,98	1,11	1,08	
6		↓	132	56,7	41	2324,70	54,42	2961,40	2,82	0,95	1,04	0,99	
7		↓	124,4	44,6	57	2542,20	56,91	3238,47	4,74	1,46	1,06	1,55	
8		↓	161,6	42,7	51	2177,70	52,67	2774,14	3,23	1,16	1,02	1,19	
9		↓	133	54	41	2214,00	53,11	2820,38	2,62	0,93	1,03	0,95	
10	PK 587	↓	149	42	33	1386,00	42,02	1765,61	2,01	1,14	0,92	1,05	
11		↓	151,6	53	39	2067,00	51,31	2633,12	2,51	0,95	1,01	0,96	
12		↓	182	40,5	42	1701,00	46,55	2166,88	4,84	2,23	0,97	2,16	
13		↓	143	54	63,8	3445,20	66,25	4388,79	-	-	1,13	-	
14	PK 587,75	↓	175,6	69	35	2415,00	55,47	3076,43	5,57	1,81	1,05	1,90	
15		↓	162,8	56,4	54	3045,60	62,29	3879,75	3,43	0,88	1,10	0,98	
16		↓	177	47,5	46,4	2204,00	52,99	2807,64	4,61	1,64	1,03	1,69	

Poente Norte													
Amostra nº	Distância (m)	Orientação do ensaio	Dimensões			A (mm <sup>2</sup> )	De (mm)	De <sup>2</sup> (mm <sup>2</sup> )	P (kN)	Is (MPa)	F	IS(50) (MPa)	Média Is(50) ↓ (MPa)
			comp (mm)	largura (mm)	altura (mm)								
1	PK 793	↓	169	50,8	57,4	2915,92	60,95	3714,55	5,15	1,39	1,09	1,52	1,55
2		↓	152	50	57,2	2860,00	60,36	3643,31	2,52	0,69	1,09	0,75	
4		↓	141,8	52,7	53	2793,10	59,65	3558,09	4,95	1,39	1,08	1,51	
5		↓	158	53	46	2438,00	55,73	3105,73	5,51	1,77	1,05	1,86	
6		↓	168,6	53,5	54,2	2899,70	60,78	3693,89	2,83	0,77	1,09	0,84	
7		↓	148	48,5	47	2279,50	53,89	2903,82	-	-	1,03	-	
8		PK 794	↓	97	49,3	52	2563,60	57,15	3265,73	5,68	1,74	1,06	
9	↓		94,6	50	50,4	2520,00	56,66	3210,19	4,80	1,50	1,06	1,58	
10	↓		86,7	34,2	34,7	1186,74	38,88	1511,77	2,10	1,39	0,89	1,24	
11	↓		86,1	36,6	51,6	1888,56	49,05	2405,81	-	-	0,99	-	
12	↓		91,7	51	45,7	2330,70	54,49	2969,04	5,68	1,91	1,04	1,99	
13	PK 796	↓	142	69	36	2484,00	56,25	3164,33	5,15	1,63	1,05	1,72	
14		↓	189	53	60	3180,00	63,65	4050,96	5,11	1,26	1,11	1,41	
15		↓	183	59	56,4	3327,60	65,11	4238,98	5,10	1,20	1,13	1,35	
16	PK 791,8	↓	181	62	50	3100,00	62,84	3949,04	4,90	1,24	1,11	1,38	
17		↓	171	57,6	34	1958,40	49,95	2494,78	4,95	1,98	1,00	1,98	
18		↓	139	60,7	38	2306,60	54,21	2938,34	5,60	1,91	1,04	1,98	

Poente Sul													
Amostra n°	Distância (m)	Orientação do ensaio	Dimensões			A (mm <sup>2</sup> )	De (mm)	De <sup>2</sup> (mm <sup>2</sup> )	P (kN)	Is (MPa)	F	IS(50) (MPa)	Média Is(50) † (MPa)
			comp (mm)	largura (mm)	altura (mm)								
1	PK 822,5		88,6	46,9	39,2	1838,48	48,39	2342,01	2,54	1,08	0,99	1,07	1,15
2			120,12	49,6	42	2083,20	51,51	2653,76	2,01	0,76	1,01	0,77	
3			139,5	46,7	50	2335,00	54,54	2974,52	3,12	1,05	1,04	1,09	
4			122	52,3	50	2615,00	57,72	3331,21	4,44	1,33	1,07	1,42	
5			110	41,8	48	2006,40	50,56	2555,92	-	-	1,00	-	
6			107	57,4	21,4	1228,36	39,56	1564,79	1,60	1,02	0,90	0,92	
7	PK 823,25		126	41,7	43	1793,10	47,79	2284,20	3,63	1,59	0,98	1,56	
8			107,8	52,5	40,5	2126,25	52,04	2708,60	4,54	1,68	1,02	1,71	
9			134,3	41,8	45	1881,00	48,95	2396,18	2,72	1,14	0,99	1,12	
10			116,6	51	46,2	2356,20	54,79	3001,53	2,52	0,84	1,04	0,87	

**Anexos 3**  
**Classificações geomecânicas**



## Classificações Geomecânicas

### Zona Geotécnica 3

#### Classificação “Rock Mass Rating” – RMR

Dados:

- Resistência (Martelo Schmith) = <10
- Espaçamento médio = 71,4cm ≈ 0,7m
- Percentagem de RQD Teórico ≈ 25% - Muito Fraca ou muito má

**Parâmetro A** (Table 4: Rock Mass Rating System (Adaptado de Bieniawski 1989))

**Parâmetro 1** → Resistência = tiros falhados – abaixo de 25 MPa → 5 a 25 MPa → 2

Parâmetros		Coeficientes							
1	Resistência da rocha intacta	Point Load	> 10 MPa	4-10 MPa	2-4 MPa	1-2 MPa	Ver compressão uniaxial		
		Compressão uniaxial	> 250 MPa	100-250 MPa	50-100 MPa	25-50 MPa	5-25 MPa	1-5 MPa	< 1 MPa
	Pesos	15	12	7	4	2	1	0	

**Parâmetro 2** → RQD = <25% → 3

2	R.Q.D.	90-100 %	75-90 %	50-75 %	25-50 %	< 25 %
	Pesos	20	17	13	8	3

**Parâmetro 3** → espaçamento descontinuidades = <0,6 a 2m → 8

3	Espaçamento das descontinuidades	> 2 m	0,6-2 m	200-600 mm	60-200 mm	< 60 mm
	Pesos	20	15	10	8	5

**Parâmetro 4** → Rugosidade = 1-2 → 20

4	Condição das descontinuidades (ver Tabela 3)	Superfícies muito rugosas, não contínuas, sem separação, paredes de rocha não alteradas	Superfícies ligeiramente rugosas, separação < 1 mm, paredes ligeiramente alteradas	Superfícies ligeiramente rugosas, separação < 1 mm, paredes muito alteradas	Superfícies polidas ou enchimento com espessura < 5 mm ou juntas contínuas com separação 1-5 mm	Enchimento mole com espessura > 5 mm ou juntas contínuas com separação > 5 mm
	Pesos	30	25	20	10	0

Parâmetro E → 4+4+3+2+1= 14

Comprimento da descontinuidade (persistência)	< 1 m	1 - 3 m	3 - 10 m	10 - 20 m	> 20 m
Peso	6	4	2	1	0
Separação (abertura)	Nenhuma	< 0,1 mm	0,1 - 1,0 mm	1 - 5 mm	> 5 mm
Peso	6	5	4	1	0
Rugosidade	Muito rugoso	Rugoso	Ligeiramente rugoso	Quase liso	Liso
Peso	6	5	3	1	0
Enchimento	Nenhum	Duro com espessura < 5 mm	Duro com espessura > 5 mm	Mole com espessura < 5 mm	Mole com espessura > 5 mm
Peso	6	4	2	2	0
Grau de alteração	Não alteradas	Ligeiramente alteradas	Moderadamente alteradas	Muito alteradas	Em decomposição
Peso	6	5	3	1	0

Parâmetro 5 → (ligeiramente húmido) → 10

5	Presença de água	Caudal por 10 m de comprimento do túnel	nenhum	< 10 l/min	10-25 l/min	25-125 l/min	> 125 l/min
		Relação pressão da água vs tensão principal máxima	0	< 0,1	0,1-0,2	0,2-0,5	> 0,5
		Condições gerais	Completamente seco	Água intersticial	Húmido	Escorrimentos	Entrada de água
Pesos		15	10	7	4	0	

Através do somatório destes parâmetros obtemos o valor do parâmetro A:

$$\Sigma A = 2 + 3 + 8 + 20 + 10 = 33$$

Parâmetro B → Razoável = - 5

F → perpendicular (⊥) às descontinuidades, contra o pendor, entre 45°-90° → razoável

Direcção perpendicular ao eixo do túnel				Direcção paralela ao eixo do túnel		Inclinação 0-20°
Abertura do túnel no sentido da inclinação		Abertura do túnel no sentido inverso da inclinação		Inclinação 45-90°	Inclinação 20-45°	
Inclinação 45-90°	Inclinação 20-45°	Inclinação 45-90°	Inclinação 20-45°			
Muito favorável	Favorável	Razoável	Desfavorável	Muito desfavorável	Razoável	Razoável

Orientação das descontinuidades		Muito favorável	Favorável	Razoável	Desfavorável	Muito desfavorável
Pesos	Túneis e minas	0	-2	-5	-10	-12
	Fundações	0	-2	-7	-15	-25
	Taludes	0	-5	-25	-50	-60

$$C = A - B = 33 - 5 = 28$$

28 (21 a 40) → a classe obtida foi classe IV (pela tabela).

**Classe IV (Pobre)**

C: Classificação de rochas					
Pontuação	81 - 100	51 - 80	41 - 60	21 - 40	<21
Número de classe	I	II	III	IV	V
Descrição	excelente	Bom	Razoável	Pobre	Muito Pobre

D - Classes e características dos maciços rochosos com base no somatório dos pesos					
Somatório dos pesos	81 -100	61 - 80	60- 41	21-40	<21
Classe	I	II	III	IV	V
Descrição do maciço	Muito bom	Bom	Razoável	Fraco	Muito Fraco
Coesão do maciço (Kpa)	> 400	300 - 400	200 - 300	100 - 200	<100
Ângulo de atrito do maciço	>45°	35° - 45°	25° - 35 °	15° - 25°	<15°
Vão não revestido e tempo de auto sustentação	15 m 20 anos	10 m 1 ano	5 m 1 semana	2,5 m 10 horas	1m 30 minutos

- Classe IV
- Tempo médio do sem sustentação = 10 horas para um vão de 2,5m
- Coesão do maciço 100-200 KPa
- Ângulo de atrito do maciço 15°-25°

## Classificação (Q) de Barton

Designação de qualidade da rocha	RQD (%)
A - Rocha de muito má qualidade	0 - 25
B - Rocha de má qualidade	25-50
C - Rocha de qualidade razoável	50-75
D - Rocha de boa qualidade	75-90
E - Rocha de excelente qualidade	90-100

FACTOR DE N° DE DESCONTINUIDADE	J <sub>n</sub>	
A. Rocha maciça ou com apenas algumas fracturas dispersas .....	0,5 - 1,0	
B. Uma família de descontinuidades .....	2	
C. Uma família de descontinuidades mais algumas fracturas dispersas .....	3	
D. Duas famílias de descontinuidades .....	4	
E. Duas famílias de descontinuidades mais algumas fracturas dispersas .....	6	
F. Três famílias de descontinuidades .....	9	
G. Três famílias de descontinuidades mais algumas fracturas dispersas .....	12	
H. Quatro ou mais famílias de descontinuidades dispersas, muito próximas, .....	15	
I. Rocha decomposta, com comportamento de solo .....	20	
OBS. (1) No caso de intersecções de fracturas usar 3xJ <sub>n</sub> ; (2) No caso dos emboquilhamentos usar 2xJ <sub>n</sub>		
FACTOR DE RUGOSIDADE DAS DESCONTINUIDADES	J <sub>r</sub>	
(a) Contacto entre as paredes da descontinuidade e (b) Contacto entre as paredes da descontinuidade com deslocamento relativo < 10 cm		
A. Juntas descontinuas .....	4	
B. Rugosas ou irregulares, ondulantes .....	3	
C. Pouco rugosas, ondulantes .....	2	
D. Polidas, ondulantes .....	1,5	
E. Rugosas ou irregulares, planas .....	1,5	
F. Pouco rugosas, planas .....	1,0	
G. Polidas, planas .....	0,5	
(c) Falta de contacto entre as paredes da descontinuidade, após deslocamento relativo		
H. Zona com minerais argilosos suficientemente espessa para impedir contacto entre as paredes da descontinuidade .....	1,0	
I. Zona com areia, cascalho ou material fragmentado, suficientemente espessa para impedir o contacto entre as paredes das descontinuidades .....	1,0	
OBS. (1) As descrições referem-se a características de pequena escala e escala intermédia, por essa ordem; (A a G); (2) Acrescentar 1,0 se o espaçamento médio da família da descontinuidade em causa for superior a 3 m; (3) J <sub>r</sub> = 0,5 pode utilizar-se para descontinuidades planas e polidas, com lineações, desde que estas estejam orientadas para resistência mínima.		
FACTOR DE ALTERAÇÃO DA DESCONTINUIDADE	J <sub>a</sub>	φ <sub>r</sub>
(a) Contacto entre as paredes das descontinuidades		
A. Paredes duras, compactas, preenchimentos impermeáveis (quartzo ou epidoto) ...	0,75	(-)
B. Paredes sem alteração, somente ligeira coloração .....	1	25-35°
C. Paredes ligeiramente alteradas, com partículas arenosas e de rochas desintegradas sem argila .....	2	25-30°
D. Paredes com películas siltosas ou areno-argilosas e pequena quantidade de argila	3	20-25°
E. Paredes com películas de materiais moles ou de pequeno ângulo de atrito (caolite ou mica). Também clorite, talco, gesso, grafite, e pequenas quantidades de argilas expansivas .....	4	8-16°
(b) Contacto entre as paredes das descontinuidades com deslocamento relativo < 10 cm		
F. Paredes com partículas de areia, rocha desintegrada sem argila .....	4	25-30°
G. Fracturas com preenchimento argiloso muito sobreconsolidado (contínuo, espessura < 5mm) .....	6	16-24°
H. Fracturas com preenchimento argiloso com média a baixa sobreconsolidação (contínuo, espessura < 5 mm) .....	8	12-16°

A. Fracturas com preenchimento argiloso expansivo, por exemplo, montmorilonite (contínuo, espessura <5mm). O valor de J <sub>w</sub> depende da percentagem de argila expansiva, do acesso à água, etc..... (c) Não há contacto entre as paredes das descontinuidades, com deslocamento relativo	8-12	6-12*
K,L,M. Zonas ou faixas com rocha desintegrada ou fracturada e argila (ver G, H, J para condições do material argiloso) .....	6, 8 ou 8-12	6-24*
N. Zonas ou faixas silteosas ou areno-argilosas com pequenas quantidades de argila	5	(-)
O, P, R. Zonas ou faixas espessas e contínuas de argila (ver G, H, J para condições do material argiloso) .....	10, 13 ou 13-20	6-24*
<b>FACTOR DE REDUÇÃO HIDRÁULICA</b>	<b>J<sub>w</sub></b>	<b>P<sub>c</sub> (MPa)</b>
A. Escavações a seco, ou mínimas afluências de água, isto é. < 5 l/min, localmente	1	<0,1
B. Afluências ou pressões médias, lavagem dos preenchimentos, ocasionalmente ..	0,66	0,1-0,25
C. Afluências elevadas ou pressões elevadas em rocha competente com fracturas sem preenchimentos .....	0,5	0,25-1
D. Afluências elevadas ou pressões elevadas com lavagens consideráveis dos preenchimentos: .....	0,33	0,25-1
E. Afluências excepcionalmente elevadas ou pressões de água "explosivas", decaindo com o tempo .....	0,2-0,1	>1
F. Afluências excepcionalmente elevadas ou pressões de água "explosivas", contínuas sem diminuição com o tempo .....	0,1-0,05	>1
OBS. (1) Os valores de C a F são estimativas grosseiras. Se forem instaladas medidas de drenagem, aumentar J <sub>w</sub> ; (2) Não foram considerados problemas específicos causados pela formação de gelo.		
<b>FACTOR SFR (Stress Reduction Factor)</b>	<b>SFR</b>	
<i>(a) Zonas fracas intersectadas pela escavação que poderão causar perda de maciço rochoso quando o túnel for escavado</i>		
A. Ocorrência de múltiplas zonas fracas, contendo argila ou rocha decomposta (quimicamente); rocha envolvente muito solta (qualquer profundidade) .....	10	
B. Zona fraca única contendo argila ou rocha decomposta quimicamente (profundidade de escavação ≤50m) .....	5	
C. Zona fraca única contendo argila ou rocha decomposta quimicamente (profundidade de escavação >50m) .....	2,5	
D. Zonas de corte múltiplo em rocha competente (sem argila), rocha envolvente solta (qualquer profundidade) .....	7,5	
E. Zona de corte única em rocha competente e sem argila (profundidade de escavação ≤ 50 m) .....	5	
F. Zona de corte única em rocha competente e sem argila (profundidade de escavação > 50 m) .....	2,5	
G. Fracturas abertas, muito próximas, tipo "cubo de açúcar" (qualquer profundidade) .....	5	
<i>(b) Rocha competente, problemas de tensão</i>		
H. Baixa tensão; próximo da superfície ( $\sigma_2/\sigma_1 > 200$ e $\sigma_3/\sigma_1 > 13$ ) .....	2,5	
I. Tensão média ( $10 < \sigma_2/\sigma_1 < 200$ ; $0,66 < \sigma_3/\sigma_1 < 13$ ) .....	1	
J. Tensão elevada, estrutura muito compacta, usualmente favorável à estabilidade, poderá ser desfavorável à estabilidade das paredes ( $5 < \sigma_2/\sigma_1 < 10$ ; $0,33 < \sigma_3/\sigma_1 < 0,33$ ) .....	0,5-2	
K. "Golpe de terreno" suave ( $2,5 < \sigma_2/\sigma_1 < 5$ ; $0,16 < \sigma_3/\sigma_1 < 0,33$ ) .....	5-10	
L. "Golpe de terreno" ( $\sigma_2/\sigma_1 < 2,5$ e $\sigma_3/\sigma_1 < 0,16$ ) .....	10-20	
<i>(c) Rocha compressível; fluência plástica de rocha branda sob influencia de elevada pressão rochosa</i>		
M. Pressão rochosa média de compressibilidade .....	5-10	
N. Pressão rochosa elevada de compressibilidade .....	10-20	
<i>(d) Rocha expansiva, dependente da presença de água</i>		
O. Pressão rochosa média de expansibilidade .....	5-10	
P. Pressão rochosa elevada de expansibilidade .....	10-15	

Através de equação 11 temos:







$$Q = \frac{13,5}{9} \times \frac{2}{8} \times \frac{0,66}{9} = 0,03$$

# Classificação “Geological Strength Index” – GSI

Método Analítico (para RMR = 38):

$$GSI = RMR - 5 \leftrightarrow 38 - 5 = 33$$

Método empírico

<b>GEOLOGICAL STRENGTH INDEX - GSI</b> <b>Índice Geológico de Resistência - meios decaedros</b> <b>(Hoek e Marinos, 2000)</b> A partir da litologia, da estrutura do maciço e das características das superfícies das descontinuidades, estimar o valor médio de GSI. Não se deve ser demasiado preciso (é mais realista referir um intervalo de GSI = 33-37, que afirmar que GSI = 35). É de referir que a tabela não tem validade para roturas determinadas pela estrutura do maciço. Quando ocorrem descontinuidades desfavoravelmente orientadas, estas determinam o comportamento da escavação. No caso de descontinuidades com preenchimento que se possam deteriorar com a presença de água, resultando na diminuição da resistência ao corte, sugere-se o uso de valores mais à direita. A acção da pressão da água é anuitada em função de tensões efectivas.		<b>CARACTERÍSTICAS DAS SUPERFÍCIES DAS DESCONTINUIDADES</b>					
<b>GEOESTRUTURA</b>		<b>QUALIDADE DECRESCENTE DAS SUPERFÍCIES</b>					
 INTACTA OU MACIÇA - rocha intacta ou maciça com descontinuidades em pequena quantidade e muito afastadas.	90 80			N/A	N/A		
 COMPARTIMENTADO ("blocky") - maciço não perturbado, constituído por blocos cúbicos, bem travados entre si, definidos por 3 famílias de descontinuidades.		70					
 MUITO COMPARTIMENTADO ("very blocky") - maciço parcialmente perturbado, com blocos angulares multi-facetados, travados entre si, definidos por 4 ou mais famílias de descontinuidades.			50				
 COMPARTIMENTADO/TECTONIZADO ("blocky/disturbed") - dobrado e/ou com presença de falhas, com blocos angulares definidos por várias famílias de descontinuidades. Persistência de xistocidade ou planos de fraqueza.				40			
 DESINTEGRADO - maciço pouco interligado, fortemente partido, com mistura de fragmentos angulares e arredondados.					30		
 FOLIADO/LAMINADO - maciço foliado, dobrado e tectonizado. A estrutura do maciço é controlada pela presença de planos de xistocidade ou de corte pouco espaçados.						20	
							10
							5
							N/A
							N/A

Pelo método empírico temos valores entre os 15 e os 25.

### Zona Geotécnica 3

#### Classificação "Rock Mass Rating" – RMR

Dados:

- Resistência (Martelo Schmdit) = 23 a 37,5
- Espaçamento médio = F 4-5
- Percentagem de RQD Teórico 25% a 50%

**Parâmetro A** (Table 4: Rock Mass Rating System (Adaptado de Bieniawski 1989))

Parâmetros			Coeficientes						
1	Resistência da rocha intacta	Point Load	> 10 MPa	4-10 MPa	2-4 MPa	1-2 MPa	Ver compressão uniaxial		
		Compressão uniaxial	> 250 MPa	100-250 MPa	50-100 MPa	25-50 MPa	5-25 MPa	1-5 MPa	< 1 MPa
	Pesos		15	12	7	4	2	1	0

**Parâmetro 2** → RQD=50% a 25% → Rating 8

2	R. Q. D.	90-100 %	75-90 %	50-75 %	25-50 %	< 25 %
	Pesos	20	17	13	8	3

**Parâmetro 3** → espaçamento descontinuidades = 600 a 200 mm → Rating 10

3	Espaçamento das descontinuidades	> 2 m	0,6-2 m	200-600 mm	60-200 mm	< 60 mm
	Pesos	20	15	10	8	5

**Parâmetro 4** → Rating 20

4	Condição das descontinuidades (ver Tabela 3)	Superfícies muito rugosas, não contínuas, sem separação, paredes de rocha não ateradas	Superfícies ligeiramente rugosas, separação < 1 mm, paredes ligeiramente ateradas	Superfícies ligeiramente rugosas, separação < 1 mm, paredes muito ateradas	Superfícies polidas ou enchimento com espessura < 5 mm ou juntas contínuas com separação 1-5 mm	Enchimento mole com espessura > 5 mm ou juntas contínuas com separação > 5 mm
	Pesos	30	25	20	10	0

Parâmetro E → 4+4+3+2+3= 18

Comprimento da descontinuidade (persistência)	< 1 m	1 - 3 m	3 - 10 m	10 - 20 m	> 20 m
Peso	6	4	2	1	0
Separação (abertura)	Nenhuma	< 0,1 mm	0,1 - 1,0 mm	1 - 5 mm	> 5 mm
Peso	6	5	4	1	0
Rugosidade	Muito rugoso	Rugoso	Ligeiramente rugoso	Quase liso	Liso
Peso	6	5	3	1	0
Enchimento	Nenhum	Duro com espessura < 5 mm	Duro com espessura > 5 mm	Mole com espessura < 5 mm	Mole com espessura > 5 mm
Peso	6	4	2	2	0
Grau de alteração	Não alteradas	Ligeiramente alteradas	Moderadamente alteradas	Muito alteradas	Em decomposição
Peso	6	5	3	1	0

Parâmetro 5 → rating 10

5	Presença de água	Caudal por 10 m de comprimento do túnel	nenhum	< 10 l/min	10-25 l/min	25-125 l/min	> 125 l/min
		Relação pressão da água vs tensão principal máxima	0	< 0,1	0,1-0,2	0,2-0,5	> 0,5
		Condições gerais	Completamente seco	Água intersticial	Húmido	Escorimentos	Entrada de água
	Pesos		15	10	7	4	0

Através do somatório destes parâmetros obtemos o valor do parâmetro A:

$$\Sigma=4+8+10+20+10= 52$$

Parâmetro B = -5

Direcção perpendicular ao eixo do túnel				Direcção paralela ao eixo do túnel		Inclinação 0-20°
Abertura do túnel no sentido da inclinação		Abertura do túnel no sentido inverso da inclinação		Inclinação 45-90°	Inclinação 20-45°	
Inclinação 45-90°	Inclinação 20-45°	Inclinação 45-90°	Inclinação 20-45°	Muito desfavorável	Razoável	
Muito favorável	Favorável	Razoável	Desfavorável	Muito desfavorável	Razoável	Razoável

Orientação das descontinuidades		Muito favorável	Favorável	Razoável	Desfavorável	Muito desfavorável
Pesos	Túneis e minas	0	-2	-5	-10	-12
	Fundações	0	-2	-7	-15	-25
	Taludes	0	-5	-25	-50	-60

$$C = A - B = 52 - 5 = 47$$

Parâmetro C - 47 (41 a 60)

44 (41 a 60) → a classe obtida foi classe III (pela tabela).

Classe IV (Pobre)

C: Classificação de rochas					
Pontuação	81 - 100	51 - 80	41 - 60	21 - 40	<21
Número de classe	I	II	III	IV	V
Descrição	excelente	Bom	Razoável	Pobre	Muito Pobre

**Parâmetro D - 44 (41 a 60)**

D - Classes e características dos maciços rochosos com base no somatório dos pesos					
Somatório dos pesos	81 -100	61 - 80	60- 41	21-40	<21
Classe	I	II	III	IV	V
Descrição do maciço	Muito bom	Bom	Razoável	Fraco	Muito Fraco
Coesão do maciço (Kpa)	> 400	300 - 400	200 - 300	100 - 200	<100
Ângulo de atrito do maciço	>45º	35º - 45º	25º - 35 º	15º - 25º	<15º
Vão não revestido e tempo de auto sustentação	15 m 20 anos	10 m 1 ano	5 m 1 semana	2,5 m 10 horas	1m 30 minutos

- Classe III
- Tempo médio do sem sustentação = 1 semana para um vão de 5m
- Coesão do maciço 200-300 KPa
- Ângulo de atrito do maciço 25º-35º

Classificação “Rock Tunneling Quality Index” – Q

Designação de qualidade da rocha	RQD (%)
A - Rocha de muito má qualidade	0 - 25
B - Rocha de má qualidade	25-50
C - Rocha de qualidade razoável	50-75
D - Rocha de boa qualidade	75-90
E - Rocha de excelente qualidade	90-100

FACTOR DE N° DE DESCONTINUIDADE		Jn	
A. Rocha maciça ou com apenas algumas fracturas dispersas .....		0,5 - 1,0	
B. Uma família de descontinuidades .....		2	
C. Uma família de descontinuidades mais algumas fracturas dispersas .....		3	
D. Duas famílias de descontinuidades .....		4	
E. Duas famílias de descontinuidades mais algumas fracturas dispersas .....		6	
F. Três famílias de descontinuidades .....		9	
G. Três famílias de descontinuidades mais algumas fracturas dispersas .....		12	
H. Quatro ou mais famílias de descontinuidades dispersas, muito próximas, .....		15	
I. Rocha decomposta, com comportamento de solo .....		20	
OBS. (1) No caso de intersecções de fracturas usar 3xJn; (2) No caso dos emboquilhamentos usar 2xJn			
FACTOR DE RUGOSIDADE DAS DESCONTINUIDADES		Jr	
(a) Contacto entre as paredes da descontinuidade e (b) Contacto entre as paredes da descontinuidade com deslocamento relativo < 10 cm			
A. Juntas descontinuas .....		4	
B. Rugosas ou irregulares, ondulantes .....		3	
C. Pouco rugosas, ondulantes .....		2	
D. Polidas, ondulantes .....		1,5	
E. Rugosas ou irregulares, planas .....		1,5	
F. Pouco rugosas, planas .....		1,0	
G. Polidas, planas .....		0,5	
(c) Falta de contacto entre as paredes da descontinuidade, após deslocamento relativo			
H. Zona com minerais argilosos suficientemente espessa para impedir contacto entre as paredes da descontinuidade .....		1,0	
I. Zona com areia, cascalho ou material fragmentado, suficientemente espessa para impedir o contacto entre as paredes das descontinuidades .....		1,0	
OBS. (1) As descrições referem-se a características de pequena escala e escala intermédia, por essa ordem; (A a G); (2) Acrescentar 1,0 se o espaçamento médio da família da descontinuidade em causa for superior a 3 m; (3) Jr = 0,5 pode utilizar-se para descontinuidades planas e polidas, com lineações, desde que estas estejam orientadas para resistência mínima.			
FACTOR DE ALTERAÇÃO DA DESCONTINUIDADE		Ja	φr
(a) Contacto entre as paredes das descontinuidades			
A. Paredes duras, compactas, preenchimentos impermeáveis (quartzo ou epidoto) ...	0,75		(-)
B. Paredes sem alteração, somente ligeira coloração .....	1		25-35°
C. Paredes ligeiramente alteradas, com partículas arenosas e de rochas desintegradas sem argila .....	2		25-30°
D. Paredes com películas siltosas ou areno-argilosas e pequena quantidade de argila	3		20-25°
E. Paredes com películas de materiais moles ou de pequeno ângulo de atrito (caolite ou mica). Também clorite, talco, gesso, grafite, e pequenas quantidades de argilas expansivas .....	4		8-16°
(b) Contacto entre as paredes das descontinuidades com deslocamento relativo < 10 cm			
F. Paredes com partículas de areia, rocha desintegrada sem argila .....	4		25-30°
G. Fracturas com preenchimento argiloso muito sobreconsolidado (contínuo, espessura < 5mm) .....	6		16-24°
H. Fracturas com preenchimento argiloso com média a baixa sobreconsolidação (contínuo, espessura < 5 mm) .....	8		12-16°

A. Fracturas com preenchimento argiloso expansivo, por exemplo, montmorilonite (contínuo, espessura <5mm). O valor de $J_w$ depende da percentagem de argila expansiva, do acesso à água, etc..... (c) Não há contacto entre as paredes das descontinuidades, com deslocamento relativo	8-12	6-12*
K,L,M. Zonas ou faixas com rocha desintegrada ou fracturada e argila (ver G, H, J para condições do material argiloso) .....	6, 8 ou 8-12	6-24*
N. Zonas ou faixas siltosas ou areno-argilosas com pequenas quantidades de argila	5	(-)
O, P, R. Zonas ou faixas espessas e contínuas de argila (ver G, H, J para condições do material argiloso) .....	10, 13 ou 13-20	6-24*
<b>FACTOR DE REDUÇÃO HIDRÁULICA</b>	$J_w$	$P_w$ (MPa)
A. Escavações a seco, ou mínimas aflúncias de água, isto é, < 5 l/min, localmente	1	<0,1
<b>B. Aflúncias ou pressões médias, lavagem dos preenchimentos, ocasionalmente ..</b>	<b>0,66</b>	<b>0,1-0,25</b>
C. Aflúncias elevadas ou pressões elevadas em rocha competente com fracturas sem preenchimentos .....	0,5	0,25-1
D. Aflúncias elevadas ou pressões elevadas com lavagens consideráveis dos preenchimentos .....	0,33	0,25-1
E. Aflúncias excepcionalmente elevadas ou pressões de água "explosivas", decaindo com o tempo .....	0,2-0,1	>1
F. Aflúncias excepcionalmente elevadas ou pressões de água "explosivas", contínuas sem diminuição com o tempo .....	0,1-0,05	>1
OBS. (1) Os valores de C a F são estimativas grosseiras. Se forem instaladas medidas de drenagem, aumentar $J_w$ ; (2) Não foram considerados problemas específicos causados pela formação de gelo.		
<b>FACTOR SFR (Stress Reduction Factor)</b>	<b>SFR</b>	
<i>(a) Zonas fracas intersectadas pela escavação que poderão causar perda de maciço rochoso quando o túnel for escavado</i>		
A. Ocorrência de múltiplas zonas fracas, contendo argila ou rocha decomposta (quimicamente); rocha envolvente muito solta (qualquer profundidade) .....	10	
B. Zona fraca única contendo argila ou rocha decomposta quimicamente (profundidade de escavação ≤50m) .....	5	
C. Zona fraca única contendo argila ou rocha decomposta quimicamente (profundidade de escavação >50m) .....	2,5	
D. Zonas de corte múltiplo em rocha competente (sem argila), rocha envolvente solta (qualquer profundidade) .....	7,5	
E. Zona de corte única em rocha competente e sem argila (profundidade de escavação ≤ 50 m) .....	5	
F. Zona de corte única em rocha competente e sem argila (profundidade de escavação > 50 m) .....	2,5	
G. Fracturas abertas, muito próximas, tipo "cubo de açúcar" (qualquer profundidade) .....	5	
<i>(b) Rocha competente, problemas de tensão</i>		
H. Baixa tensão; próximo da superfície ( $\sigma_v/\sigma_1 > 200$ e $\sigma_v/\sigma_1 > 13$ ) .....	2,5	
I. Tensão média ( $10 < \sigma_v/\sigma_1 < 200$ ; $0,66 < \sigma_v/\sigma_1 < 13$ ) .....	1	
J. Tensão elevada, estrutura muito compacta, usualmente favorável à estabilidade, poderá ser desfavorável à estabilidade das paredes ( $5 < \sigma_v/\sigma_1 < 10$ ; $0,33 < \sigma_v/\sigma_1 < 0,33$ ) .....	0,5-2	
K. "Golpe de terreno" suave ( $2,5 < \sigma_v/\sigma_1 < 5$ ; $0,16 < \sigma_v/\sigma_1 < 0,33$ ) .....	5-10	
L. "Golpe de terreno" ( $\sigma_v/\sigma_1 < 2,5$ e $\sigma_v/\sigma_1 < 0,16$ ) .....	10-20	
<i>(c) Rocha compressível; fluência plástica de rocha branda sob influência de elevada pressão rochosa</i>		
<b>M. Pressão rochosa média de compressibilidade .....</b>	<b>5-10</b>	
<b>N. Pressão rochosa elevada de compressibilidade .....</b>	<b>10-20</b>	
<i>(d) Rocha expansiva, dependente da presença de água</i>		
O. Pressão rochosa média de expansibilidade .....	5-10	
P. Pressão rochosa elevada de expansibilidade .....	10-15	

Através de equação 11 temos:

$$Q = \frac{37}{9} \times \frac{2}{8} \times \frac{0,66}{5,5} = 0,13$$

# Classificação “Geological Strength Index” – GSI

Método Analítico (para RMR = 47):

$$GSI = RMR - 5 \leftrightarrow 47 - 5 = 42$$

Método empírico

GEOLOGICAL STRENGTH INDEX - GSI		CARACTERÍSTICAS DAS SUPERFÍCIES DAS DESCONTINUIDADES													
Índice Geológico de Resistência - maciços diaclasados (Hoek e Marinos, 2000)		MUITO BOAS	BOAS	RAZOVÁVEIS	FRACAS	MUITO FRACAS									
A partir da litologia, da estrutura do maciço, e das características das superfícies das suas descontinuidades, estimar o valor médio de GSI. Não ser demasiado preciso (é mais realista referir um intervalo de GSI= 33-37, que afirmar que GSI=35).		Superfícies muito rugosas, são	Superfícies rugosas, ligeiramente alteradas, com oxidação	Superfícies suaves, moderadamente alteradas e desgastadas	Superfícies esdrasadas, fortemente alteradas, com preenchimentos arenosos	Superfícies esdrasadas, fortemente alteradas, com preenchimentos argilosos									
É de referir que a tabela não tem validade para roturas determinadas pela estrutura do maciço. Quando ocorram descontinuidades desfavoravelmente orientadas, determinarão o comportamento da escavação.															
No caso de descontinuidades com preenchimento que se possa deteriorar com presença de humidade, resultando na diminuição da resistência ao corte, sugere-se o uso de valores mais à direita. A ação da pressão da água é analisada em função das tensões efectivas.															
GEOESTRUTURA		QUALIDADE DECRESCENTE DAS SUPERFÍCIES →													
 INTACTA OU MACIÇA - rocha intacta ou maciça com descontinuidades em pequena quantidade e muito afastadas.	 COMPARTIMENTADO ("blocky") - maciço não perturbado, constituído por blocos cúbicos, bem travados entre si, definidos por 3 famílias de descontinuidades.	 MUITO COMPARTIMENTADO ("very blocky") - maciço parcialmente perturbado, com blocos angulares multi-facetados, travados entre si, definidos por 4 ou mais famílias de descontinuidades.	 COMPARTIMENTADO/TECTONIZADO ("blocky/disturbed") - dobrado e/ou com presença de falhas, com blocos angulares definidos por várias famílias de descontinuidades. Peristância de xistosidade ou planos de fraqueza.	 DESINTEGRADO - maciço pouco interligado, fortemente partido, com mistura de fragmentos angulares e arredondados.	 FOLIADO/LAMINADO - maciço foliado, dobrado e tectonizado. A estrutura do maciço é conferida pela presença de planos de xistosidade ou de corte pouco espaçados.	90	80	70	60	50	40	30	20	10	5
						INTERLIGAÇÃO DECRESCENTE ENTRE BLOCOS DE ROCHA									

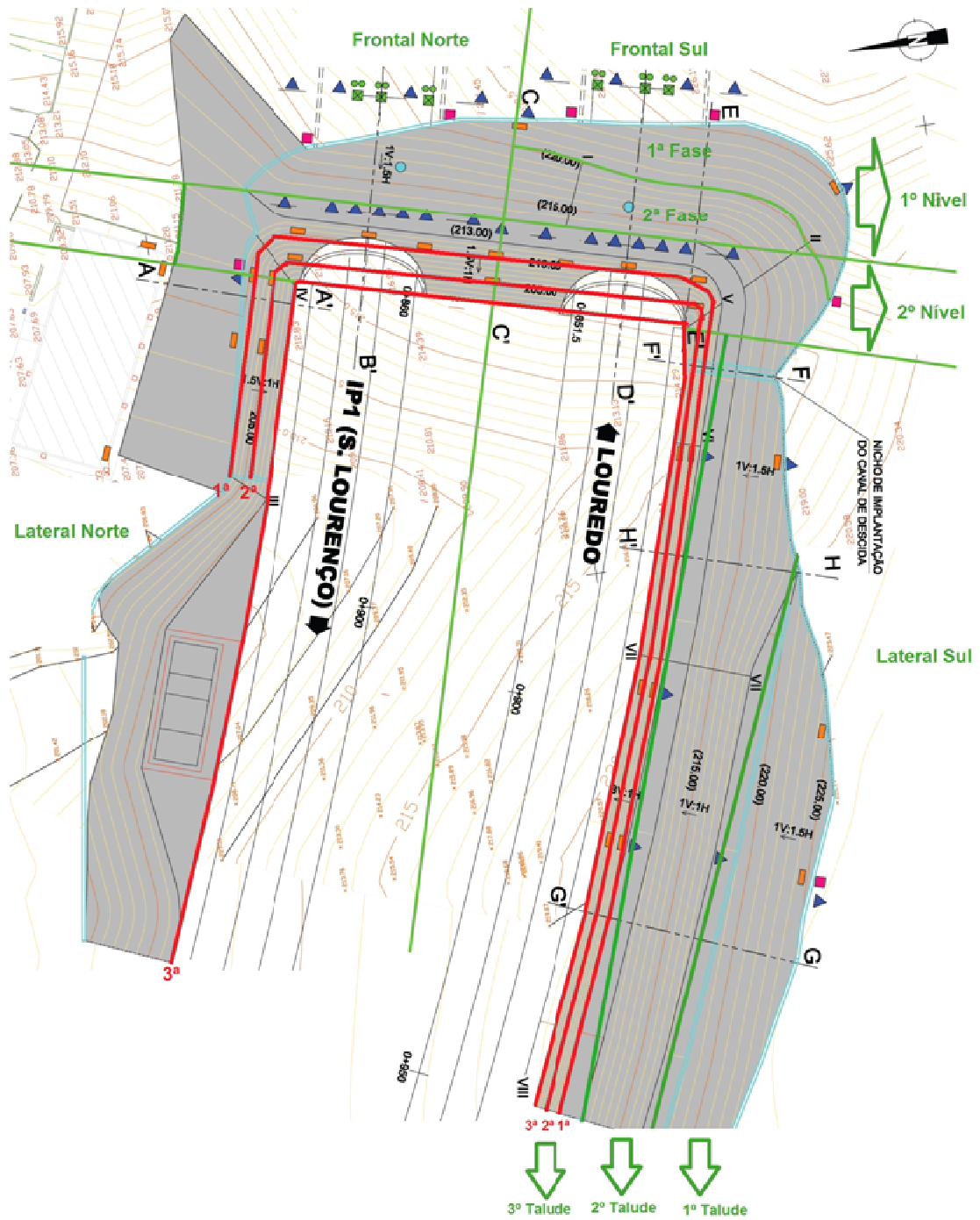
Pelo método empírico temos valores entre os 20 e os 35.

**Anexo 4**

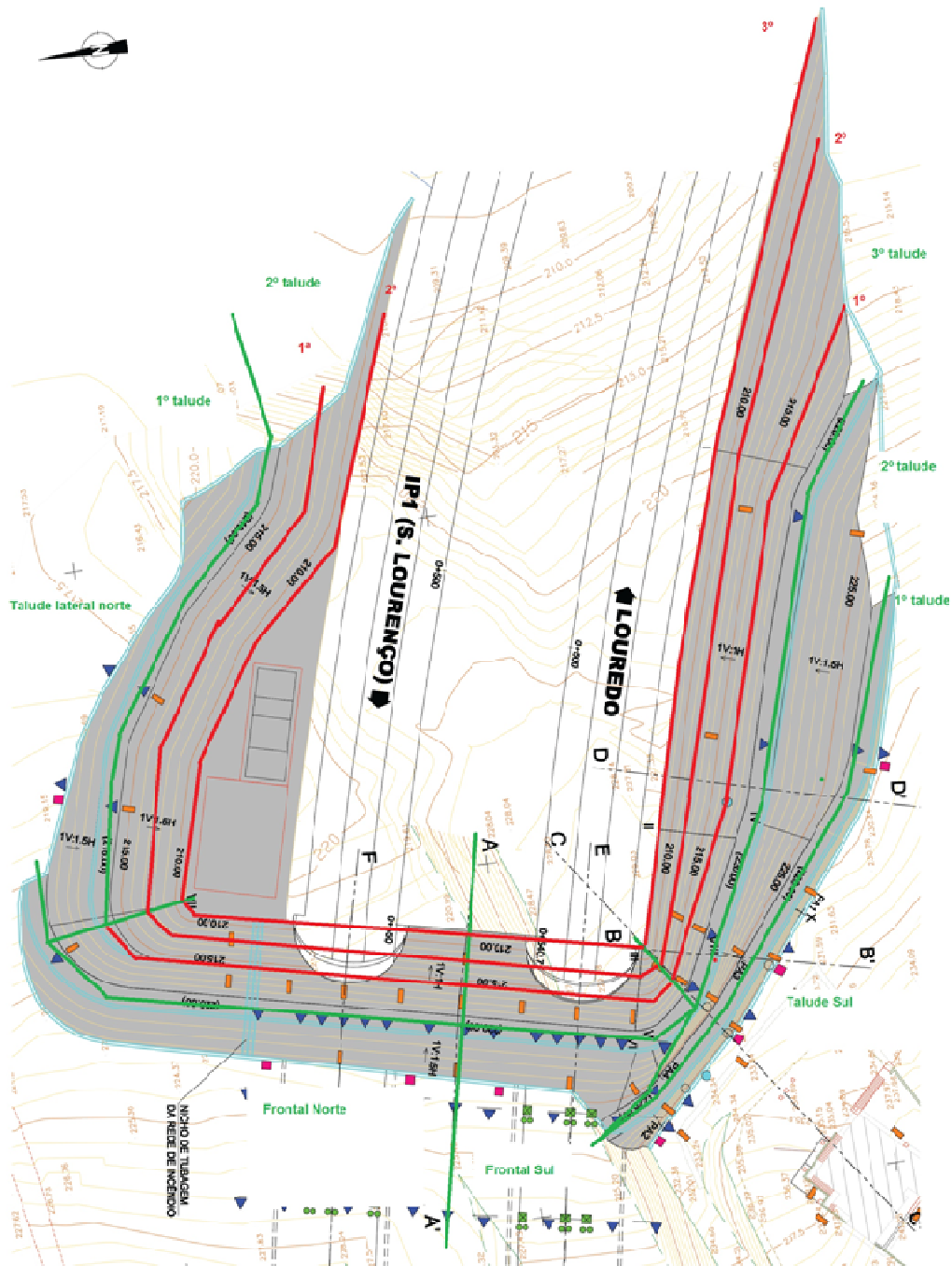
**Mapas de produção dos taludes**



# Guia de consulta dos mapas de produção – Emboquilhamento ponte



# Guia de consulta dos mapas de produção – Emboquilhamento nascente



**Abril**



Poente:

19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30

Frontal		Norte	1ª fase(acima da banquetta)	Drenos	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
			2ª fase (abaixo da banquetta)	1ª fase de escavação	Drenos											
			Pregos 12 metros													
			Pregos 6 metros		1									22		7
			Pregos Diwidag ( 12 m)													
			Betão Projectado					1ª (5cm)				1ª (5cm)			2ª (5cm)	
			Drenos													
			Pregos 12 metros													
			Pregos 6 metros													
			Pregos Diwidag ( 12 m)													
			Betão Projectado													
			Drenos													
			Pregos 12 metros													
			Pregos 6 metros													
			Pregos Diwidag ( 12 m)													
			Betão Projectado													
			Drenos													
			Pregos 12 metros													
			Pregos 6 metros													
			Pregos Diwidag ( 12 m)													
			Betão Projectado													
			Drenos													
			Pregos 12 metros													
			Pregos 6 metros													
			Pregos Diwidag ( 12 m)													
			Betão Projectado													
			Drenos													
			Pregos 12 metros													
			Pregos 6 metros													
			Pregos Diwidag ( 12 m)													
			Betão Projectado													
			Drenos													
			Pregos 12 metros													
			Pregos 6 metros													
			Pregos Diwidag ( 12 m)													
			Betão Projectado													
			Drenos													
			Pregos 12 metros													
			Pregos 6 metros													
			Pregos Diwidag ( 12 m)													
			Betão Projectado													
			Drenos													
			Pregos 12 metros													
			Pregos 6 metros													
			Pregos Diwidag ( 12 m)													
			Betão Projectado													
			Drenos													
			Pregos 12 metros													
			Pregos 6 metros													
			Pregos Diwidag ( 12 m)													
			Betão Projectado													
			Drenos													
			Pregos 12 metros													
			Pregos 6 metros													
			Pregos Diwidag ( 12 m)													
			Betão Projectado													
			Drenos													
			Pregos 12 metros													
			Pregos 6 metros													
			Pregos Diwidag ( 12 m)													
			Betão Projectado													
			Drenos													
			Pregos 12 metros													
			Pregos 6 metros													
			Pregos Diwidag ( 12 m)													
			Betão Projectado													
			Drenos													
			Pregos 12 metros													
			Pregos 6 metros													
			Pregos Diwidag ( 12 m)													
			Betão Projectado													
			Drenos													
			Pregos 12 metros													
			Pregos 6 metros													
			Pregos Diwidag ( 12 m)													
			Betão Projectado													
			Drenos													
			Pregos 12 metros													
			Pregos 6 metros													
			Pregos Diwidag ( 12 m)													
			Betão Projectado													
			Drenos													
			Pregos 12 metros													
			Pregos 6 metros													
			Pregos Diwidag ( 12 m)													
			Betão Projectado													
			Drenos													
			Pregos 12 metros													
			Pregos 6 metros													
			Pregos Diwidag ( 12 m)													
			Betão Projectado													
			Drenos													
			Pregos 12 metros													
			Pregos 6 metros													
			Pregos Diwidag ( 12 m)													
			Betão Projectado													
			Drenos													
			Pregos 12 metros													
			Pregos 6 metros													
			Pregos Diwidag ( 12 m)													
			Betão Projectado													
			Drenos													
			Pregos 12 metros													
			Pregos 6 metros													
			Pregos Diwidag ( 12 m)													
			Betão Projectado													
			Drenos													
			Pregos 12 metros													
			Pregos 6 metros													



**Maio**







**Junho**







**Julho**







**Anexo 5**  
**Mapas de produção do túnel**





			01-Jun	02-Jun	03-Jun	04-Jun	05-Jun	06-Jun	07-Jun	08-Jun	09-Jun	10-Jun	11-Jun	12-Jun	13-Jun	14-Jun	15-Jun	16-Jun	17-Jun	18-Jun	19-Jun	20-Jun	21-Jun	22-Jun	23-Jun	24-Jun	25-Jun	26-Jun	27-Jun	28-Jun	29-Jun	30-Jun				
Poente	Norte	PK																																		
		ZG																																		
		Avanços	Calote	1																																
			Rebaixo	2																																
		Sustimento	Swelllex	L=4 m																																
				L=6m																																
			Betão projectado*																																	
			Enfilagens																																	
			Microestacas																																	
			Perfis metálicos	TH 29	1ª fase																															
2ª fase																																				
PS 115 20 30	1ª fase																																			
	2ª fase																																			
Fibras de vidro																																				
Perfis provisórios																																				
Malha*																																				
Drenagem																																				
Drenos																																				
Totais																																				
Poente	Sul	PK																																		
		ZG																																		
		Avanços	Calote	1																																
			Rebaixo	2																																
		Sustimento	Swelllex	L=4 m																																
				L=6m																																
			Betão projectado*																																	
			Enfilagens																																	
			Microestacas																																	
			Perfis metálicos	TH 29	1ª fase																															
2ª fase																																				
PS 115 20 30	1ª fase																																			
	2ª fase																																			
Fibras de vidro																																				
Perfis provisórios																																				
Malha*																																				
Drenagem																																				
Drenos																																				
Totais																																				
Nascente	Norte	PK																																		
		ZG																																		
		Avanços	Calote	1																																
			Rebaixo	2																																
		Sustimento	Swelllex	L=4 m																																
				L=6m																																
			Betão projectado*																																	
			Enfilagens																																	
			Microestacas																																	
			Perfis metálicos	TH 29	1ª fase																															
2ª fase																																				
PS 115 20 30	1ª fase																																			
	2ª fase																																			
Fibras de vidro																																				
Perfis provisórios																																				
Malha*																																				
Drenagem																																				
Drenos																																				
Totais																																				
Nascente	Sul	PK																																		
		ZG																																		
		Avanços	Calote	1																																
			Rebaixo	2																																
		Sustimento	Swelllex	L=4 m																																
				L=6m																																
			Betão projectado*																																	
			Enfilagens																																	
			Microestacas																																	
			Perfis metálicos	TH 29	1ª fase																															
2ª fase																																				
PS 115 20 30	1ª fase																																			
	2ª fase																																			
Fibras de vidro																																				
Perfis provisórios																																				
Malha*																																				
Drenagem																																				
Drenos																																				
Totais																																				

\* dados não disponíveis

			01-Jul	02-Jul	03-Jul	04-Jul	05-Jul	06-Jul	07-Jul	08-Jul	09-Jul	10-Jul	11-Jul	12-Jul	13-Jul	14-Jul	15-Jul	16-Jul	17-Jul	18-Jul	19-Jul	20-Jul	21-Jul	22-Jul	23-Jul	24-Jul	25-Jul	26-Jul	27-Jul	28-Jul	29-Jul	30-Jul			
Poente	Norte	PK	812	811,3	810	809	807,5	806	805,25	805	804,75			803	802	802	801	799	799	797,9	797	797,5	797,5	796,1	794			793	791,8	791,8					
		ZG	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2			2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2			2	2	2				
		Avanços	Calote	1	0,7	0,7	1	1,5	1,5	1,5	0,75	0,25	1			1,5			1	2	0	1,1	1	0,75	1,3	1			1	1,2	2				
			2	2,5	2,2			1,5	1,5	1,5	0,75					1,5	1,5	2,25		2,25	0,7		0,75	0,8		1,4			0,75		1,5				
			3																																
			Rebaixo	4a																															
		4b																																	
		Sustimento	Swellex	L=4 m																				8				8							
			L=6m																											8		8			
			Betão projectado*																																
Enfilagens									21	6									20	9															
Microestacas																																			
Perfis	PS 115 20		1ª fase	1	1	1	2	2	2	1		1			1			1	2	1	1	1	1		1	1		1	1						
	30	2ª fase	4	3			2	2	1	1	1			2	2	3		3				1	1		2			1	1	2					
Fibras de vidro									3																										
Perfis provisórios		1	1	1	2	2	2	1		1	1			1			1	2	1	1	1	1		1	1		1	1							
Malha*																																			
Drenagem	Drenos																																		
Poente	Sul	PK		850	850	850	850	850		846,2	844,7			843,2	840,95	839,45	837,95	838	836,45	833,25	830,65	829,15	828,55	825,65	822,75			820,75	820	820					
		ZG								3	3			3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3			2	2	2				
		Avanços	Calote	1							1,5	1,5			1,5	2,25	1,5	1,5		3,2	2,6	1,5	0,6	2,9	2,9	2			0,75		0,75				
			2								1,5	1,5			0,75									1,3	0,6	2,2	1,6					1,5			
			3																																
			Rebaixo	4a																															
		4b																																	
		Sustimento	Swellex	L=4 m																															
			L=6m																																
			Betão projectado*																																
Enfilagens																	18	12												20	10				
Microestacas																																			
Perfis	PS 115 20		1ª fase									2			2	3	2	2		3	4	2	1	3	4	1			1	1	1				
	30	2ª fase									2			1								2	1	2	2			1		2					
Fibras de vidro									13																										
Perfis provisórios										2				2	3	2	2		3	4	2	1	3	4	1			1	1	1					
Malha*																																			
Drenagem	Drenos																																		
Nascente	Norte	PK	567,3	568	569,5	571	572,5	574,0	574,8	575,5	575,5			576,3	577,8	577,8	579,3	580,0	581,2	582,9	582,9	584,4	586	586	586			586,75	587,5	587,8	588,25				
		ZG	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2			2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2			2	2	2	2			
		Avanços	Calote	1	0,7	1,5	2	2	1	1,5	0,75	0,75			0,75	1,5			1,5	0,8	1,2			1,5	1,6				0,75	0,75	0,5	1,5			
			2																					0,8					1,5	1,5					
			3																																
			Rebaixo	4a																															
		4b																																	
		Sustimento	Swellex	L=4 m																															
			L=6m																																
			Betão projectado*																																
Enfilagens									14	18												17	15			19	11								
Microestacas																																			
Perfis	PS 115 20		1ª fase	1	2	2	2	1	2	1	1			1	2		2	1	2	2			2	2						1					
	30	2ª fase														2							1						2			2			
Perfis provisórios		1	2	2	2	1	2	1	1				1	2		2	1	2	2			2	2												
Fibras de vidro																																			
Malha*																																			
Drenagem	Drenos																																		
Nascente	Sul	PK																																	
		ZG																																	
		Avanços	Calote	1																															
			2																																
			3																																
			Rebaixo	4a																															
		4b																																	
		Sustimento	Swellex	L=4 m																															
			L=6m																																
			Betão projectado*																																
Enfilagens																																			
Microestacas																																			
Perfis	PS 115 20 30																							7	14	10									
Malha*																																			
Drenagem	Drenos																																		

\* dados não disponíveis

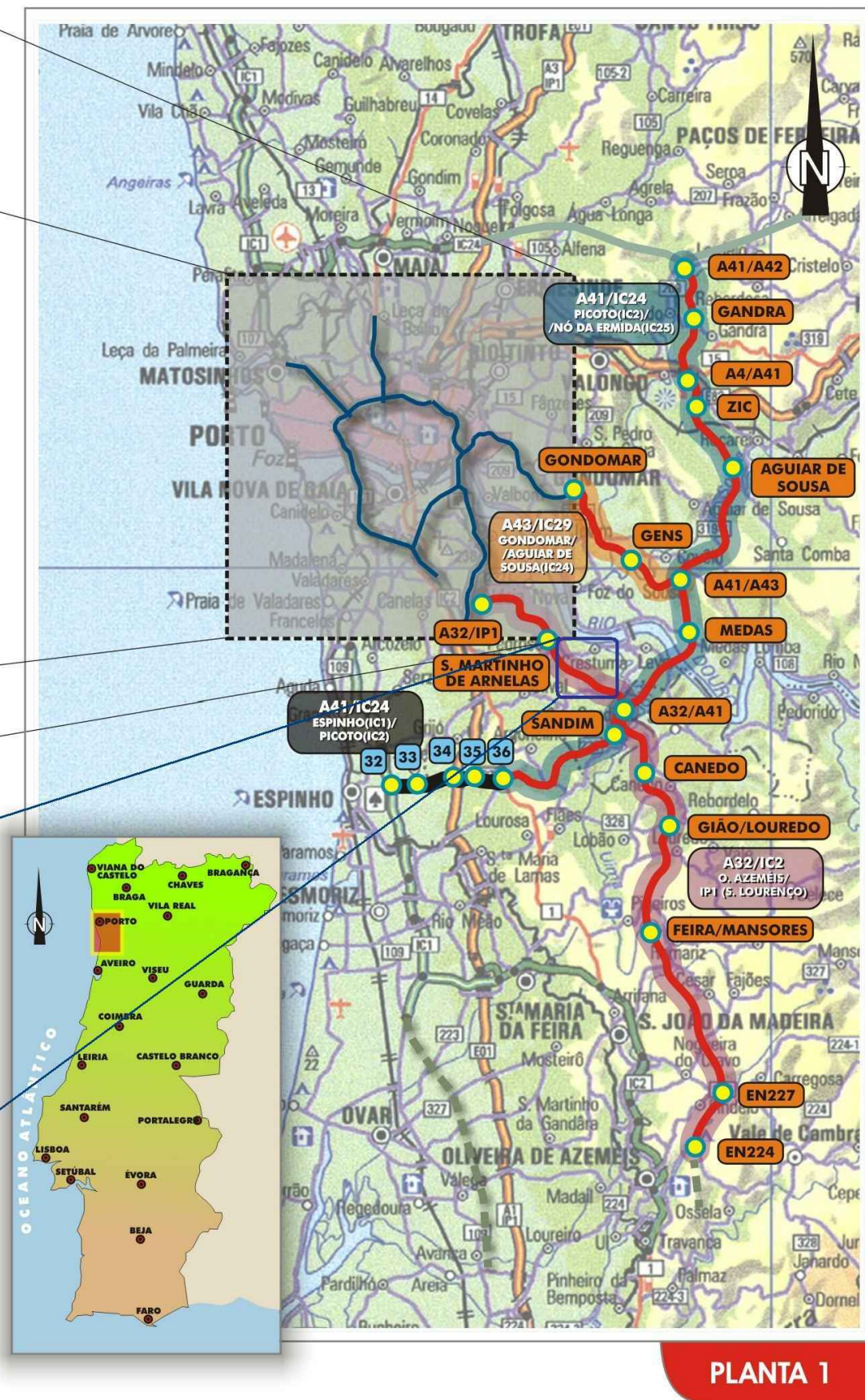
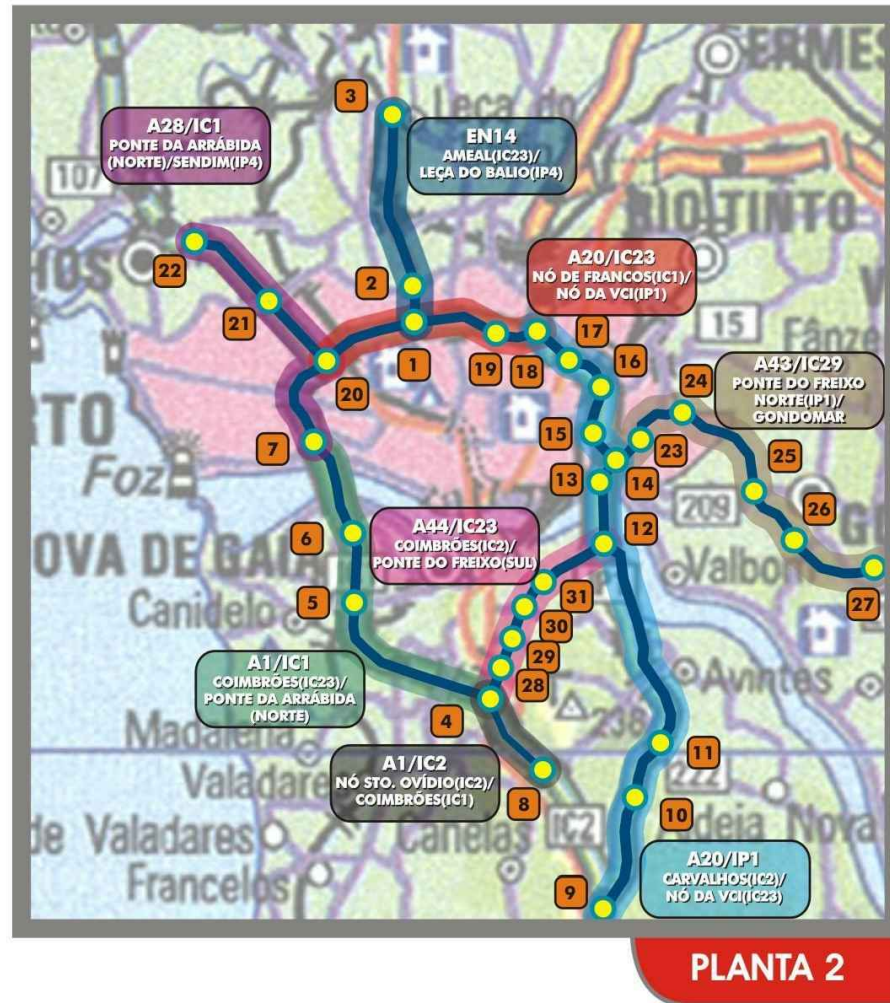
Totais
20,8
21,65
32
56
23
31
3
23
Totais
26,95
10,95
60
46
32
11
13
32
Totais
22,5
5,3
94
27
7
26
Totais
31

**Anexo 6**

**Plantas**



<b>PLANTA 1</b>	32 ESPINHO (A29)
	33 GUETIM
	34 A1
	35 NOGUEIRA
	36 PICOTO (ARGONCILHE)
<b>PLANTA 2</b>	1 VIA NORTE
	2 EN12 (AMEAL)
	3 LEÇA DO BALIO (IP4)
	4 COIMBRÕES
	5 DEVASAS
	6 PONTE DA ARRÁBIDA SUL (AFURADA)
	7 PONTE DA ARRÁBIDA NORTE
	8 SANTO OVIDIO
	9 CARVALHOS (IC2)
	10 SÃO LOURENÇO
	11 GAIA (AV. REPÚBLICA)
	12 PONTE DO FREIXO SUL
	13 PONTE DO FREIXO NORTE
	14 CAMPANHÁ
	15 SÃO ROQUE
	16 MERCADO ABASTECEDOR
	17 ANTAS
	18 VCI (IC23)
	19 PARANHOS
	20 FRANÇOS
	21 NÓ COM A EN12
	22 SENDIM (IP4)
	23 FALCÃO
	24 AREIAS
	25 CARREGAIS
	26 RAMALDE
	27 GONDOMAR
	28 BAROSA
	29 GERVIDE 1
	30 GERVIDE 2
	31 MAFAMUDE



<b>isop</b>		<b>DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA</b>	
Autor: -	Rev.: -	<b>Planificação e Organização de Trabalho em Obras Subterrâneas</b>	
Escala: -	Data: SET. 2009		
Anexo VI	Folha nº: 1/8	<b>Planta de Localização da Obra em Estudo</b>	
Versão: -		Planta cedida pela DLOEACE - Túnel de Seixo Alvo (modificado e simplificado para efeitos de apresentação deste trabalho)	

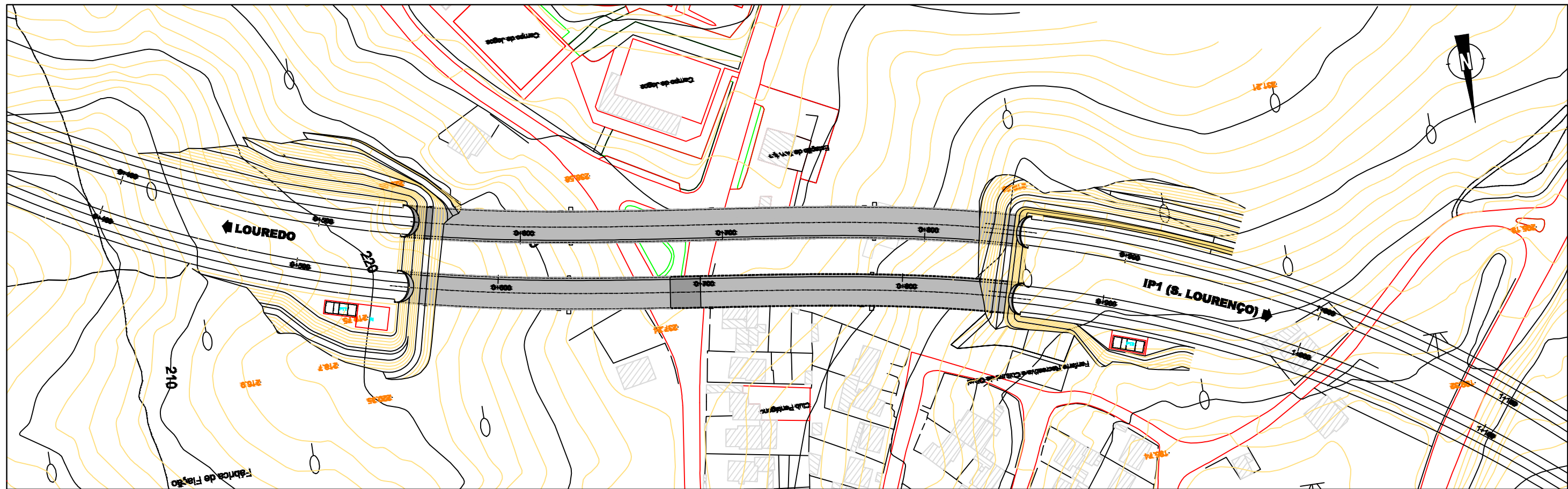


**COBA**  
CONSULTORES DE  
ENGENHARIA E AMBIENTE

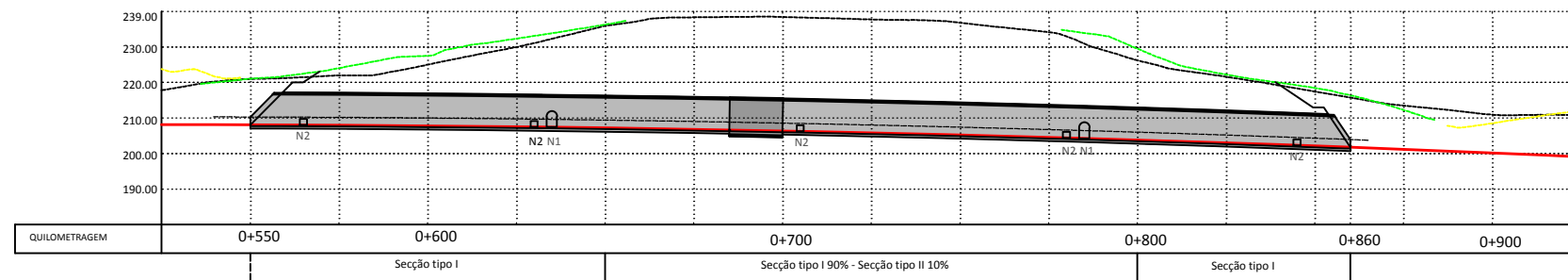
CONCESSÃO DOURO LITORAL  
A32 / IC2 - OLIVEIRA DE AZEMÉIS / IP1 (S.LOURENÇO)  
TRECHO 3 - LOUREDO / IP1 (S.LOURENÇO)

Elaborado: DRC  
Verificado: DRC  
Aprovado: JPC

<b>DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA</b>	
Autor: -	Rev: -
Escala: 1/25000	
Data: SET. 2009	
Anexo VI	Folha nº: 2/8
Versão: -	
<b>Planificação e Organização de Trabalho em Obras Subterrâneas</b>	
Planta Topográfica 1/25000 (Fundo IGeoE)	
Planta cedida pela DLOACE - Túnel de Seixo Alvo (modificado e simplificado para efeitos de apresentação deste trabalho)	

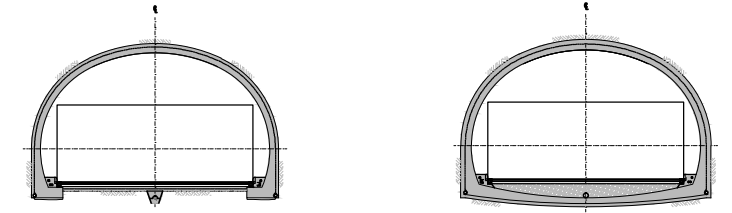


PLANTA Esc:1:2000



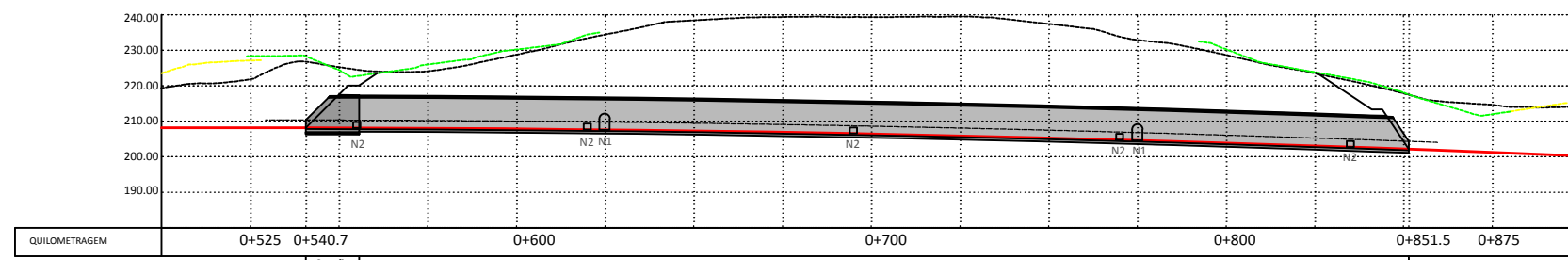
TÚNEL NORTE - FAIXA DIREITA  
Esc:1:2000

PERFIL LONGITUDINAL



SEÇÃO TIPO I  
ZG1, ZG2 E ZG3 COM  
FUNDAÇÃO ZG2

SEÇÃO TIPO II  
ZG3



TÚNEL SUL - FAIXA ESQUERDA  
Esc:1:2000

PERFIL LONGITUDINAL

LOCALIZAÇÃO DOS NICHOS

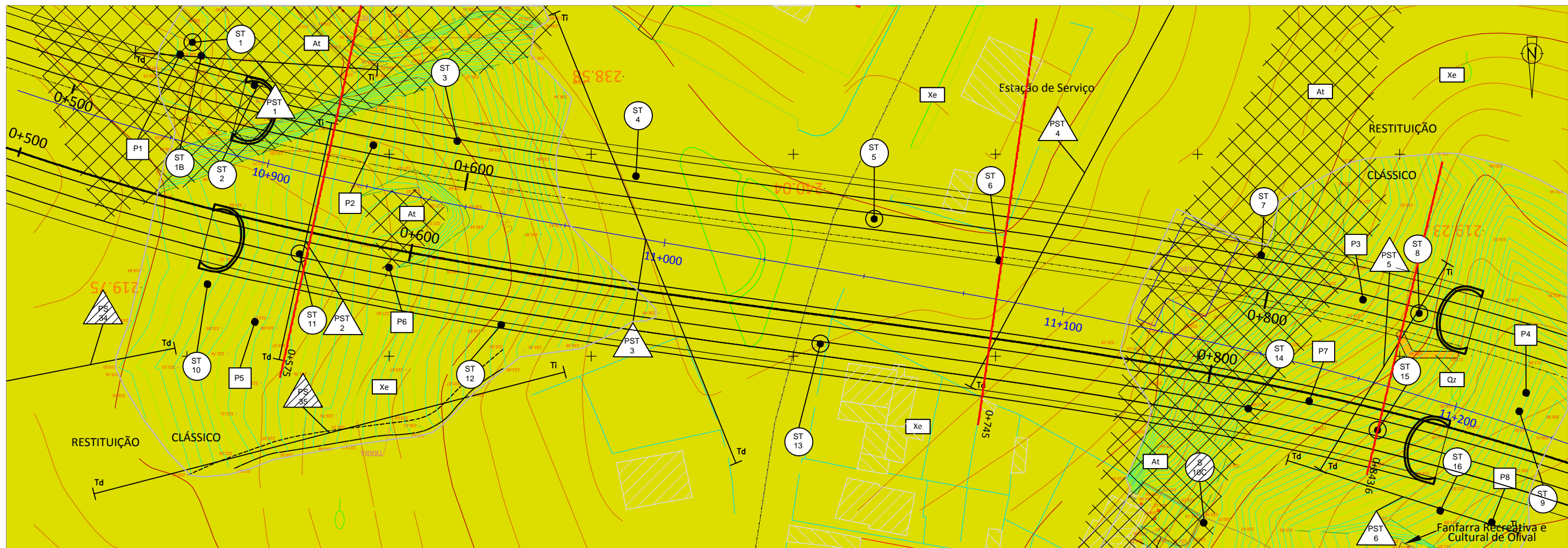
Galeria Norte Faixa Direita			Galeria Sul Faixa Esquerda		
Pk	Lado Direito	Lado Esquerdo	Pk	Lado Direito	Lado Esquerdo
0+550	Entrada		0+540,7	Entrada	
0+555	N2		0+555	N2	
0+630	N2		0+620	N2	
0+635	N1	N3	0+625	N1	N3
0+705	N2		0+695	N2	
0+780	N2		0+770	N2	
0+785	N1	N3	0+775	N1	N3
0+845	N2		0+835	N2	
0+860	Saída		851,5	Saída	

<b>isop</b>		<b>DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA</b>	
Autor: -	Rev.: -	<b>Planificação e Organização de Trabalho em Obras Subterrâneas</b>	
Escala: 1/2000	Data: SET. 2009		
Anexo VI	Folha nº: 3/8	<b>Túnel do Seixo Alvo (Planta e Perfil)</b>	
Versão: -		Planta cedida pela DLOEACE - Túnel de Seixo Alvo (modificado e simplificada para efeitos de apresentação deste trabalho)	

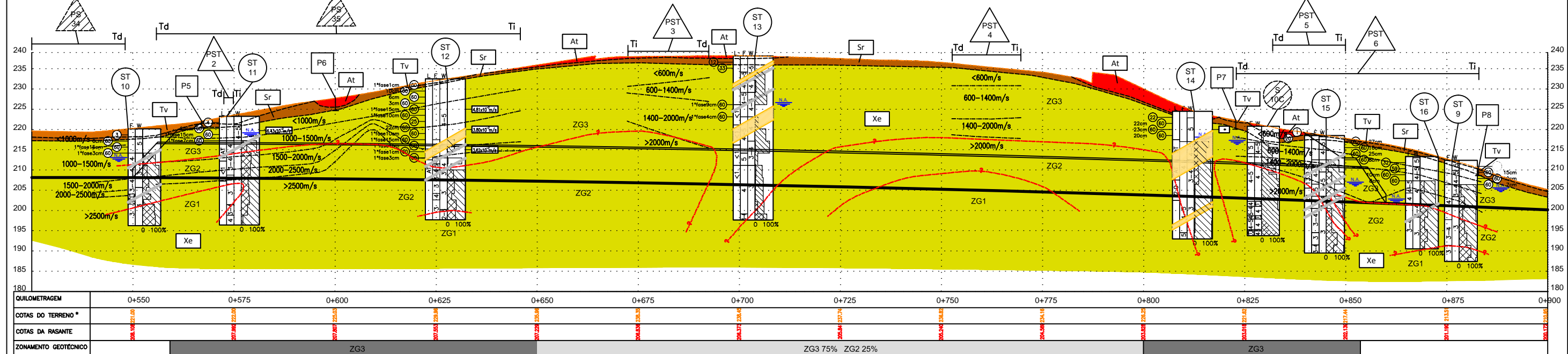


CONCESSÃO DOURO LITORAL  
A32 / IC2 - OLIVEIRA DE AZEMÉIS / IP1 (S.LOURENÇO)  
TRECHO 3 - LOUREDO / IP1 (S.LOURENÇO)

Elaborado: ATB  
Verificado: RP  
Aprovado: JPC



PLANTA (LEVANTAMENTO CLÁSSICO E RESTITUIÇÃO) (ESCALA 1:1000)



PERFIL AO EIXO DA GALERIA NORTE / DIREITA (ESCALA 1:1000)

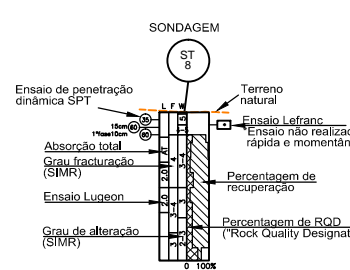
\* RESTITUIÇÃO / TRAÇADO SOBRE A DIRETRIZ

**LITOESTRATIGRAFIA**

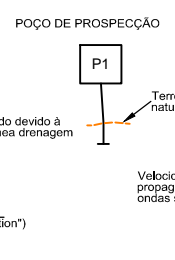
RECENTE	ANTE-ORDOVÍCIO COMPLEXO XISTO GRAUÁUÍQUICO
Tv - Terra vegetal	Xe - Xistos estaurólitos (Xistos de Fânzeres)
At - Aterro	+ - Granitóides
Sr - Solo residual	Qz - Quartzo (Filão)



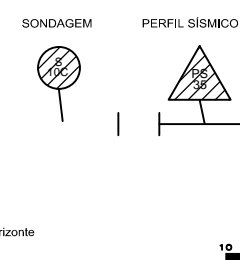
**LEGENDA**



**CAMPANHA ACTUAL**



**CAMPANHAS ANTERIORES**



**ZONAMENTO GEOTÉCNICO DO MACIÇO**

Zona Geotécnica	Litologia	Alteração (SRM)	Fracturação (SRM)	Rec (%)	GSi	ROD (%)	RMR
ZG1	Xe, qz	W2-3 a W3	*F2-3 a F3	≥90	42-62	≥50	>45
ZG2	Xe, qz	**W3-4	F3-4 a F4	≥50	28-45	≥25	30-45
ZG3	Sr, Xe, qz (matriz xistos e médio termo)	W4 a W5	F4-5 a F5	<50	15-30	<25	<30

\* Localizadamente F3-4  
\*\* Localizadamente W

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA**

Autor: - Rev: -

Escala: 1/1000

Data: JULHO 2009

Anexo VI Folha nº: 4/8

Versão: -

**Planificação e Organização de Trabalho em Obras Subterrâneas**

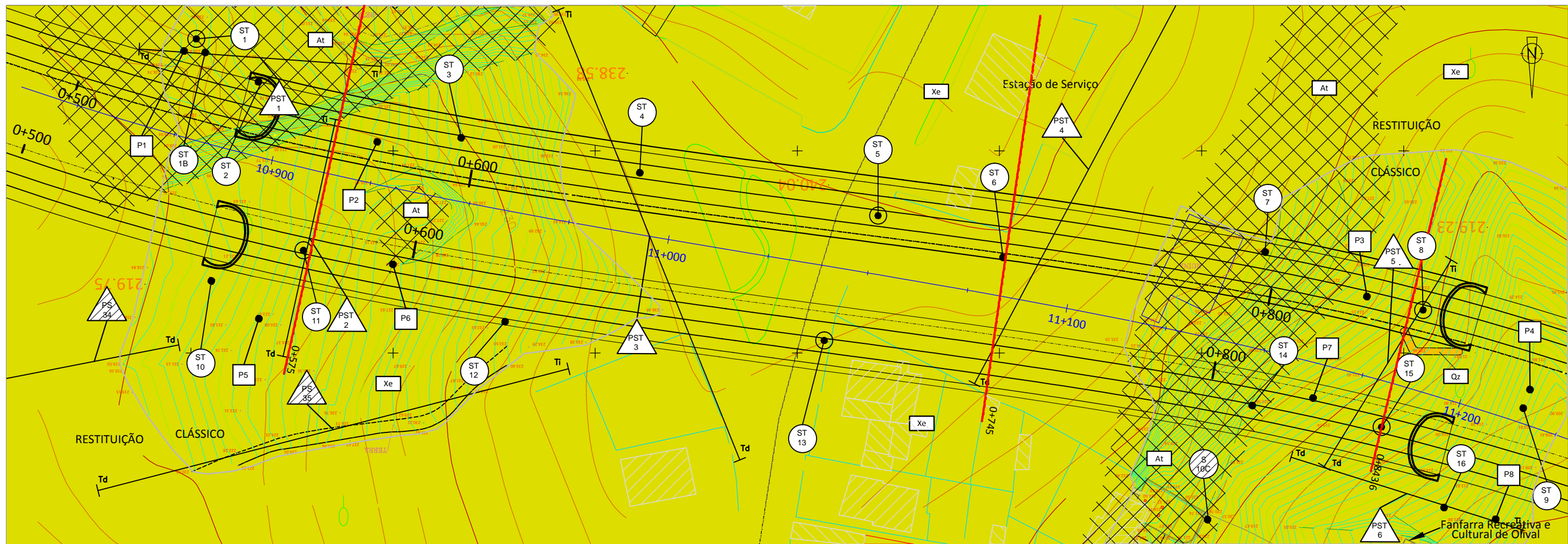
**Zonamento Geológico Geotécnico (Galeria Norte)**

Planta cedida pela DLOEACE - Túnel de Seixo Alvo (modificado e simplificado para efeitos de apresentação deste trabalho)

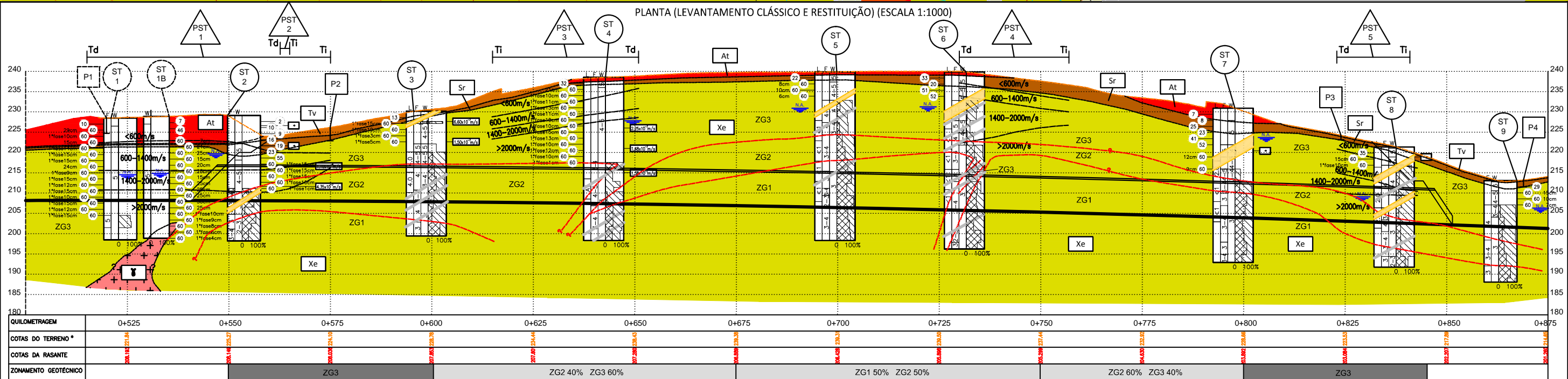


**CONCESSÃO DOURO LITORAL**  
A32 / IC2 - OLIVEIRA DE AZEMÉIS / IP1 (S.LOURENÇO)  
TRECHO 3 - LOUREDO / IP1 (S.LOURENÇO)

Elaborado: ATB/FCC  
Verificado: ATB  
Aprovado: RP



PLANTA (LEVANTAMENTO CLÁSSICO E RESTITUIÇÃO) (ESCALA 1:1000)



PERFIL AO EIXO DA GALERIA SUL / ESQUERDA (ESCALA 1:1000)

\*RESTITUIÇÃO / TRAÇADO SOBRE A DIRECTRIZ

LITOESTRATIGRAFIA

- |                    |   |
|--------------------|---|
| <b>RECENTE</b>     | <b>ANTE-ORDOVÍCIO<br/>COMPLEXO XISTO GRAUÁQUICO</b> |
| Tv - Terra vegetal | Xe - Xistos estaurólitos (Xistos de Fânzeres)       |
| At - Aterro        | + - Granitóides                                     |
| Sr - Solo residual | Qz - Quartzo (Filão)                                |

LEGENDA

- |  |   |  |
|--|---|--|
| <b>SONDAGEM</b>  | <b>CAMPANHA ACTUAL</b>  | <b>CAMPANHAS ANTERIORES</b>  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>Ensaio de penetração dinâmica SPT</li> <li>Ensaio Leifranç</li> <li>Ensaio não realizado devido à rápida e momentânea drenagem</li> <li>Ensaio Lugeon</li> <li>Ensaio de recuperação</li> <li>Ensaio de alteração (SIMR)</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>POÇO DE PROSPECÇÃO</li> <li>Terreno natural</li> <li>Velocidade de propagação das ondas sísmicas</li> <li>Terreno natural</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>PERFIL SÍSMICO</li> <li>SONDAGEM</li> <li>PERFIL SÍSMICO</li> </ul> |

ZONAMENTO GEOTÉCNICO DO MACIÇO

Zona Geotécnica	Litologia	Alteração (SRM)	Fracturação (SRM)	Rec (%)	GSi	ROD (%)	RMR
ZG1	Xe, qz	W <sub>2-3</sub> a W <sub>3</sub>	F <sub>2-3</sub> a F <sub>3</sub>	≥90	42-62	≥50	>45
ZG2	Xe, qz	**W <sub>3-4</sub>	F <sub>3-4</sub> a F <sub>4</sub>	≥50	28-45	≥25	30-45
ZG3	Sr, Xe, qz (muito pouco alterado e pouco fraturado)	W <sub>4</sub> a W <sub>5</sub>	F <sub>4-5</sub> a F <sub>5</sub>	<50	15-30	<25	<30

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA**

Autor: - Rev: -

Escala: 1/1000

Data: JULHO 2009

Anexo VI Folha nº: 5/8

Versão: -

**Planificação e Organização de Trabalho em Obras Subterrâneas**

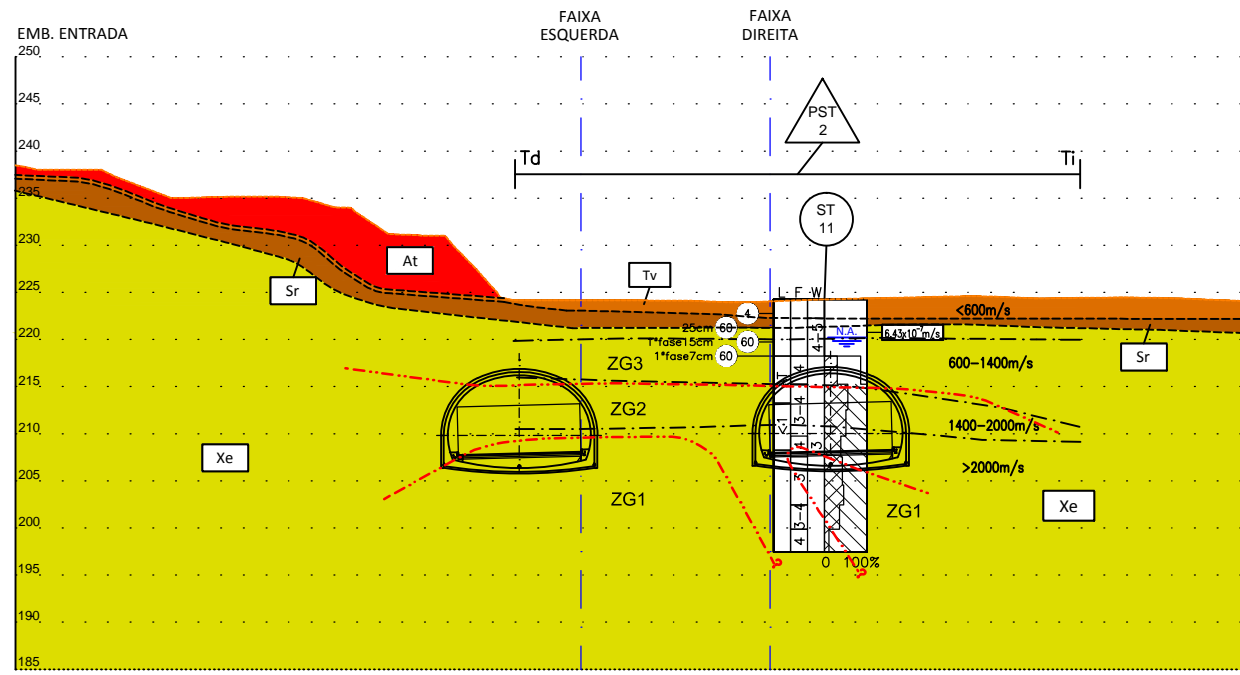
**Zonamento Geológico Geotécnico (Galeria Sul)**

Planta cedida pela DLOEACE - Túnel de Seixo Alvo (modificado e simplificado para efeitos de apresentação deste trabalho)

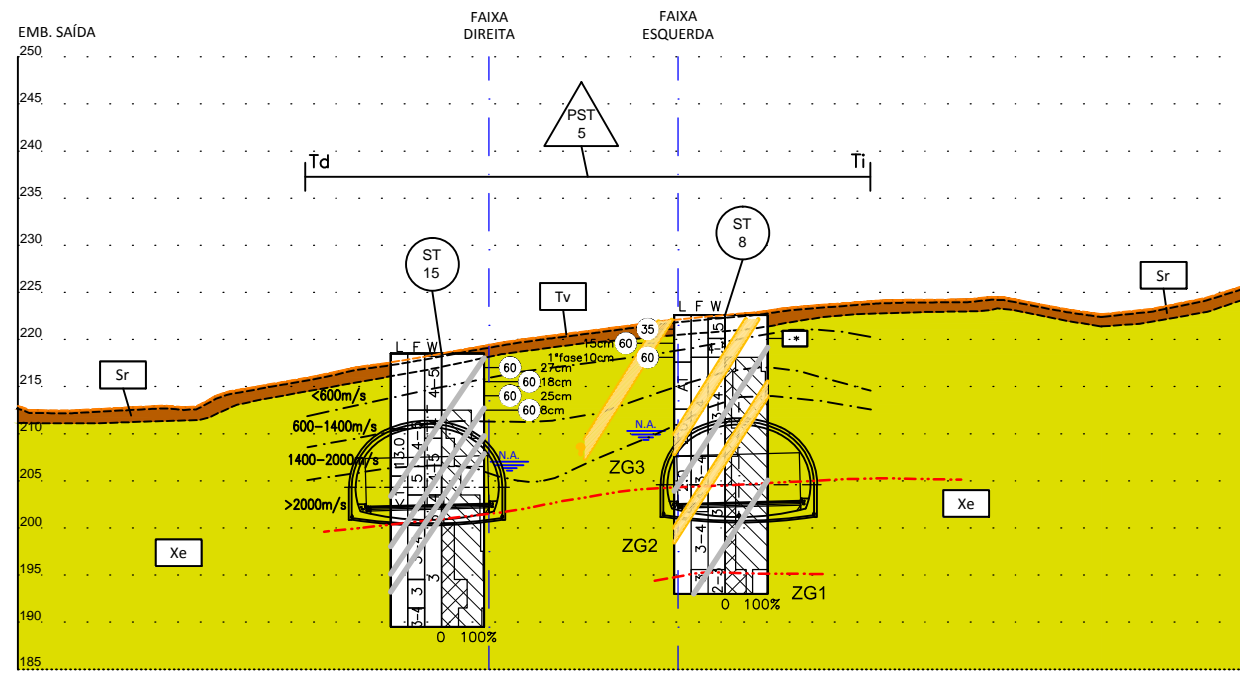


CONCESSÃO DOURO LITORAL  
A32 / IC2 - OLIVEIRA DE AZEMÉIS / IP1 (S.LOURENÇO)  
TRECHO 3 - LOUREDO / IP1 (S.LOURENÇO)

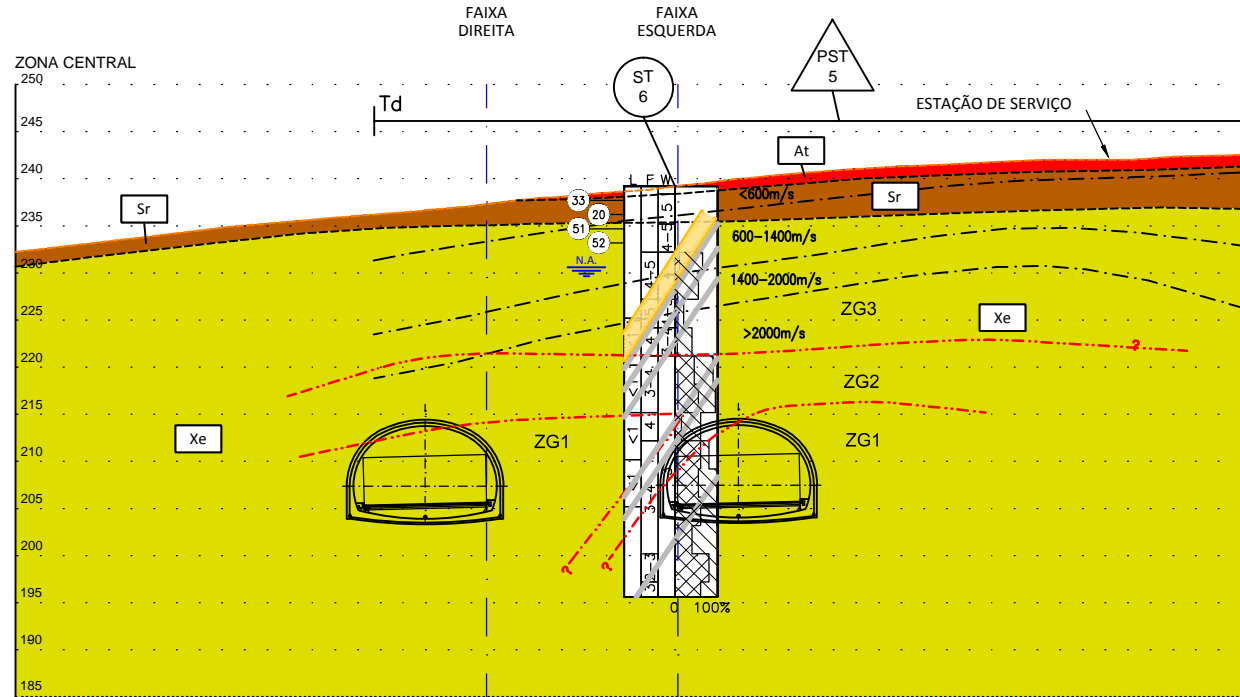
Elaborado: DRC  
Verificado: DRC  
Aprovado: JPC



PERFIL TRANSVERSAL  
PK 0+575 (GALERIA NORTE)  
LEVANTAMENTO CLÁSSICO  
ESCALA 1:800



PERFIL TRANSVERSAL  
PK 0+843.6 (GALERIA NORTE)  
LEVANTAMENTO CLÁSSICO  
ESCALA 1:800



PERFIL TRANSVERSAL  
PK 0+745 (GALERIA NORTE)  
LEVANTAMENTO DE RESTITUIÇÃO  
ESCALA 1:800

**LEGENDA**

**LITOESTRATIGRAFIA**

<b>RECENTE</b>	<b>ANTE-ORDOVÍCIO COMPLEXO XISTO GRAUVÁQUICO</b>	
<b>Tv</b> - Terra vegetal	<b>Xe</b> - Xistos estauróliticos (Xistos de Fânzeres)	-Zona de esmagamento/ fraqueza estrutural
<b>At</b> - Aterro	<b>+</b> - Granitóides	-Nível de água medido
<b>Sr</b> - Solo residual	<b>Q2</b> - Quartzos (Filão)	ZG2 - Limite de zona geotécnica
		ZG1 - Limite geológico

**CAMPANHA ACTUAL**

**SONDAGEM** (ST 8): Ensaio de penetração dinâmica SPT, Absorção total, Grau de fracturação (SIMR), Ensaio Lugeon, Grau de alteração (SIMR), Terreno natural, Ensaio Lofranc, Ensaio não realizado devido à rápida e momentânea drenagem, Percentagem de recuperação, Percentagem de RQD ("Rock Quality Designation").

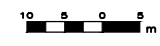
**POÇO DE PROSPECÇÃO** (P1): Terreno natural.

**PERFIL SÍSMICO** (PST 3): Terreno natural, Velocidade de propagação das ondas sísmicas (1200-1900m/s, >1900m/s), Limite de horizonte sísmico.

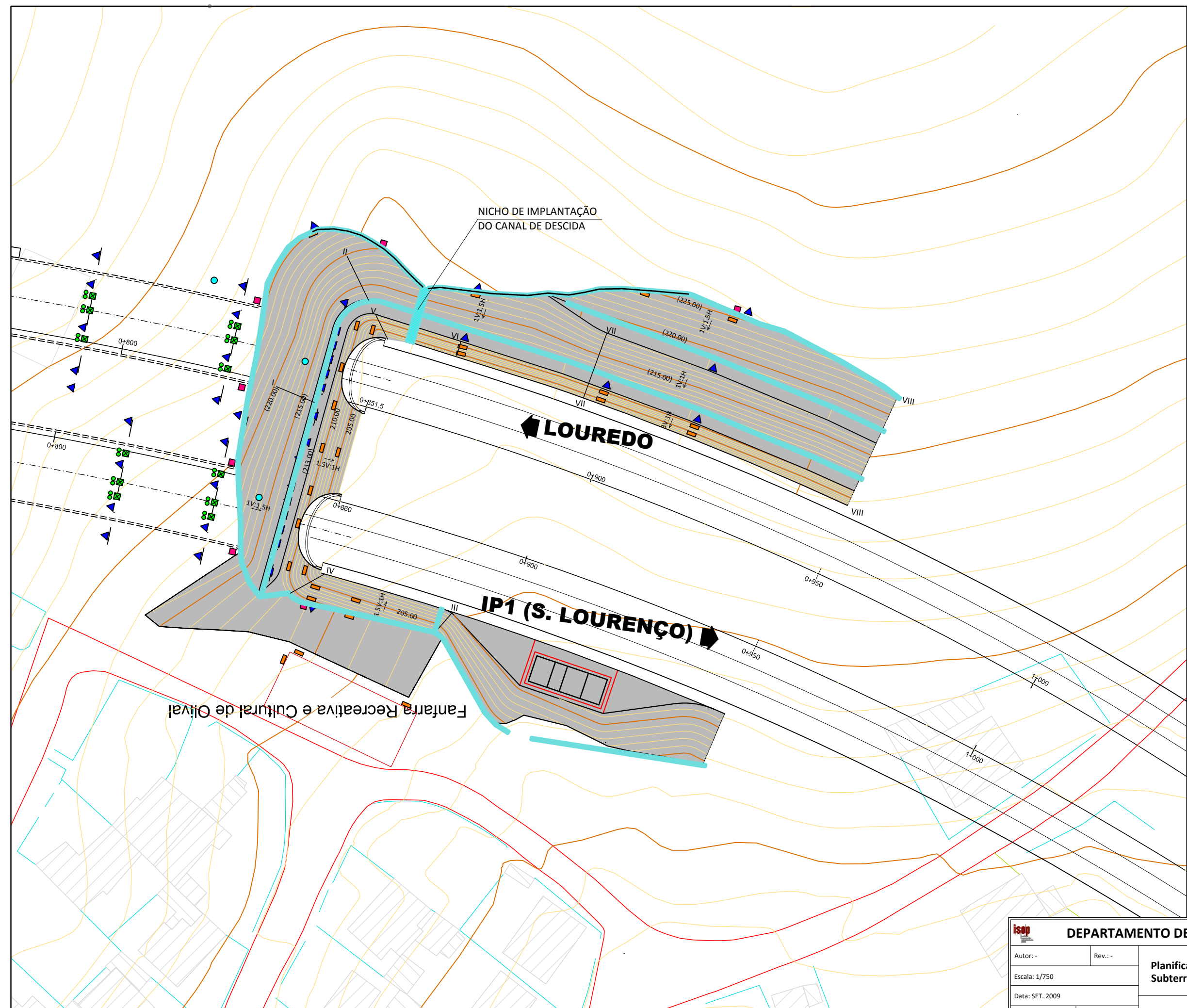
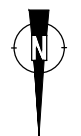
**CAMPANHAS ANTERIORES**

**SONDAGEM** (ST 3): Terreno natural.

**PERFIL SÍSMICO** (PST 3): Terreno natural.



<b>isop</b>		<b>DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA</b>	
Autor: -	Rev.: -	<b>Planificação e Organização de Trabalho em Obras Subterrâneas</b>	
Escala: 1/800	Data: JULHO 2009		
Anexo VI	Folha nº: 6/8	<b>Zonamento Geológico Geotécnico (Perfis Transversais)</b>	
Versão: -		Planta cedida pela DLOEACE - Túnel de Seixo Alvo (modificado e simplificado para efeitos de apresentação deste trabalho)	



Fanfarra Recreativa e Cultural de Olival

**LEGENDA:**

- Betão projectado
- Pedra de Xisto
- Elementos de drenagem - meia cana Ø400
- Elementos de drenagem - vala quadrada 0.40x0.40
- Xistos estaurrolíticos

**INSTRUMENTAÇÃO**

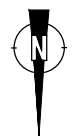
- Ext - Extensómetro multiponto instalado à superfície sobre abóbada do túnel
- M - Marca topográfica de nivelção precisa
- I - Inclínómetro
- Pz - Piezómetro
- A - Alvo
- S - Simógrafo
- Célula de carga, ancoragens definitivas

<b>DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA</b>	
Autor: -	Rev.: -
Escala: 1/750	
Data: SET. 2009	
Anexo VI	Folha nº: 8/8
Versão: -	
<b>Planificação e Organização de Trabalhos em Subterrâneas</b>	
<b>Pormenor Emboquilhamento Poente</b>	
Planta cedida pela DLOEACE - Túnel de Seixo Alvo (modificado e simplificado para efeitos de apresentação deste trabalho)	



**CONCESSÃO DOURO LITORAL**  
**A32 / IC2 - OLIVEIRA DE AZEMÉIS / IP1 (S.LOURENÇO)**  
**TRECHO 3 - LOUREDO / IP1 (S.LOURENÇO)**

Elaborado: ATB, MCS  
 Verificado: RP  
 Aprovado: JPC



Campo de Jogos

BELÃO

LOUREDO

IP1 (S. LOURENÇO)

NICHO DE TUBAGEM DA REDE DE INCÊNDIO

Fabrica de Fiação

**LEGENDA:**

- Betão projectado
- Pedra de Xisto
- Elementos de drenagem - meia cana Ø400
- Elementos de drenagem - vala quadrada 0.40x0.40
- Xistos estaurolíticos

**INSTRUMENTAÇÃO**

- Ext - Extensómetro multiponto instalado à superfície sobre abóbada do túnel
- M - Marca topográfica de nivelção precisa
- I - Inclínómetro
- Pz - Piezómetro
- A - Alvo
- S - Simiógrafo
- Célula de carga, ancoragens definitivas

<b>DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA</b>	
Autor: -	Rev.: -
<b>Planificação e Organização de Trabalhos em Subterrâneas</b>	
Escala: 1/750	
Data: SET. 2009	
Anexo VI	Folha nº: 7/8
<b>Pormenor Emboquilhamento Nascente</b>	
Planta cedida pela DLOEACE - Túnel de Seixo Alvo (modificado e simplificado para efeitos de apresentação deste trabalho)	

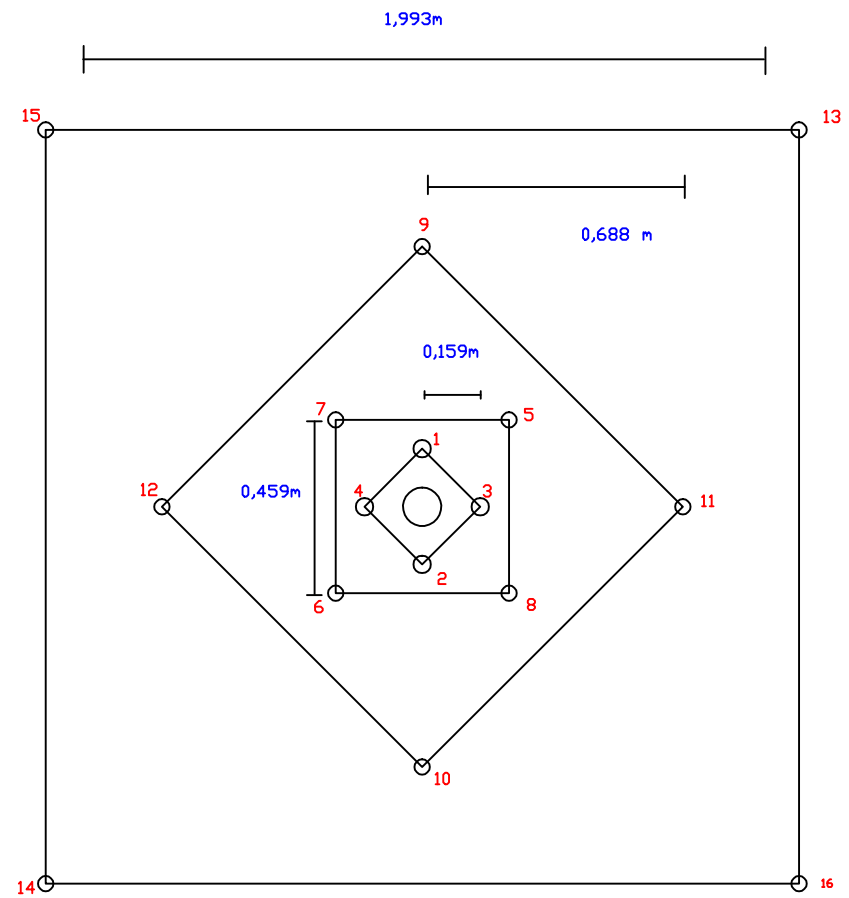


**CONCESSÃO DOURO LITORAL**  
**A32 / IC2 - OLIVEIRA DE AZEMÉIS / IP1 (S.LOURENÇO)**  
**TRECHO 3 - LOUREDO / IP1 (S.LOURENÇO)**

Elaborado: ATB, MCS  
 Verificado: RP  
 Aprovado: JPC

**Anexo 7**  
**Caldeiro**





<b>DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA</b>		
Autor: J. Vilela	Rev.: -	<b>Planificação e Organização de Trabalhos em Obras Subterrâneas</b>
Escala: 1/20		
Data: OUT 2010		<b>Caldeiro de desmonte</b>
Anexo VII	Folha nº: 1/1	
Versões: -		