

A partir do ensaio de cisalhamento consolidado não drenado (CU), o ângulo de resistência ao cisalhamento  $\varphi$  foi determinado como  $\varphi = 33^\circ$  enquanto a coesão foi determinada como  $c = 42kPa$ .

De acordo com a correlação empírica proposta por Stroud (1974), para um índice de plasticidade igual a  $PI = 15$  e um valor representativo  $N_{SPT} = 15$  estima-se que  $c_u/N_{SPT} = 6.5e$ , portanto, a resistência ao cisalhamento não drenada para a Unidade Geotécnica M(ag)b é igual a  $c_u = 90kPa$ . Do mesmo modo, segundo Terzaghi e Peck (1967), para um valor representativo  $N_{SPT} = 15$  a resistência ao cisalhamento não drenada para argilas pode ser obtida como  $c_u = 6.25 \times N_{SPT} \cong 94kPa$ . Finalmente, com base em Sowers (1979), a resistência ao cisalhamento não drenada para argilas de plasticidade média é aproximada como  $c_u = 7.5 \times N_{SPT} \cong 112kPa$  enquanto a resistência ao corte não drenada para argilas de baixa plasticidade é obtida como  $c_u = 3.75 \times N_{SPT} \cong 56kPa$ .

Baguelin et al. (1978) propuseram uma relação empírica entre a tensão radial máxima ( $P_l$ ), medida durante os ensaios de pressiómetro in situ, e a resistência ao cisalhamento não drenada ( $c_u$ ), como:

$$c_u(kPa) = 0.67 \times Pl^{0.75}$$

Assim, para valores de  $Pl$  que variam entre 0,30MPa e 1,30MPa, a resistência ao cisalhamento não drenado é estimada em  $c_u \cong 47 - 142kPa$  com um valor médio de  $c_u = 89kPa$ .

Tendo em conta o acima exposto, a gama de valores para os parâmetros peso unitário, coesão efetiva, ângulo efetivo de resistência ao corte e resistência ao corte não drenada é estimada da seguinte forma

- peso unitário,  $\gamma = 18 - 20kN/m^3$
- coesão efetiva,  $c' = 5 - 10kPa$
- ângulo efetivo de resistência ao corte,  $\varphi' = 26 - 30^\circ$
- resistência ao cisalhamento não drenado,  $c_u = 60 - 80kPa$

Na figura seguinte, o intervalo adotado para a resistência ao corte não drenada,  $c_u$  para a Unidade Geotécnica M(ag)b é comparada com dados históricos de ensaios triaxiais de laboratório e de pressiómetros in-situ realizados nos barros dos Prazeres da área da Grande Lisboa (Laranjo e Fernandes, 2021). Os valores considerados  $c_u$  Os valores considerados, para as profundidades a que a Unidade Geotécnica M(ag)b é encontrada no local do projeto, são consistentes com os dados experimentais.

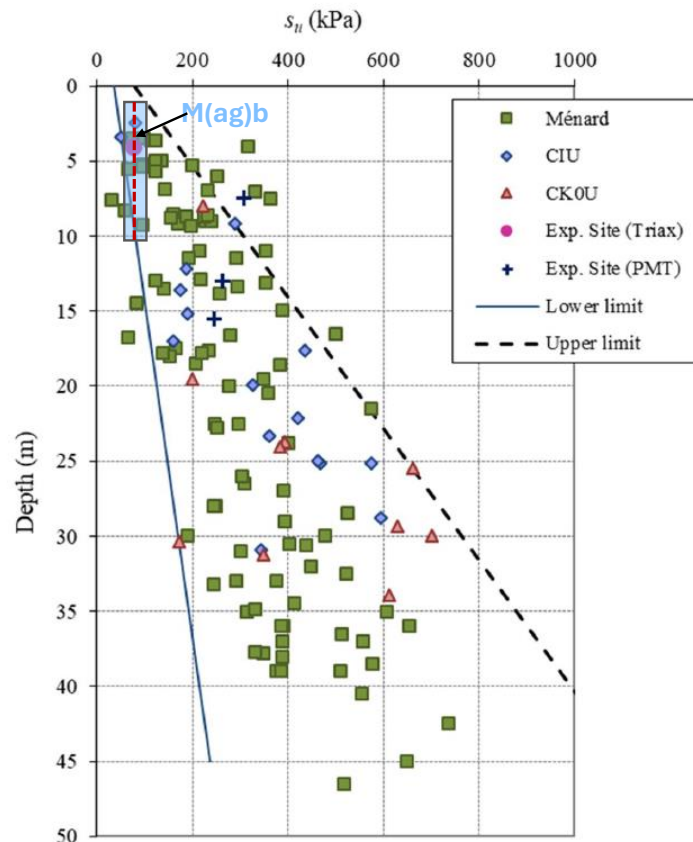


Figura 8 – Unidade Geotécnica M(ag)b – Comparação da resistência ao cisalhamento não drenada adotada,  $c_u$ , com os dados experimentais de ensaios triaxiais e pressiométricos in situ (Laranjo e Fernandes, 2021)

Para a Unidade Geotécnica M(ag)b, estima-se que o coeficiente de Poisson  $\nu$ , varia entre 0,33 e 0,37. Assim, o rácio de Poisson é estimado como  $\nu = 0.35$ . De acordo com a teoria da elasticidade, o módulo do edómetro ( $E_S$ ), está relacionado com o módulo de elasticidade ( $E$ ), como:

$$E_S = \frac{(1 - \nu)}{(1 + \nu) \cdot (1 - 2\nu)} \cdot E'$$

Assim, para um valor do coeficiente de Poisson  $\nu = 0.35$  reduz-se a  $E_S = 1,60 \cdot E'$ .

De acordo com Stroud (1989), para materiais do tipo argila, uma aproximação razoável é  $E' = 0,9 \cdot N_{SPT}$ . Assim, o módulo de elasticidade ( $E$ ) para a Unidade Geotécnica M(ag)b é igual a  $E' = 13.5MPa$ . Consequentemente, o módulo do edómetro é  $E_S = 21.6MPa$ .

Tendo em conta o que precede, o módulo do edómetro da Unidade Geotécnica M(ag)b é estimado como  $E_S = 16MPa - 32MPa$  e o módulo de elasticidade é estimado como  $E' = 10MPa - 20MPa$ .

Não foram efetuados ensaios de permeabilidade in-situ às profundidades a que a Unidade Geotécnica M(ag)b foi encontrada nas sondagens executadas. Assim, no que respeita ao coeficiente de permeabilidade ( $k$ ), de acordo com o Manual de Terra (3<sup>rd</sup> Edition, Figura 1-32, p. 48), para um solo classificado como CL, um valor representativo típico é  $k \approx 10^{-8}$  m/seg.

Por conseguinte, a tabela seguinte resume a gama dos parâmetros geotécnicos de projeto propostos.

Tabela 25 - Unidade Geotécnica M(ag)b – gama de valores dos parâmetros geotécnicos de projeto

Parâmetro de projeto	Intervalo de valores
Peso unitário, $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	18 – 20
Coesão efectiva, $c'$ (kPa)	5 – 10
Ângulo de fricção efetivo, $\phi'$ (°)	26 – 30
Módulo de elasticidade, $E$ (MPa)	10 – 20
Resistência ao cisalhamento não drenada, $c_u$ (kPa)	60 – 80
Rácio de Poisson, $\nu$	0.35
Módulo do edómetro, $E_s$ (MPa)	16 – 32
Coefficiente de pressão da terra em repouso, $K_0$	0.5
Coefficiente de permeabilidade, $k$ (m/seg.)	$1.0 \times 10^{-8}$

## 5.5 Unidade Geotécnica M(ag)a

A Unidade Geotécnica M(ag)a é constituída por argilas e margas argilosas, de cor cinzenta acastanhada, duras a muito duras, com concreções carbonatadas e por vezes fragmentos basálticos. De acordo com os resultados dos dados disponíveis dos ensaios laboratoriais e in situ, a Unidade Geotécnica M(ag)a, é caracterizada pelas seguintes propriedades físicas e mecânicas.

Tabela 26 - Unidade Geotécnica M(ag)a – Propriedades físicas e mecânicas

Parâmetro	Contagem	Valor mínimo	Valor máximo	Valor médio	Desvio padrão
$N_{SPT}$	18	31	50	47	7
$k$ (m/seg.)	7	$1.2E-08$	$6.1E-05$	$8.82E-07$	$2.3E-05$
Cascalho (%)	4	9	33	26	11
Areia (%)	4	7	18	12	5
Fins (%)	4	53	80	63	12
Silte (%)	4	32	52	40	9
Argila (%)	4	14	28	23	7
Limites de Atterberg	LL (%)	4	28	38	4
	PL (%)	4	15	19	2
	PI (%)	4	11	20	4
Teor de água, $w$ (%)	1	24	24	24	0

Parâmetro		Contagem	Valor mínimo	Valor máximo	Valor médio	Desvio padrão
Peso unitário	húmido, $\gamma_s$ ( $\text{kN/m}^3$ )	1	19.6	19.6	19.6	0.0
	Seco, $\gamma_d$ ( $\text{kN/m}^3$ )	1	15.8	15.8	15.8	0.0
Gravidade específica, $G_s$		4	2.68	2.74	2.70	0.03
Ensaio do manómetro	$E_M$ (Mpa)	2	11.60	12.20	11.90	0.30
	$PI$ (Mpa)	2	0.67	1.41	1.04	0.3.7
	$E_M / PI$	2	8.20	18.30	13.25	5.05
Ensaio de compressão não confinada	$q_u$ (kPa)	3	5949	7067	6550	564
	$E$ (MPa)	3	519	806	680	147
Ensaio de cisalhamento (CU)	$\phi$ (deg)	1	30.0	30.0	30.0	0.0
	$c$ (kPa)	1	13.0	13.0	13.0	0.0
RQD (%)		6	18	49	37	14

Com base nos valores médios de granulometria, o material da Unidade Geotécnica M(ag)a é classificado de acordo com a USCS como argila magra cascalhenta (CL). Espera-se que o comportamento geomecânico da unidade geotécnica específica seja o de um material de solo coesivo. A tabela seguinte apresenta parâmetros geotécnicos baseados na literatura internacional para materiais semelhantes aos da Unidade Geotécnica M(ag)a. As referências bibliográficas referidas encontram-se no Anexo A.

Tabela 27 - Unidade Geotécnica M(ag)a - parâmetros geotécnicos baseados na literatura internacional

Referência	Tipo de solo	Gama de parâmetros geotécnicos
Mecânica dos Solos MANUAL DE DESENHO 7.02, (NAVFAC)	CL	$\phi' = 28^\circ$ , $c' = 13\text{kPa}$
Projeto de Estacas e Prática de Construção, Quarta Edição, M. J. Tomlinson, Propriedades dos Materiais	Argila rígida a muito rígida	$\gamma_s = 20-23\text{kN/m}^3$
		$c_u = 150-300\text{kPa}$
Análise e projeto de fundações, J.E. Bowles, 5 <sup>th</sup> Edition	Argila dura	$\leq E = 50-100\text{MPa}$

Foram realizados dois (2) ensaios de pressiómetro na Unidade Geotécnica M(ag)b, segundo os quais se verificou que o módulo de pressiómetro ( $E_M$ ) varia entre 11,60MPa e 12,2MPa com um valor médio de 11,90MPa. A tensão radial máxima ( $PI$ ) varia entre 0,67MPa e 1,41MPa, o que corresponde a argilas duras e margas, com um valor médio de 1,04MPa. O fator reológico de Menard é igual a  $\alpha = 1/2$  e, portanto, o valor médio do módulo de deformação ( $E_s$ ) é igual a 23,80MPa. Note-se que os valores do edómetro acima estimados são substancialmente inferiores aos previstos no terreno para a mesma unidade geotécnica.

No âmbito da Unidade Geotécnica M(ag)a, foram efetuados dezoito (18) ensaios de penetração normalizada. Treze (13) destes ensaios registaram recusa (R). A figura seguinte mostra a variação do SPT com a profundidade.

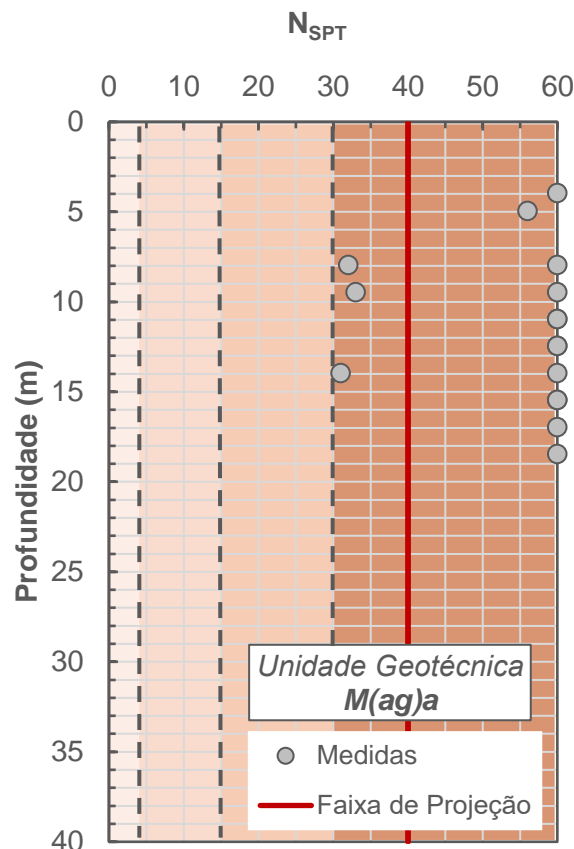


Figura 9 - Unidade Geotécnica M(ag)a - Variação de  $N_{SPT}$  com a profundidade

De acordo com o acima exposto, é adotado um valor representativo e conservador do SPT de  $N_{SPT} = 40$  para utilização nas correlações empíricas associadas à Unidade Geotécnica M(ag)a.

De acordo com Mitchell (1976),  $\sin \varphi' = 0.8 - 0.094 \cdot \text{Em } PI$ , pelo que para  $PI = 15$  o ângulo efetivo de resistência ao corte é  $\varphi' = 33.1^\circ$ .

A partir do ensaio de cisalhamento consolidado não drenado (CU), o ângulo de resistência ao cisalhamento  $\varphi$  foi determinado como  $\varphi = 30^\circ$  enquanto a coesão foi determinada como  $c = 13kPa$ .

De acordo com a correlação empírica proposta por Stroud (1974), para um índice de plasticidade igual a  $PI = 15$  e um valor representativo  $N_{SPT} = 40$  estima-se que  $c_u/N_{SPT} = 6.5$  e, portanto, a resistência ao cisalhamento não drenada para a Unidade Geotécnica M(ag)a é igual a  $c_u = 260kPa$ . Da mesma forma, de acordo com Terzaghi e Peck (1967), para um valor representativo  $N_{SPT} = 40$  a resistência ao cisalhamento não drenada para argilas pode ser obtida como  $c_u = 6.25 \times N_{SPT} \cong 250kPa$ . Finalmente, com base em Sowers (1979), a resistência ao cisalhamento não drenada para argilas de plasticidade média é aproximada como  $c_u = 7.5 \times N_{SPT} \cong 300kPa$  enquanto a resistência ao corte não drenada para argilas de baixa plasticidade é obtida como  $c_u = 3.75 \times N_{SPT} \cong 150kPa$ .

Baguelin et al. (1978) propuseram uma relação empírica entre a tensão radial máxima ( $PI$ ), medida durante os ensaios de pressiómetro in situ, e a resistência ao cisalhamento não drenada ( $c_u$ ), como:

$$c_u(kPa) = 0.67 \times PI^{0.75}$$

Assim, para valores de  $P$  que variam entre 0,67MPa e 1,41MPa, a resistência ao cisalhamento não drenado é estimada em  $c_u \cong 81 - 155kPa$  com um valor médio de  $c_u = 108kPa$ .

A partir dos três (3) ensaios de compressão não confinada, a resistência ao cisalhamento não drenada ( $c_u = q_u / 2$ ) variou entre 2975kPa e 3534kPa, com um valor médio de 3275kPa. Verifica-se que os valores de resistência ao corte não drenado resultantes dos ensaios de compressão não confinada apresentam valores mais elevados, possivelmente devido ao facto de os ensaios terem sido realizados em amostras de marga do tipo rocha mais competente. No entanto, estima-se, de forma conservadora, que as características da resistência ao corte não drenada terão valores inferiores aos calculados a partir dos ensaios de compressão não confinada.

Tendo em conta o acima exposto, a gama de valores para os parâmetros peso unitário, coesão efectiva, ângulo efetivo de resistência ao corte e resistência ao corte não drenada é estimada da seguinte forma

- peso unitário,  $\gamma = 20 - 21kN/m^3$
- coesão efectiva,  $c' = 15 - 30kPa$
- ângulo efetivo de resistência ao corte,  $\varphi' = 28 - 32^\circ$
- resistência ao cisalhamento não drenado,  $c_u = 250 - 350kPa$

Na Figura 10, o intervalo adotado para a resistência ao cisalhamento não drenado,  $c_u$  para a Unidade Geotécnica M(ag)a é comparada com os dados históricos de ensaios triaxiais de laboratório e de pressiómetros in-situ realizados nos Prazeres da área da Grande Lisboa (Laranjo e Fernandes, 2021). Os valores considerados  $c_u$ . Os valores considerados, para as profundidades a que a Unidade Geotécnica M(ag)a é encontrada no local do projeto, são consistentes com os dados experimentais.

Para a Unidade Geotécnica M(ag)a, estima-se que o coeficiente de Poisson  $\nu$ , varia entre 0,25 e 0,35. Assim, o rácio de Poisson é estimado como  $\nu = 0.30$ . De acordo com a teoria da elasticidade, o módulo do edómetro ( $E_S$ ), está relacionado com o módulo de elasticidade ( $E$ ), como:

$$E_S = \frac{(1 - \nu)}{(1 + \nu) \cdot (1 - 2\nu)} \cdot E'$$

Assim, para um valor do coeficiente de Poisson  $\nu = 0.30$  reduz-se a  $E_S = 1,35 \cdot E'$ .

De acordo com Stroud (1989), para materiais do tipo argila, uma aproximação razoável é  $E' = 0,9 \cdot N_{SPT}$ . Assim, o módulo de elasticidade ( $E$ ) para a Unidade Geotécnica M(ag)a é igual a  $E' = 36MPa$ . Consequentemente, o módulo do edómetro é  $E_S = 48.6MPa$ .

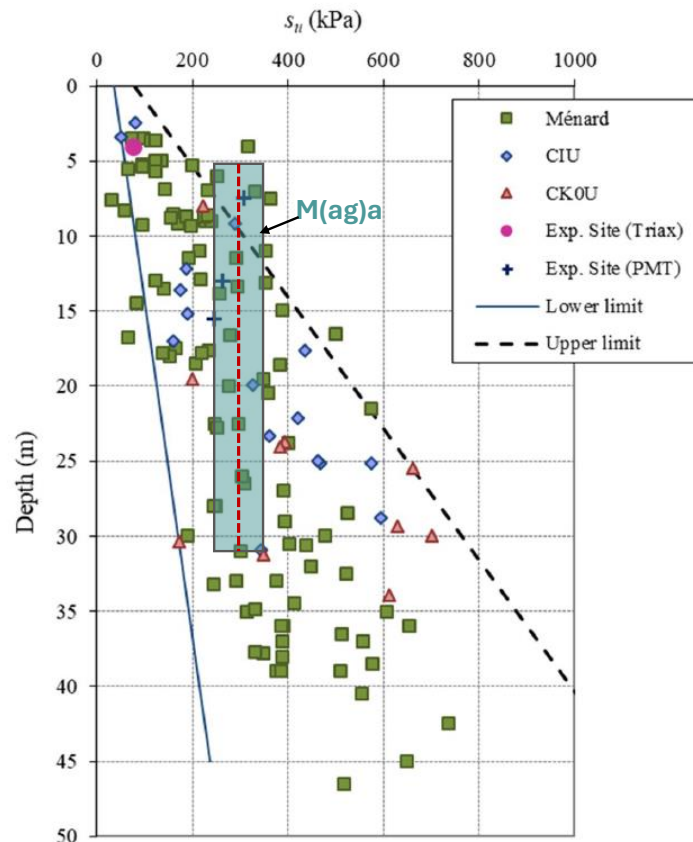


Figura 10 – Unidade Geotécnica M(ag)a – Comparação da resistência ao cisalhamento não drenada adoptada,  $c_u$ , com os dados experimentais de ensaios triaxiais e pressiométricos in situ (Laranjo e Fernandes, 2021)

Finalmente, dos três (3) ensaios de compressão não confinada, o módulo de elasticidade ( $E$ ) variou entre 519MPa e 806MPa, com um valor médio de 680MPa. Verifica-se que os valores do módulo de elasticidade resultantes dos ensaios de compressão não confinada apresentam valores mais elevados, possivelmente devido ao facto de os ensaios terem sido realizados em amostras de margá do tipo rocha mais competente. Assim, tendo em conta o exposto, o módulo do edómetro para a Unidade Geotécnica M(ag)a, é estimado em  $E_S = 40MPa - 80MPa$  e o módulo de elasticidade é estimado em  $E' = 30MPa - 60MPa$ .

Foram realizados sete (7) ensaios de permeabilidade in-situ nas profundidades em que a Unidade Geotécnica M(ag)a foi encontrada nas sondagens executadas. Nestes ensaios, a permeabilidade variou entre  $1,2 \times 10^{-8}$  m/seg e  $6,1 \times 10^{-5}$  m/seg, com um valor mediano de  $8,8 \times 10^{-7}$  m/seg. Assim, é adoptado um valor representativo de  $k \approx 5 \times 10^{-7}$  m/seg para a Unidade Geotécnica M(ag)a.

Por conseguinte, a tabela seguinte resume a gama dos parâmetros geotécnicos de projeto propostos.



Tabela 28 – Unidade Geotécnica M(ag)a – gama de valores para os parâmetros geotécnicos de projeto

Parâmetro de projeto	Intervalo de valores
Peso unitário, $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	20 – 21
Coesão efectiva, $c'$ (kPa)	15 – 30
Ângulo de fricção efetivo, $\phi'$ (°)	28 – 32
Módulo de elasticidade, E (MPa)	30 – 60
Resistência ao corte não drenada, $c_u$ (kPa)	250 – 350
Rácio de Poisson, $\nu$	0.30
Módulo do edómetro, $E_s$ (MPa)	40 – 80
Coefficiente de pressão da terra em repouso, $K_0$	0.7 – 1.0
Coefficiente de permeabilidade, $k$ (m/seg.)	$5.0 \times 10^{-7}$

## 5.6 Unidade Geotécnica $\beta_{W5;W4/5}$

A Unidade Geotécnica  $\beta_{W5;W4/5}$  é constituída por BASALTO cinzento-escuro, com abundantes veios de calcite, moderadamente a fortemente meteorizado, fortemente fraturado. De acordo com os resultados dos dados disponíveis dos ensaios laboratoriais e in situ, a Unidade Geotécnica  $\beta_{W5;W4/5}$ , é caracterizada pelas seguintes propriedades físicas e mecânicas.

Tabela 29 – Unidade Geotécnica  $\beta_{W5;W4/5}$  – Propriedades físicas e mecânicas

Parâmetro	Contagem	Valor mínimo	Valor máximo	Valor médio	Desvio padrão	
$N_{SPT}$	2	50	50	50	0	
$k$ (m/seg.)	3	1.7E-07	8.9E-07	5.95E-07	3.6E-07	
Teor de água, $w$ (%)	6	5	11	7	2	
Peso unitário	Seco, $\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	4	20.5	26.3	23.5	2.5
*Ensaio de compressão uniaxial	$\sigma_{ci}$ (kPa)	6	2600	22900	9880	8642
	E (MPa)	6	600	3100	1580	1071
	$\nu$	5	0.16	0.56	0.32	0.16
Ensaio de resistência à tração por rutura (brasileiro)	$\epsilon_a$ (%)	7	0.24	6.30	3.18	1.97
	$\epsilon_r$ (%)	7	0.06	3.04	1.13	0.94
	$\gamma_s$ (kN/m <sup>3</sup> )	5	18.10	25.30	21.65	2.66
	$\sigma_t$ (MPa)	5	0.40	4.50	1.98	1.55
Teste de carga pontual	Axial $I_s(50)$ (MPa)	4	0.50	1.20	0.75	0.33



Parâmetro	Contagem	Valor mínimo	Valor máximo	Valor médio	Desvio padrão
Irregular $I_{s(50)}$ (MPa)	1	0.70	0.70	0.70	0.00
RQD (%)	17	11	83	43	21

\*Um ensaio de resistência à compressão uniaxial de uma rocha, resultando em  $\sigma_{ci} = 1,3\text{MPa}$  e  $E_i = 0,2\text{GPa}$ , foi excluído por não ser representativo.

De referir que foram realizados um total de dois (2) ensaios de penetração padrão (SPT) nesta unidade geotécnica, tendo ambos sido avaliados como Recusa (R). Relativamente ao coeficiente de permeabilidade (k), nos três (3) ensaios de permeabilidade in-situ realizados na Unidade Geotécnica  $\beta_{W5;W4/5}$ , o coeficiente de permeabilidade varia entre  $1,7 \times 10^{-7}$  m/seg e  $8,9 \times 10^{-7}$  m/seg, com um valor mediano de  $k \approx 5,95 \times 10^{-7}$  m/seg.

Para determinar os parâmetros de resistência geotécnica da Unidade Geotécnica  $\beta_{W5;W4/5}$  é utilizado o sistema de classificação de maciços rochosos do Índice de Resistência Geológica (GSI) (Marinos & Hoek 2000). O referido sistema de classificação é utilizado para categorizar o maciço rochoso com base no grau de meteorização das discontinuidades e no grau de fragmentação/desintegração do maciço rochoso. As Figuras seguintes apresentam a variação da Designação da Qualidade da Rocha (RQD) (Deere 1963) e o Grau de Intemperismo para a Unidade Geotécnica  $\beta_{W5;W4/5}$ .

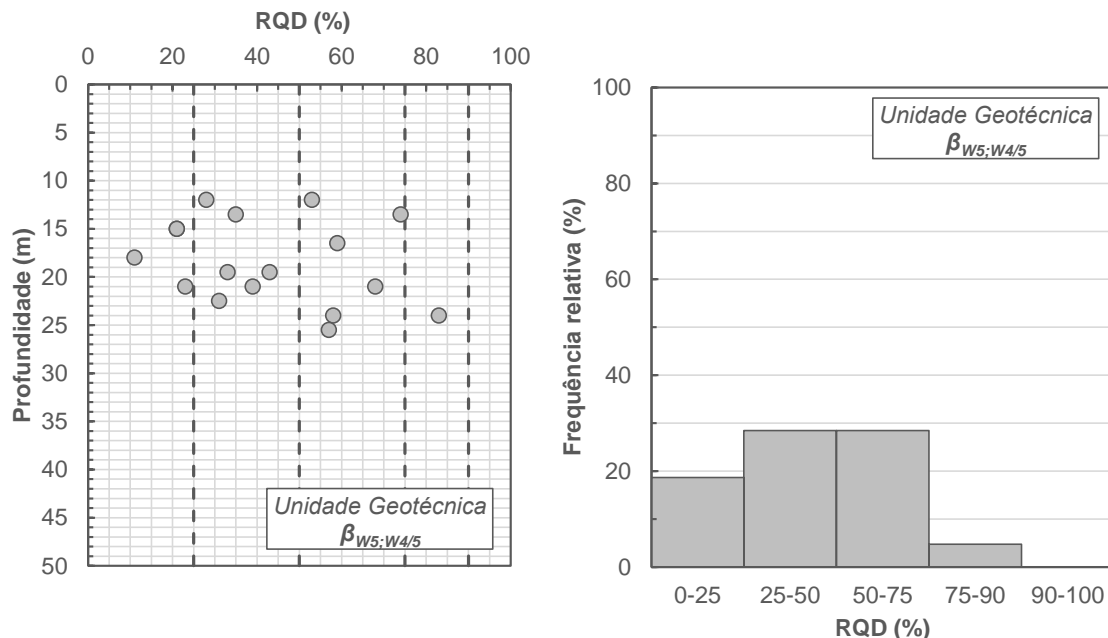


Figura 11 – Unidade Geotécnica  $\beta_{W5;W4/5}$  – distribuição em função da profundidade e frequência relativa dos valores de RQD registados

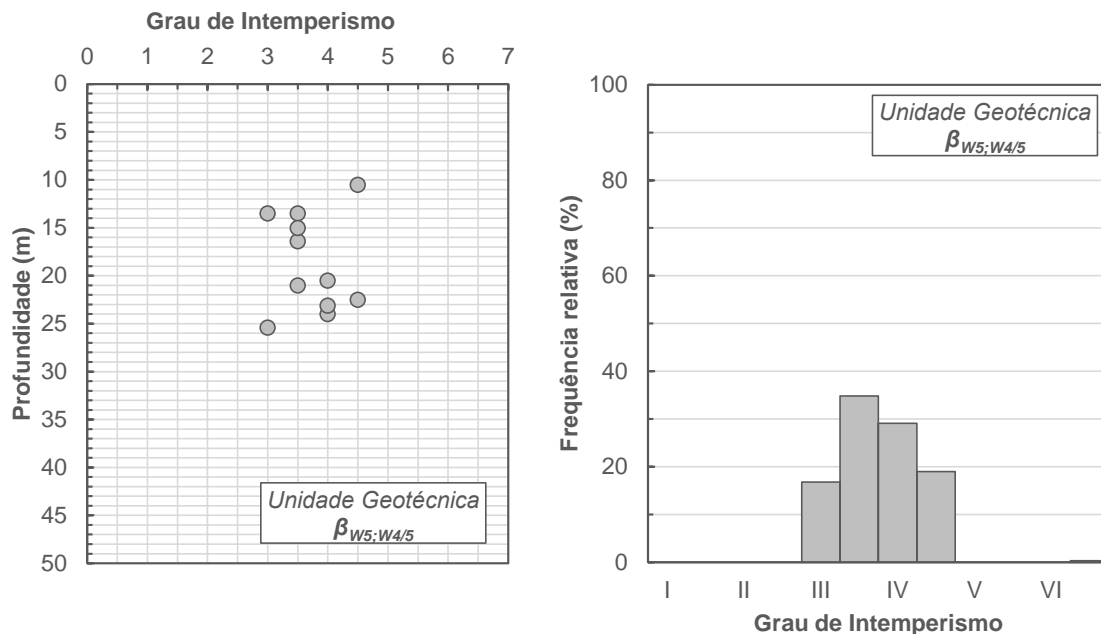


Figura 12 – Unidade Geotécnica  $\beta_{W5;W4/5}$  – distribuição em função da profundidade e frequência relativa do Grau de Intemperismo registado

Com base no exposto, para a avaliação dos parâmetros de resistência geotécnica da formação de basaltos da Unidade Geotécnica  $\beta_{W5;W4/5}$ , é adotado um intervalo de valores de  $GSI=20 - 35$ , como uma estimativa conservadora representativa, conforme ilustrado na Figura abaixo.

A avaliação das características de resistência da rocha intacta pode ser efetuada com base nos resultados dos ensaios laboratoriais de carga pontual ( $I_{S(50)}$ ) com base na seguinte relação, frequentemente adoptada na literatura internacional:

$$\sigma_{c,i} = K_c \times I_{S(50)}$$

onde,  $K_c$  é um coeficiente que depende do tipo de rocha (sedimentar, metamórfica), bem como da sua resistência. Para formações rochosas caracterizadas por valores baixos de  $I_{S(50)}$  ( $I_{S(50)} < 2$ ), o valor de  $K_c$  é  $K_c = 13$  para formações rochosas com valores intermédios de  $I_{S(50)}$  ( $2 < I_{S(50)} < 5$ ), pode assumir-se um valor de  $K_c = 20$ , enquanto que para formações rochosas associadas a valores elevados de  $I_{S(50)}$  ( $I_{S(50)} > 5$ ), adopta-se um valor de  $K_c = 28$  (Tsiambaos e Sabatakakis, 2004).

Por conseguinte, para a Unidade Geotécnica  $\beta_{W5;W4/5}$ , e com base nos resultados da campanha de ensaios de carga pontual:

$$\sigma_{c,i} = 13 \times (0.50 \div 1.20)MPa = 6.5 \div 15.6MPa$$

Além disso, com base em seis (6) ensaios de compressão uniaxial realizados em amostras da Unidade Geotécnica  $\beta_{W5;W4/5}$ , a resistência à compressão uniaxial da rocha intacta ( $\sigma_{c,i}$ ) foi estimada entre 2,6MPa e 22,9MPa, com um valor médio de 9,88MPa. A figura seguinte ilustra a distribuição em profundidade dos valores medidos e estimados em laboratório da resistência à compressão uniaxial da rocha intacta ( $\sigma_{c,i}$ ).

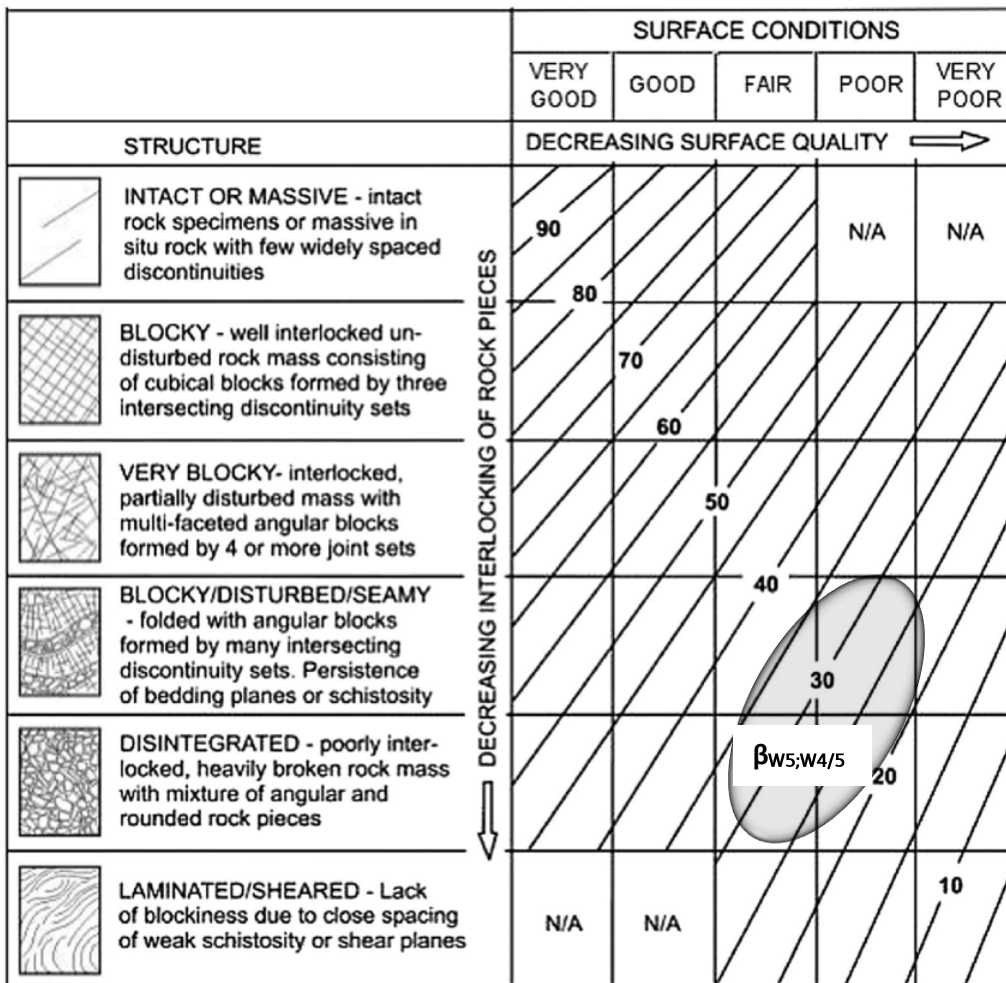


Figura 13 - Unidade Geotécnica  $\beta_{W5;W4/5}$  - gama de valores representativos de GSI

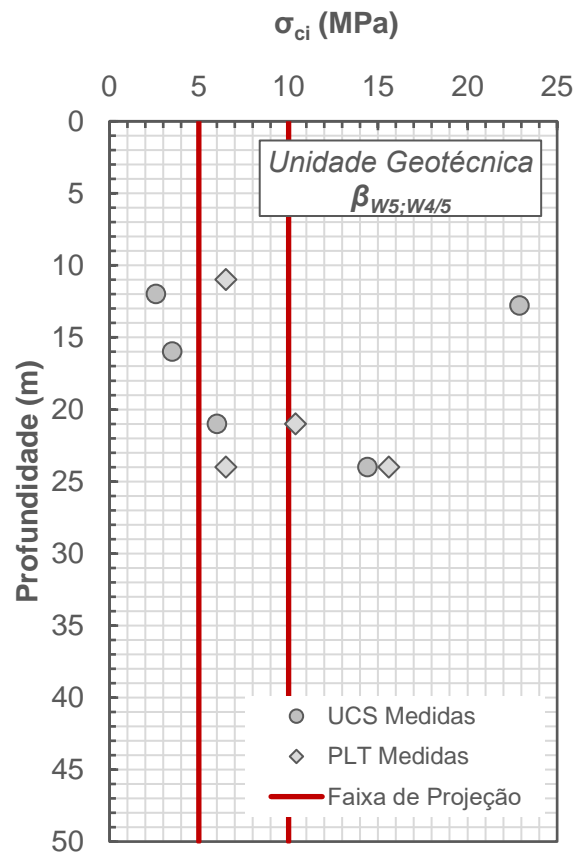


Figura 14 – Unidade Geotécnica  $\beta_{W5;W4/5}$  – Variação de  $\sigma_{c,i}$  com a profundidade

Assim, tendo em conta o exposto, o intervalo de valores  $\sigma_{c,i}$  que se considera representativa para a Unidade Geotécnica  $\beta_{W5;W4/5}$ , é:

$$\sigma_{c,i} = 5 - 10MPa$$

Posteriormente, para a determinação dos parâmetros de resistência e deformabilidade do maciço rochoso da Unidade Geotécnica  $\beta_{W5;W4/5}$ , foi utilizado o critério de rotura de Hoek-Brown (Hoek et al., 2002). Para o efeito, foi utilizado o software RocData (Rocscience Inc.) para determinar os parâmetros de resistência de Mohr-Coulomb equivalentes ( $c'$ ,  $\phi'$ ). Os dados de entrada utilizados no programa RocData para determinar os parâmetros de resistência ao cisalhamento são:

- Coeficiente de material,  $m_i$ . Com base na literatura internacional, os valores propostos para os basaltos são  $m_i = 25 \pm 5$ . Por conseguinte, para os cálculos, o valor representativo é fixado em  $m_i = 25$ .
- Resistência à compressão uniaxial de rocha intacta,  $\sigma_{c,i}$ . Como mostrado acima, foi estimada como  $\sigma_{c,i} = 5 - 10MPa$ .
- Índice de resistência geológica (GSI). Como indicado acima, foi estimado como  $GSI = 20 - 35$ .
- Módulo de elasticidade da rocha intacta,  $E_i$ . Com base nos resultados dos ensaios de compressão uniaxial efectuados em amostras da Unidade Geotécnica  $\beta_{W5;W4/5}$ , os valores de E variam entre 600MPa e 3100MPa, com um valor médio de  $E_i = 1580MPa$ . Adicionalmente, o módulo de elasticidade da rocha intacta ( $E_i$ ) pode ser aproximado

utilizando o coeficiente empírico  $MR$ , com base na tabela de referência relevante incorporada no software RocData, e de acordo com a relação  $E_i = \sigma_{c,i} \times MR$ . Com base na tabela de referência do RocData, para os basaltos, é adotado um valor de  $MR = 350$ , pelo que  $E_i = 2625MPa$ .

- Fator de perturbação do maciço rochoso,  $D$ . Este parâmetro está relacionado com o relaxamento do maciço rochoso, devido à sua perturbação durante a escavação. De acordo com a tabela correspondente do programa RocData, foi considerado um valor representativo de  $D = 0.30$  para a parte subterrânea do túnel. Além disso, para delimitar o possível comportamento geomecânico do maciço rochoso, foi também considerado um fator de perturbação de  $D = 0.0$ , como representativo do maciço rochoso a uma distância da escavação subterrânea. De acordo com Hoek e Brown (2019), considerando que uma escavação de túnel cuidadosamente projetada e executada é alcançada, o valor mais alto do fator de perturbação ( $D = 0.30$ ) pode ser aplicado apenas a uma zona que se estende por 2-3 m em torno da escavação do túnel.
- O cálculo dos parâmetros de dimensionamento geotécnico foi efetuado através da aplicação "túnel", tal como utilizada no RocData, e uma sobrecarga média de  $h = 15m$ .

Considerando os parâmetros de entrada acima referidos, os resultados obtidos com base na aplicação do critério de rotura de Hoek-Brown são apresentados na tabela seguinte.

Tabela 30 – Unidade Geotécnica  $\beta_{W5;W4/5}$  – Aplicação do critério de rotura de Hoek-Brown (RocData, Rocscience Inc.)

Parâmetro		Valor			
Dados de entrada	Método de aplicação	Túneis (h = 15m)			
	Resistência à compressão uniaxial da rocha intacta, $\sigma_{ci}$ (MPa)	7.5			
	Coeficiente $m_i$	25			
	Módulo de elasticidade da rocha intacta, $E_i$ (GPa)	2.625			
	Fator de perturbação do maciço rochoso, $D$	0.0		0.3	
	GSI	20	35	20	35
Dados de saída	Coesão, $c$ (kPa)	52	75	44	65
	Ângulo de fricção, $\phi$ (°)	47	53	43	50
	Resistência à compressão uniaxial do maciço rochoso, $\sigma_{cm}$ (MPa)	1.00	1.49	0.76	1.20
	Módulo de elasticidade do maciço rochoso, $E_m$ (MPa)	120	298	91	195

Por conseguinte, a tabela seguinte resume a gama dos parâmetros geotécnicos de projeto propostos.

Tabela 31 – Unidade Geotécnica  $\beta_{W5;W4/5}$  – gama de valores para os parâmetros geotécnicos de projeto

Parâmetro de projeto	Intervalo de valores	
	D = 0.0	D = 0.30
Peso unitário, $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	23 – 24	
Coesão efectiva, $c'$ (kPa)	50 – 70	40 – 65
Ângulo de fricção efetivo, $\phi'$ (°)	45 – 50	40 – 45
Módulo de elasticidade do maciço rochoso, $E_{rm}$ (MPa)	150 – 250	100 – 200
Rácio de Poisson, $\nu$	0.25	
Coefficiente de pressão da terra em repouso, $K_0$	0.7 – 1.0	
Coefficiente de permeabilidade, $k$ (m/seg.)	$1,0 \times 10^{-7}$ – $1,0 \times 10^{-6}$	

## 5.7 Unidade Geotécnica $\beta$

A Unidade Geotécnica  $\beta$  é constituída por BASALTO cinzento-escuro, com abundantes veios de calcite, ligeira a moderadamente meteorizado, moderadamente fraturado. De acordo com os resultados dos dados disponíveis dos ensaios laboratoriais e in situ, a Unidade Geotécnica  $\beta$ , é caracterizada pelas seguintes propriedades físicas e mecânicas. É de notar que a Unidade Geotécnica  $\beta$  foi encontrada apenas na sondagem SC17-pz, à profundidade 21.0-28.5m.

Tabela 32 – Unidade Geotécnica  $\beta$  – Propriedades físicas e mecânicas

Parâmetro		Contagem	Valor mínimo	Valor máximo	Valor médio	Desvio padrão
Teor de água, $w$ (%)		1	5	5	5	0
Peso unitário	Seco, $\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	1	23.4	23.4	23.4	0.0
	$\sigma_{ci}$ (kPa)	1	5300	5300	5300	0
Ensaio de compressão uniaxial	$E$ (MPa)	1	2500	2500	2500	0
	$\nu$	1	0.31	0.31	0.31	0.00
RQD (%)		5	63	79	72	8

Uma vez que não foram realizados ensaios de permeabilidade in situ na Unidade Geotécnica  $\beta$ , estima-se que o coeficiente de permeabilidade ( $k$ ) seja ligeiramente inferior ao valor adotado para a Unidade Geotécnica  $\beta_{W5;W4/5}$  devido ao menor grau de fracturação, ou seja, o coeficiente de permeabilidade varia entre  $5,0 \times 10^{-8}$  m/seg e  $5,0 \times 10^{-7}$  m/seg.

Para determinar os parâmetros de resistência geotécnica da Unidade Geotécnica  $\beta$ , é utilizado o sistema de classificação de maciços rochosos do Índice de Resistência Geológica (GSI) (Marinos & Hoek 2000). A figura seguinte apresenta a variação da designação da qualidade da rocha (RQD) (Deere 1963) para a Unidade Geotécnica  $\beta$ .

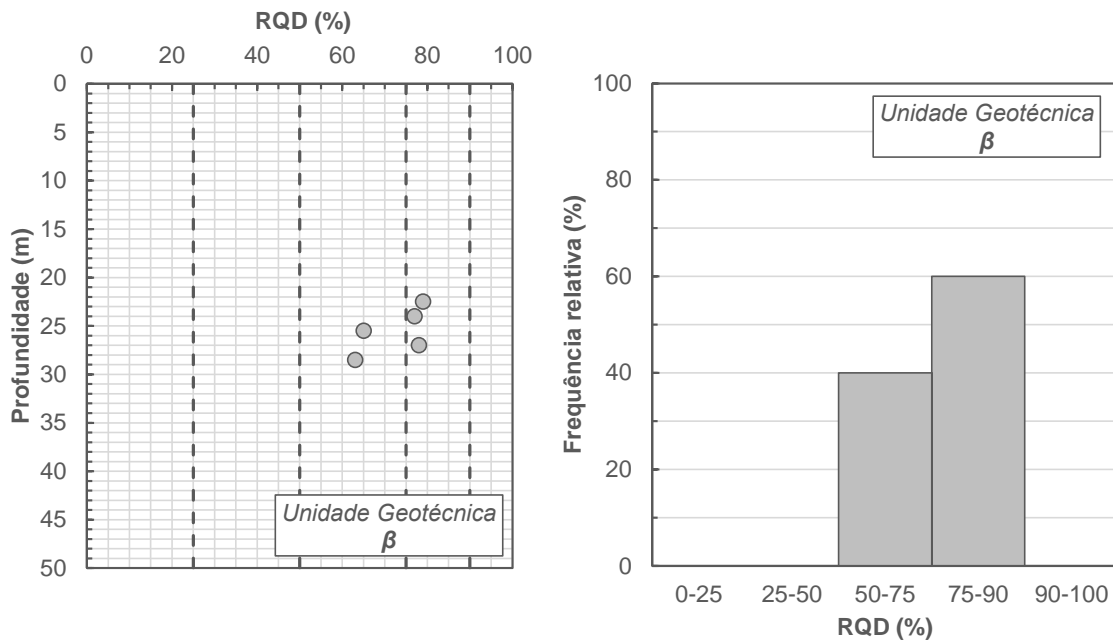


Figura 15 – Distribuição da Unidade Geotécnica  $\beta$ - em função da profundidade e frequência relativa dos valores de RQD registados

Com base no exposto, para a avaliação dos parâmetros de resistência geotécnica da formação de basaltos da Unidade Geotécnica  $\beta$ , é adotado um intervalo de valores de  $GSI=35 - 55$ , como uma estimativa conservadora representativa, conforme ilustrado na Figura abaixo.

Além disso, com base no ensaio de compressão uniaxial realizado em amostras da Unidade Geotécnica  $\beta$ , a resistência à compressão uniaxial da rocha intacta ( $\sigma_{c,i}$ ) foi estimada em  $5,3MPa$ , enquanto o módulo de elasticidade da rocha intacta foi obtido como  $E_i = 2500MPa$ . No entanto, devido à falta de um número substancial de resultados de ensaios laboratoriais em amostras da Unidade Geotécnica  $\beta$ , e ao facto de não se esperar que as propriedades da rocha intacta variem ao longo do maciço rochoso de basaltos, embora encontrado com um certo grau de diferenciação em termos do seu grau de meteorização e desintegração, a resistência à compressão uniaxial da rocha intacta ( $\sigma_{c,i}$ ) é estimada como sendo a mesma tanto para a Unidade Geotécnica  $\beta$  como para a Unidade Geotécnica  $\beta_{W5;W4/5}$ .

Assim, tendo em conta o exposto, o intervalo de valores  $\sigma_{c,i}$  que se considera representativa para a Unidade Geotécnica  $\beta$ , é:

$$\sigma_{c,i} = 5 - 10MPa$$



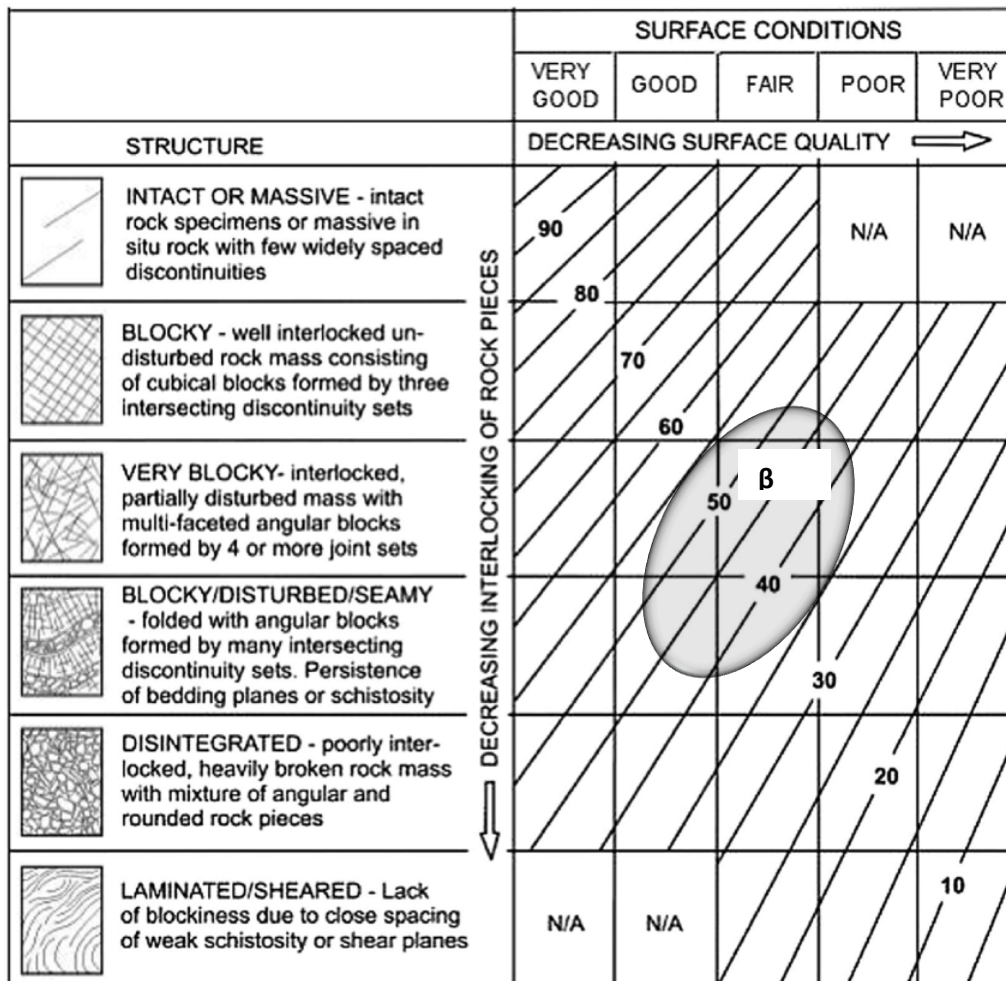


Figura 16 - Unidade Geotécnica  $\beta$  - gama de valores representativos de GSI

Posteriormente, para a determinação dos parâmetros de resistência e deformabilidade do maciço rochoso da Unidade Geotécnica  $\beta$ , foi utilizado o critério de rotura de Hoek-Brown (Hoek et al., 2002). Para o efeito, foi utilizado o software RocData (Rocscience Inc.) para determinar os parâmetros de resistência de Mohr-Coulomb equivalentes ( $c'$ ,  $\phi'$ ). Os dados de entrada utilizados no programa RocData para determinar os parâmetros de resistência ao cisalhamento são:

- Coeficiente de material,  $m_i$ . Com base na literatura internacional, os valores propostos para os basaltos são  $m_i = 25 \pm 5$ . Por conseguinte, para os cálculos, o valor representativo é fixado em  $m_i = 25$ .
- Resistência à compressão uniaxial da rocha intacta,  $\sigma_{c,i}$ . Como mostrado acima, foi estimado como  $\sigma_{c,i} = 5 - 10 MPa$ .
- Índice de Resistência Geológica (GSI). Como indicado acima, foi estimado como  $GSI = 35 - 55$ .
- Módulo de elasticidade da rocha intacta,  $E_i$ . O módulo de elasticidade da rocha intacta ( $E_i$ ) pode ser aproximado utilizando o coeficiente empírico MR, com base na tabela de referência relevante incorporada no software RocData, e de acordo com a relação  $E_i = \sigma_{c,i} \times MR$ . Com base na tabela de referência do RocData, para os basaltos, é adotado um valor de  $MR = 350$ , pelo que  $E_i = 2625 MPa$ .

- Fator de perturbação do maciço rochoso,  $D$ . Este parâmetro está relacionado com o relaxamento do maciço rochoso, devido à sua perturbação durante a escavação. De acordo com a tabela correspondente do programa RocData, foi considerado um valor representativo de  $D = 0.30$  para a parte subterrânea do túnel. Além disso, para delimitar o possível comportamento geomecânico do maciço rochoso, foi também considerado um fator de perturbação de  $D = 0.0$ , como representativo do maciço rochoso a uma distância da escavação subterrânea. De acordo com Hoek e Brown (2019), considerando que uma escavação de túnel cuidadosamente projetada e executada é alcançada, o valor mais alto do fator de perturbação ( $D = 0.30$ ) pode ser aplicado apenas a uma zona que se estende por 2-3 m em torno da escavação do túnel.
- O cálculo dos parâmetros de dimensionamento geotécnico foi efetuado através da aplicação "túnel", tal como utilizada no RocData, e uma sobrecarga média de  $h = 20m$ .

Considerando os parâmetros de entrada acima referidos, os resultados obtidos com base na aplicação do critério de rotura de Hoek-Brown são apresentados na tabela seguinte.

Tabela 33 - Unidade Geotécnica  $\beta$  - Aplicação do critério de rotura de Hoek-Brown (RocData, Rocscience Inc.)

Parâmetro		Valor			
Dados de entrada	Método de aplicação	Túneis ( $h = 20m$ )			
	Resistência à compressão uniaxial da rocha intacta, $\sigma_{ci}$ (MPa)	7.5			
	Coefficiente $m_i$	25			
	Módulo de elasticidade da rocha intacta, $E_i$ (GPa)	2.625			
	Fator de perturbação do maciço rochoso, $D$	0.0		0.3	
	GSI	35	55	35	55
Dados de saída	Coesão, $c$ (kPa)	90	133	78	118
	Ângulo de fricção, $\phi$ (°)	51	56	48	54
	Resistência à compressão uniaxial do maciço rochoso, $\sigma_{cm}$ (MPa)	1.49	2.25	1.20	1.95
	Módulo de elasticidade do maciço rochoso, $E_m$ (MPa)	298	1071	195	714

Por conseguinte, a tabela seguinte resume a gama dos parâmetros geotécnicos de projeto propostos.

Tabela 34 – Unidade Geotécnica  $\beta$  – gama de valores para os parâmetros geotécnicos de projeto

Parâmetro de projeto	Intervalo de valores	
	D = 0.0	D = 0.30
Peso unitário, $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	23 – 24	
Coesão efectiva, $c'$ (kPa)	100 – 130	75 – 120
Ângulo de fricção efetivo, $\phi'$ (°)	50 – 55	45 – 50
Módulo de elasticidade do maciço rochoso, $E_{rm}$ (MPa)	400 – 800	200 – 500
Rácio de Poisson, $\nu$	0.25	
Coefficiente de pressão da terra em repouso, $K_0$	0.7 – 1.0	
Coefficiente de permeabilidade, $k$ (m/seg.)	$5,0 \times 10^{-8}$ – $5,0 \times 10^{-7}$	

## 5.8 Unidade Geotécnica Cc1b

A Unidade Geotécnica Cc1b é constituída por calcário cristalino, de cor cinzenta-clara, por vezes amarelada, moderadamente a fortemente degradado, fortemente desintegrado, com vestígios pontuais de carstificação. De acordo com os resultados dos dados disponíveis dos ensaios laboratoriais e in situ, a Unidade Geotécnica Cc1b, é caracterizada pelas seguintes propriedades físicas e mecânicas.

Tabela 35 – Unidade Geotécnica Cc1b – Propriedades físicas e mecânicas

Parâmetro	Contagem	Valor mínimo	Valor máximo	Valor médio	Desvio padrão
$k$ (m/seg.)	6	8.4E-07	6.4E-06	1.3E-06	2.1E-06
Teor de água, $w$ (%)	1	0.1	0.1	0.1	0.0
RQD (%)	28	7	72	24	15

Um ensaio de resistência à compressão uniaxial de rocha que resultou em  $\sigma_{ci} = 91,9\text{MPa}$  e  $E_i = 25,6\text{GPa}$ , que foi realizado num fragmento fino de rocha calcária competente, foi excluído por não ser representativo.

Relativamente ao coeficiente de permeabilidade ( $k$ ), nos seis ensaios de permeabilidade in-situ realizados na Unidade Geotécnica Cc1b, o coeficiente de permeabilidade varia entre  $8,4 \times 10^{-7}$  m/seg e  $6,4 \times 10^{-6}$  m/seg, com um valor mediano de  $k \approx 1,3 \times 10^{-6}$  m/seg.<sup>-6</sup>

Para determinar os parâmetros de resistência geotécnica da Unidade Geotécnica Cc1b, é utilizado o sistema de classificação de maciços rochosos Geological Strength Index (GSI) (Marinos & Hoek 2000). As figuras seguintes apresentam a variação da designação da qualidade da rocha (RQD) (Deere 1963) e o grau de meteorização para a Unidade Geotécnica Cc1b.

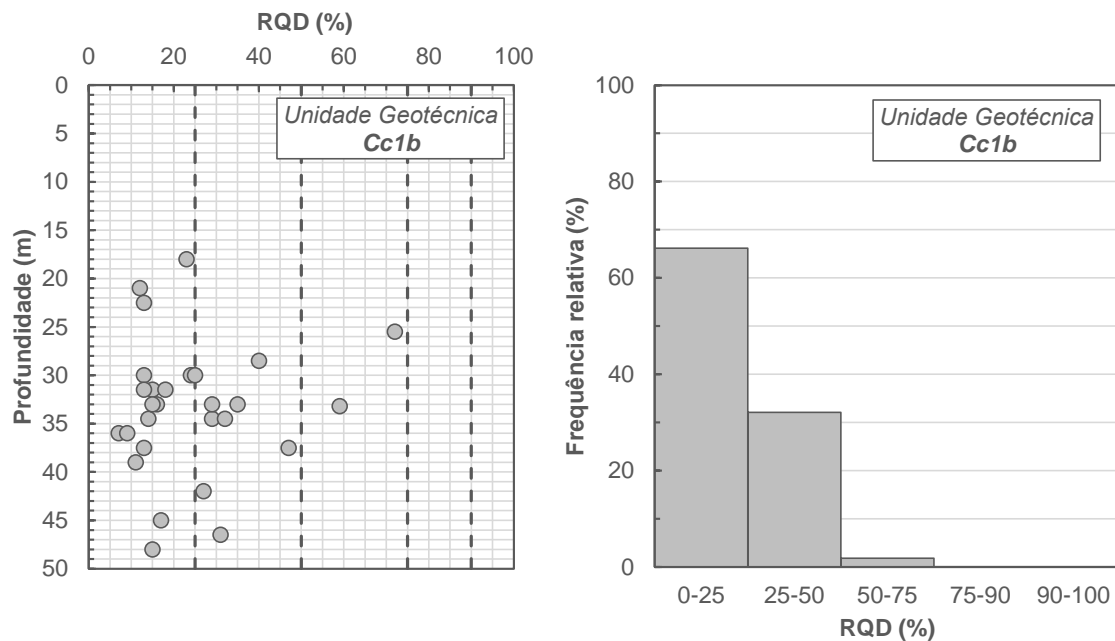


Figura 17 – Unidade Geotécnica Cc1b - distribuição em profundidade e frequência relativa dos valores de RQD registados

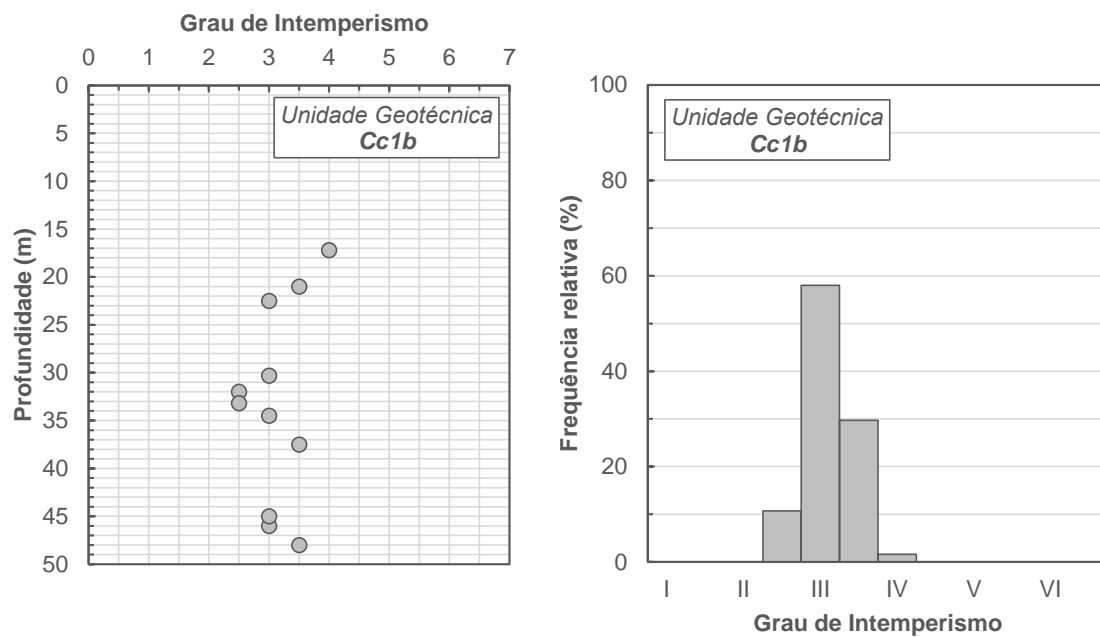




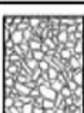



Figura 18 – Unidade Geotécnica Cc1b - distribuição em função da profundidade e frequência relativa do Grau de Intemperismo registado

Com base no exposto, para a avaliação dos parâmetros de resistência geotécnica da formação de basaltos da Unidade Geotécnica Cc1b, é adotado um intervalo de valores de GSI=10 – 20, como uma estimativa conservadora representativa, conforme ilustrado na Figura abaixo

		SURFACE CONDITIONS				
		VERY GOOD	GOOD	FAIR	POOR	VERY POOR
STRUCTURE		DECREASING SURFACE QUALITY →				
	INTACT OR MASSIVE - intact rock specimens or massive in situ rock with few widely spaced discontinuities	90	80		N/A	N/A
	BLOCKY - well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three intersecting discontinuity sets		70	60		
	VERY BLOCKY- interlocked, partially disturbed mass with multi-faceted angular blocks formed by 4 or more joint sets			50		
	BLOCKY/DISTURBED/SEAMY - folded with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets. Persistence of bedding planes or schistosity			40		
	DISINTEGRATED - poorly interlocked, heavily broken rock mass with mixture of angular and rounded rock pieces				30	
	LAMINATED/SHEARED - Lack of blockiness due to close spacing of weak schistosity or shear planes	N/A	N/A			20
						10

↓ DECREASING INTERLOCKING OF ROCK PIECES ↓

Figura 19 - Unidade Geotécnica Cc1b - gama de valores representativos de IGS

Devido à falta de resultados de ensaios laboratoriais de compressão uniaxial e de carga pontual em amostras da Unidade Geotécnica Cc1b, e ao facto de não se esperar que as propriedades da rocha intacta variem significativamente ao longo do maciço rochoso dos calcários cristalinos, embora se encontrem com um certo grau de diferenciação em termos do seu grau de meteorização e desintegração, a resistência à compressão uniaxial da rocha intacta ( $\sigma_{c,i}$ ) é estimada como sendo ligeiramente inferior à da Unidade Geotécnica Cc1d e à da Unidade Geotécnica Cc1c (ver §5.9 e §5.10). Por conseguinte, a gama de valores  $\sigma_{c,i}$  valores que se considera representativa para a Unidade Geotécnica Cc1b, é:

$$\sigma_{c,i} = 10 - 20MPa$$

Posteriormente, para a determinação dos parâmetros de resistência e deformabilidade do maciço rochoso da Unidade Geotécnica Cc1b, foi utilizado o critério de rotura de Hoek-Brown (Hoek et al., 2002). Para o efeito, foi utilizado o software RocData (Rocscience Inc.) para determinar os parâmetros de resistência equivalentes de Mohr-Coulomb ( $c', \phi'$ ). Os dados de entrada utilizados no programa RocData para determinar os parâmetros de resistência ao cisalhamento são:

- Coeficiente de material,  $m_i$ . Com base na literatura internacional, os valores propostos para os calcários cristalinos são  $m_i = 12 \pm 3$ . Por conseguinte, para os cálculos, o valor representativo é fixado em  $m_i = 12$ .
- Resistência à compressão uniaxial da rocha intacta,  $\sigma_{c,i}$ . Como mostrado acima, foi estimado como  $\sigma_{c,i} = 10 - 20 \text{MPa}$ .
- Índice de resistência geológica (GSI). Como indicado acima, foi estimado como  $GSI = 10 - 20$ .
- Módulo de elasticidade da rocha intacta,  $E_i$ . O módulo de elasticidade da rocha intacta ( $E_i$ ) pode ser aproximado utilizando o coeficiente empírico MR, com base na tabela de referência relevante incorporada no software RocData, e de acordo com a relação  $E_i = \sigma_{c,i} \times MR$ . Com base na tabela de referência do RocData, para calcários cristalinos, é adotado um valor de  $MR = 500$ , e portanto  $E_i = 7500 \text{MPa}$ .
- Fator de perturbação do maciço rochoso,  $D$ . Este parâmetro está relacionado com o relaxamento do maciço rochoso, devido à sua perturbação durante a escavação. De acordo com a tabela correspondente do programa RocData, foi considerado um valor representativo de  $D = 0.30$  para a parte subterrânea do túnel. Além disso, para delimitar o possível comportamento geomecânico do maciço rochoso, foi também considerado um fator de perturbação de  $D = 0.0$ , como representativo do maciço rochoso a uma distância da escavação subterrânea. De acordo com Hoek e Brown (2019), considerando que uma escavação de túnel cuidadosamente projetada e executada é alcançada, o valor mais alto do fator de perturbação ( $D = 0.30$ ) pode ser aplicado apenas a uma zona que se estende por 2-3 m em torno da escavação do túnel.
- O cálculo dos parâmetros de dimensionamento geotécnico foi efectuado através da aplicação "túnel", tal como utilizado no RocData, e uma sobrecarga média de  $h = 25 \text{m}$ .

Considerando os parâmetros de entrada acima referidos, os resultados obtidos com base na aplicação do critério de rotura de Hoek-Brown são apresentados na tabela seguinte.

Tabela 36 – Unidade Geotécnica Cc1b – Aplicação do critério de rotura de Hoek-Brown (RocData, Rocscience Inc.)

Parâmetro		Valor			
Dados de entrada	Método de aplicação	Túneis (h = 25m)			
	Resistência à compressão uniaxial da rocha intacta, $\sigma_{ci}$ (MPa)	15			
	Coeficiente $m_i$	12			
	Módulo de elasticidade da rocha intacta, $E_i$ (GPa)	7.5			
	Fator de perturbação do maciço rochoso, $D$	0.0		0.3	
	GSI	10	20	10	20
Dados de saída	Coesão, $c$ (kPa)	48	74	38	61
	Ângulo de fricção, $\phi$ (°)	36	42	31	38
	Resistência à compressão uniaxial do maciço rochoso, $\sigma_{cm}$ (MPa)	0.88	1.35	0.63	1.02



Parâmetro		Valor			
	Módulo de elasticidade do maciço rochoso, $E_m$ (MPa)	229	343	195	259

Por conseguinte, a tabela seguinte resume a gama dos parâmetros geotécnicos de projeto propostos.

Tabela 37 - Unidade Geotécnica Cc1b - gama de valores para os parâmetros geotécnicos de projeto

Parâmetro de projeto	Intervalo de valores	
	D = 0.0	D = 0.30
Peso unitário, $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	22 - 23	
Coesão efectiva, $c'$ (kPa)	45 - 70	35 - 55
Ângulo de fricção efetivo, $\phi'$ (°)	35 - 40	30 - 35
Módulo de elasticidade do maciço rochoso, $E_m$ (MPa)	250 - 300	200 - 250
Rácio de Poisson, $\nu$	0.20	
Coefficiente de pressão da terra em repouso, $K_0$	0.7 - 1.0	
Coefficiente de permeabilidade, $k$ (m/seg.)	$5,0 \times 10^{-7}$ - $5,0 \times 10^{-6}$	



## 5.9 Unidade Geotécnica Cc1d

A Unidade Geotécnica Cc1d é constituída por uma rocha calcária cristalina, de cor cinzenta-clara, por vezes amarelada, moderadamente a fortemente degradada, moderadamente desintegrada, com vestígios ocasionais de carstificação. De acordo com os resultados dos dados disponíveis dos ensaios laboratoriais e in situ, a Unidade Geotécnica Cc1d, é caracterizada pelas seguintes propriedades físicas e mecânicas.

Tabela 38 – Unidade Geotécnica Cc1d – Propriedades físicas e mecânicas

Parâmetro	Contagem	Valor mínimo	Valor máximo	Valor médio	Desvio padrão	
k (m/seg.)	1	2.4E-07	2.4E-07	2.4E-07	0.0E+00	
Teor de água, w (%)	7	0.0	1.8	0.6	0.7	
Peso unitário	húmido, $\gamma_s$ (kN/m <sup>3</sup> )	1	27.2	27.2	27.2	0.0
	Seco, $\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	5	24.8	26.2	25.6	0.6
Porosidade (%)	1	3.00	3.00	3.00	0.00	
Ensaio de compressão uniaxial	$\sigma_{ci}$ (kPa)	8	9900	49800	26050	13486
	E (MPa)	8	4200	32000	10488	9219
	$\nu$	3	0.08	0.20	0.16	0.07
Teste de ultrassom	$V_p$ (m/s)	2	3419	5798	4609	1190
	$V_s$ (m/s)	2	1723	2176	1950	227
Ensaio de resistência à tração por rutura (brasileiro)	$\epsilon_a$ (%)	3	0.02	0.61	0.39	0.27
	$\epsilon_r$ (%)	3	0.00	0.00	0.00	0.00
	$\gamma_s$ (kN/m <sup>3</sup> )	3	3.50	25.50	17.60	9.99
	$\sigma_t$ (MPa)	1	7.50	7.50	7.50	0.00
Teste de carga pontual	Axial $I_{s(50)}$ (MPa)	3	4.20	4.80	4.53	0.31
RQD (%)		31	7	76	40	20

Relativamente ao coeficiente de permeabilidade (k), no ensaio de permeabilidade in situ realizado na Unidade Geotécnica Cc1d, o coeficiente de permeabilidade foi estimado como  $k \approx 2,4 \times 10^{-7}$  m/seg. Para determinar os parâmetros de resistência geotécnica da Unidade Geotécnica Cc1d, foi utilizado o sistema de classificação de maciços rochosos do Índice de Resistência Geológica (GSI) (Marinos & Hoek 2000). As figuras seguintes apresentam a variação da Designação da Qualidade da Rocha (RQD) (Deere 1963) e o Grau de Intemperismo para a Unidade Geotécnica Cc1d.

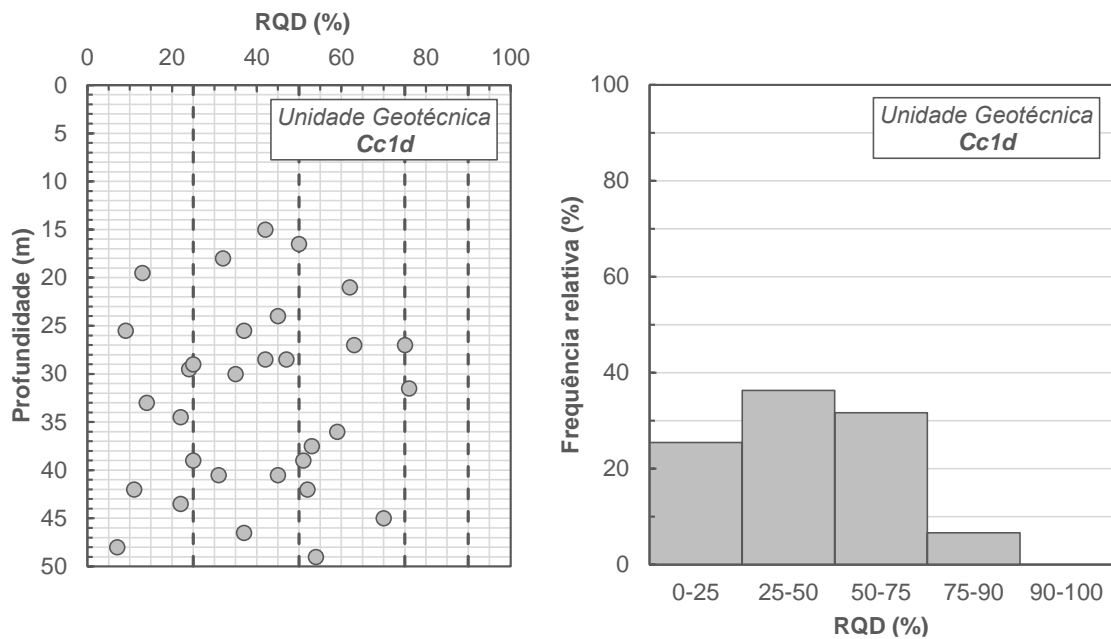


Figura 20 – Unidade Geotécnica Cc1d - distribuição em profundidade e frequência relativa dos valores de RQD registados

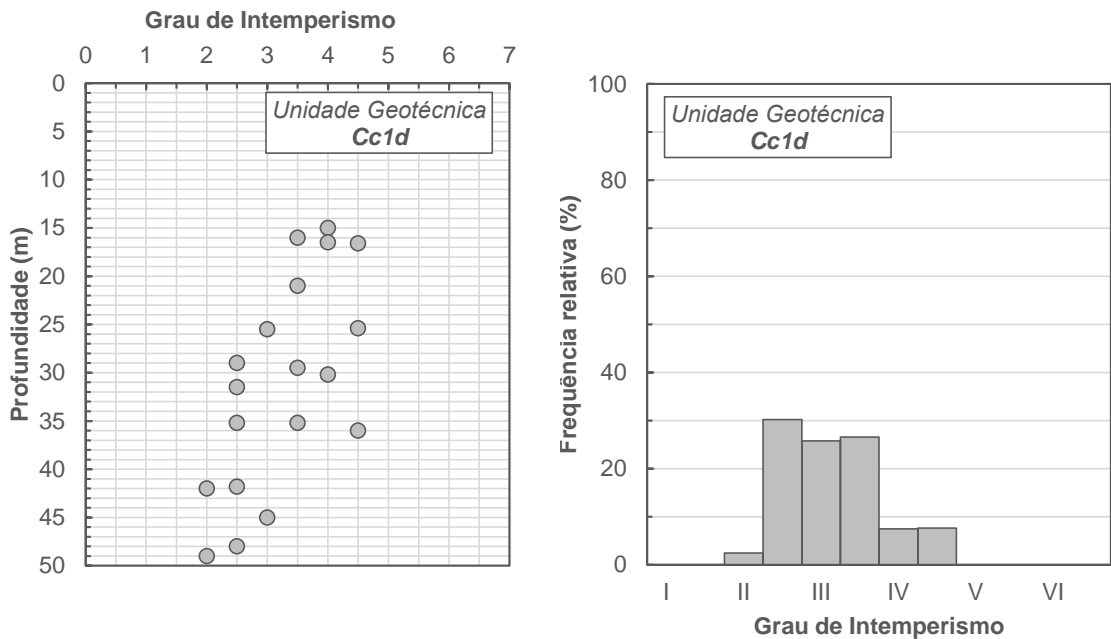




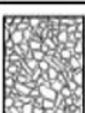



Figura 21 – Unidade Geotécnica Cc1d - distribuição em profundidade e frequência relativa do grau de meteorização registado

Com base no exposto, para a avaliação dos parâmetros de resistência geotécnica da formação de basaltos da Unidade Geotécnica Cc1d, é adotado um intervalo de valores de GSI=20 – 40, como uma estimativa conservadora representativa, conforme ilustrado na Figura abaixo.

	SURFACE CONDITIONS				
	VERY GOOD	GOOD	FAIR	POOR	VERY POOR
<b>STRUCTURE</b>	DECREASING SURFACE QUALITY →				
 INTACT OR MASSIVE - intact rock specimens or massive in situ rock with few widely spaced discontinuities	90			N/A	N/A
 BLOCKY - well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three intersecting discontinuity sets	80	70			
 VERY BLOCKY- interlocked, partially disturbed mass with multi-faceted angular blocks formed by 4 or more joint sets		60	50		
 BLOCKY/DISTURBED/SEAMY - folded with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets. Persistence of bedding planes or schistosity			40		
 DISINTEGRATED - poorly interlocked, heavily broken rock mass with mixture of angular and rounded rock pieces				30	
 LAMINATED/SHEARED - Lack of blockiness due to close spacing of weak schistosity or shear planes					10
	N/A	N/A			

↓ DECREASING INTERLOCKING OF ROCK PIECES ↓

Figura 22 - Unidade Geotécnica Cc1d - gama de valores representativos de GSI.

A avaliação das características de resistência da rocha intacta pode ser efetuada com base nos resultados dos ensaios laboratoriais de carga pontual ( $I_{S(50)}$ ) com base na seguinte relação, frequentemente adoptada na literatura internacional:

$$\sigma_{c,i} = K_c \times I_{S(50)}$$

onde,  $K_c$  é um coeficiente que depende do tipo de rocha (sedimentar, metamórfica), bem como da sua resistência. Para formações rochosas caracterizadas por valores baixos de  $I_{S(50)}$  ( $I_{S(50)} < 2$ ), o valor de  $K_c$  é  $K_c = 13$  para formações rochosas com valores intermédios de  $I_{S(50)}$  ( $2 < I_{S(50)} < 5$ ), pode assumir-se um valor de  $K_c = 20$ , enquanto que para formações rochosas associadas a valores elevados de  $I_{S(50)}$  ( $I_{S(50)} > 5$ ), adopta-se um valor de  $K_c = 28$  (Tsiambaos e Sabatakakis, 2004).

Por conseguinte, para a Unidade Geotécnica Cc1d, e com base nos resultados da campanha de ensaios de carga pontual:

$$\sigma_{c,i} = 20 \times (4.20 \div 4.80) \text{MPa} = 84 \div 96 \text{MPa}$$

Além disso, com base em oito (8) ensaios de compressão uniaxial realizados em amostras da Unidade Geotécnica Cc1d, a resistência à compressão uniaxial da rocha intacta ( $\sigma_{c,i}$ ) foi estimada

entre 9,9MPa e 49,8MPa, com um valor médio de 26,05MPa. A figura seguinte ilustra a distribuição em profundidade dos valores medidos e estimados em laboratório da resistência à compressão uniaxial da rocha intacta ( $\sigma_{c,i}$ ).

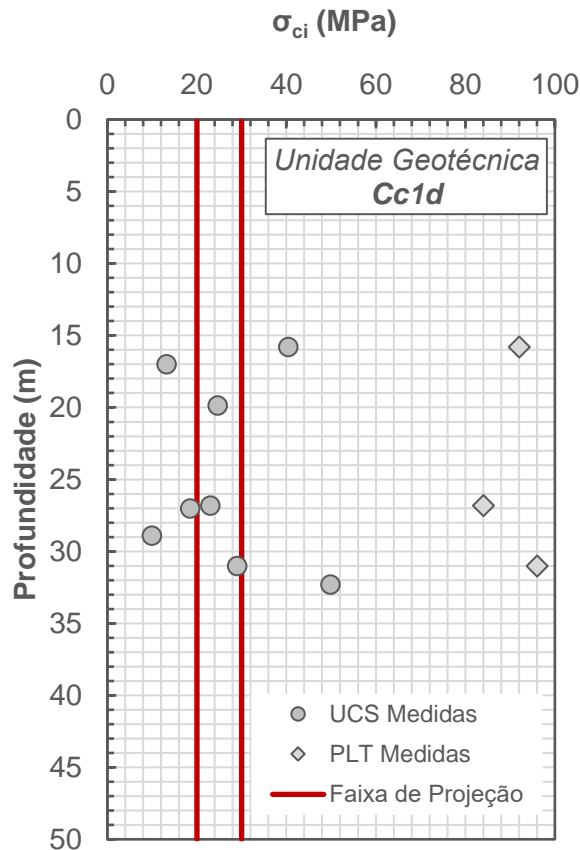


Figura 23 - Unidade Geotécnica Cc1d - Variação de  $\sigma_{c,i}$  com a profundidade

Assim, considerando o exposto, o intervalo de valores  $\sigma_{c,i}$  valores que se considera representativa, conservadora, para a Unidade Geotécnica Cc1d, é:

$$\sigma_{c,i} = 20 - 30MPa$$

Posteriormente, para a determinação dos parâmetros de resistência e deformabilidade do maciço rochoso da Unidade Geotécnica Cc1d, foi utilizado o critério de rotura de Hoek-Brown (Hoek et al., 2002). Assim, o software RocData (Rocscience Inc.) foi utilizado para determinar os parâmetros de resistência equivalentes de Mohr-Coulomb ( $c'$ ,  $\phi'$ ). Os dados de entrada utilizados no programa RocData para determinar os parâmetros de resistência ao cisalhamento são:

- Coeficiente de material,  $m_i$ . Com base na literatura internacional, os valores propostos para os calcários cristalinos são  $m_i = 12 \pm 3$ . Por conseguinte, para os cálculos, o valor representativo é fixado em  $m_i = 12$ .
- Resistência à compressão uniaxial de rocha intacta,  $\sigma_{c,i}$ . Conforme discutido acima, foi estimada como  $\sigma_{c,i} = 20 - 30MPa$ .
- Índice de Resistência Geológica (GSI). Com base nos resultados dos ensaios de compressão uniaxial efetuados em amostras da Unidade Geotécnica Cc1d, os valores de E variam entre 4200MPa e 32000MPa, com um valor médio de  $E_i = 10488MPa$ . Adicionalmente, o módulo

de elasticidade da rocha intacta ( $E_i$ ) pode ser aproximado utilizando o coeficiente empírico MR, com base na tabela de referência relevante incorporada no software RocData, e de acordo com a relação  $E_i = \sigma_{c,i} \times MR$ . Com base na tabela de referência do RocData, para os calcários cristalinos, é adotado um valor de  $MR = 500$ , e portanto  $E_i = 12500 \text{ MPa}$ .

- Fator de perturbação do maciço rochoso,  $D$ . Este parâmetro está relacionado com o relaxamento do maciço rochoso, devido à sua perturbação durante a escavação. De acordo com a tabela correspondente do programa RocData, foi considerado um valor representativo de  $D = 0.30$  para a parte subterrânea do túnel. Além disso, para delimitar o possível comportamento geomecânico do maciço rochoso, foi também considerado um fator de perturbação de  $D = 0.0$ , como representativo do maciço rochoso a uma distância da escavação subterrânea. De acordo com Hoek e Brown (2019), considerando que uma escavação de túnel cuidadosamente projetada e executada é alcançada, o valor mais alto do fator de perturbação ( $D = 0.30$ ) pode ser aplicado apenas a uma zona que se estende por 2-3 m em torno da escavação do túnel.
- O cálculo dos parâmetros de dimensionamento geotécnico foi efetuado através da aplicação "túnel", tal como utilizada no RocData, e uma sobrecarga média de  $h = 25 \text{ m}$ .

Considerando os parâmetros de entrada acima referidos, os resultados obtidos com base na aplicação do critério de rotura de Hoek-Brown são apresentados na tabela seguinte.

Tabela 39 - Unidade Geotécnica Cc1d - Aplicação do critério de rotura de Hoek-Brown (RocData, Rocscience Inc.)

Parâmetro		Valor			
Dados de entrada	Método de aplicação	Túneis (h = 25m)			
	Resistência à compressão uniaxial da rocha intacta, $\sigma_{ci}$ (MPa)	25			
	Coeficiente $m_i$	12			
	Módulo de elasticidade da rocha intacta, $E_i$ (GPa)	12.5			
	Fator de perturbação do maciço rochoso, $D$	0.0		0.3	
	GSI	20	40	20	40
Dados de saída	Coesão, $c$ (kPa)	89	165	73	137
	Ângulo de fricção, $\phi$ (°)	46	53	41	50
	Resistência à compressão uniaxial do maciço rochoso, $\sigma_{cm}$ (MPa)	2.24	3.82	1.70	3.14
	Módulo de elasticidade do maciço rochoso, $E_m$ (MPa)	570	1995	433	1284

Por conseguinte, a tabela seguinte resume a gama dos parâmetros geotécnicos de projeto propostos.

Tabela 40 – Unidade Geotécnica Cc1d – gama de valores dos parâmetros geotécnicos de projeto

Parâmetro de projeto	Intervalo de valores	
	D = 0.0	D = 0.30
Peso unitário, $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	23 – 24	
Coesão efectiva, $c'$ (kPa)	110 – 150	70 – 110
Ângulo de fricção efetivo, $\phi'$ (°)	44 – 48	40 – 45
Módulo de elasticidade do maciço rochoso, $E_{rm}$ (MPa)	800 – 1400	400 – 800
Rácio de Poisson, $\nu$	0.20	
Coefficiente de pressão da terra em repouso, $K_0$	0.7 – 1.0	
Coefficiente de permeabilidade, $k$ (m/seg.)	$1,0 \times 10^{-7}$ – $1,0 \times 10^{-6}$	

## 5.10 Unidade Geotécnica Cc1c

A Unidade Geotécnica Cc1c é constituída por uma pedra calcária cristalina, de cor cinzenta-clara, por vezes amarelada, moderadamente degradada, ligeira a moderadamente desagregada. De acordo com os resultados dos dados disponíveis dos ensaios laboratoriais e in situ, a Unidade Geotécnica Cc1c, é caracterizada pelas seguintes propriedades físicas e mecânicas.

Tabela 41 – Unidade Geotécnica Cc1c – Propriedades físicas e mecânicas

Parâmetro		Contagem	Valor mínimo	Valor máximo	Valor médio	Desvio padrão
k (m/seg.)		2	6.6E-08	1.1E-06	5.7E-07	7.1E-07
Teor de água, w (%)		6	0.00	0.40	0.13	0.14
Peso unitário	húmido, $\gamma_s$ (kN/m <sup>3</sup> )	4	27.0	27.1	27.0	0.1
	Seco, $\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	4	23.8	26.9	26.0	1.5
Porosidade (%)		5	0.80	7.30	2.52	2.77
Ensaio de compressão uniaxial	$\sigma_{ci}$ (kPa)	6	4300	64500	35383	22738
	E (MPa)	6	2300	25200	11200	8622
	$\nu$	4	0.14	0.25	0.21	0.05
Teste de carga pontual	Axial $I_{s(50)}$ (MPa)	6	4.00	7.70	5.45	1.51
RQD (%)		23	27	91	63	19

Relativamente ao coeficiente de permeabilidade ( $k$ ), nos dois ensaios de permeabilidade in-situ realizados na Unidade Geotécnica Cc1c, o coeficiente de permeabilidade varia entre  $6,6 \times 10^{-8}$  m/seg e  $1,1 \times 10^{-6}$  m/seg, com um valor mediano de  $k \approx 5,7 \times 10^{-7}$  m/seg.<sup>-7</sup>

Para determinar os parâmetros de resistência geotécnica da Unidade Geotécnica Cc1c, é utilizado o sistema de classificação de maciços rochosos do Índice de Resistência Geológica (GSI) (Marinos & Hoek 2000). As figuras seguintes apresentam a variação da Designação da Qualidade da Rocha (RQD) (Deere 1963) e o Grau de Intemperismo para a Unidade Geotécnica Cc1c.

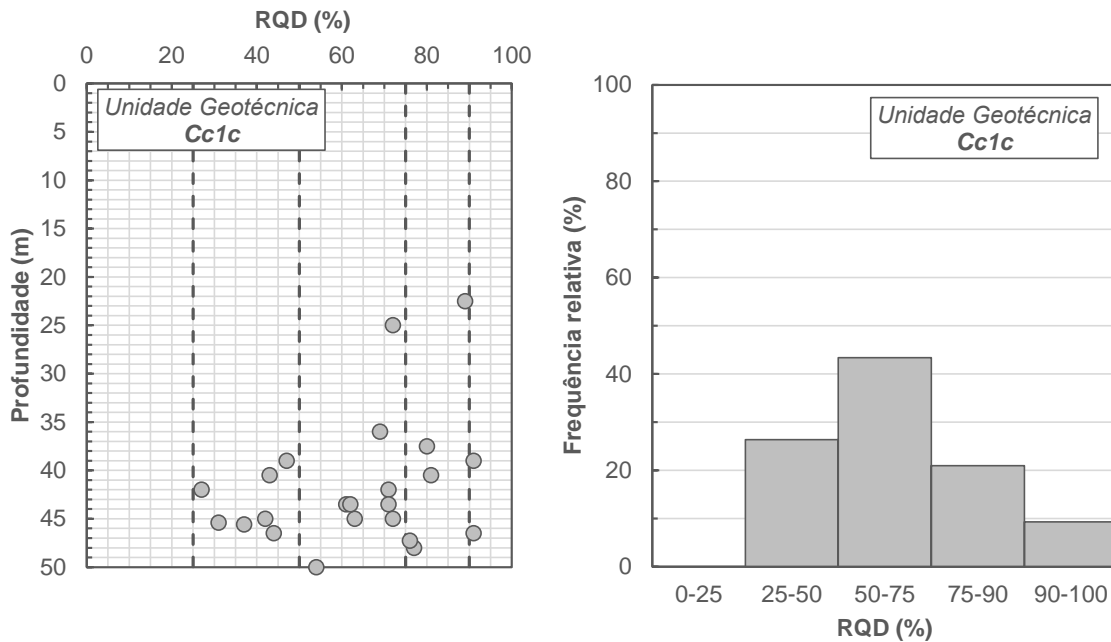


Figura 24 – Unidade Geotécnica Cc1c – distribuição em função da profundidade e frequência relativa dos valores de RQD registados

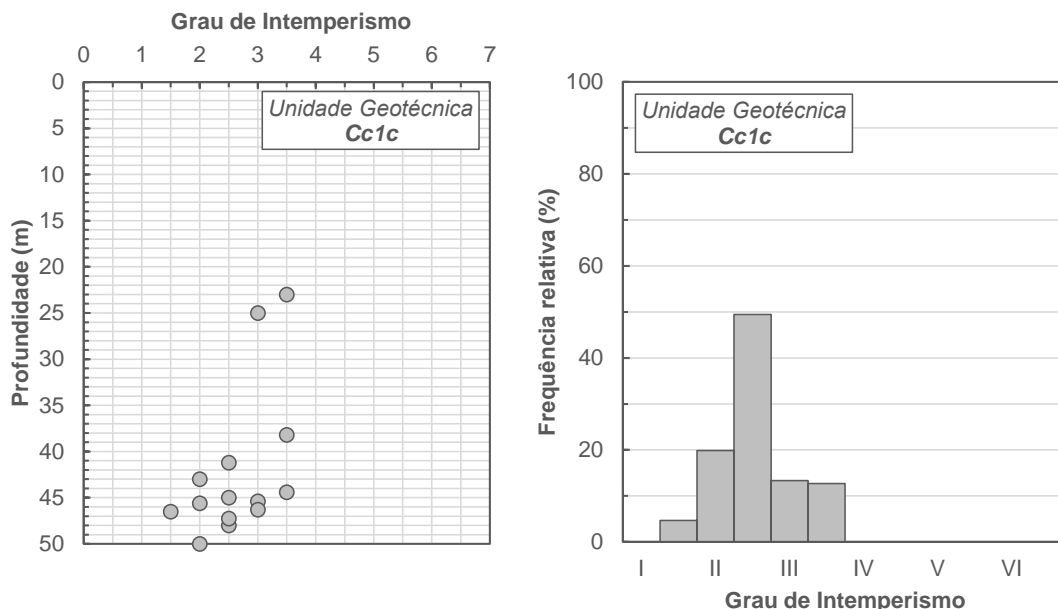


Figura 25 – Unidade Geotécnica Cc1c – distribuição em função da profundidade e frequência relativa do grau de meteorização registado

Com base no exposto, para a avaliação dos parâmetros de resistência geotécnica da formação de basaltos da Unidade Geotécnica Cc1c, é adotado um intervalo de valores de GSI=40 – 55, como uma estimativa conservadora representativa, conforme ilustrado na Figura abaixo.



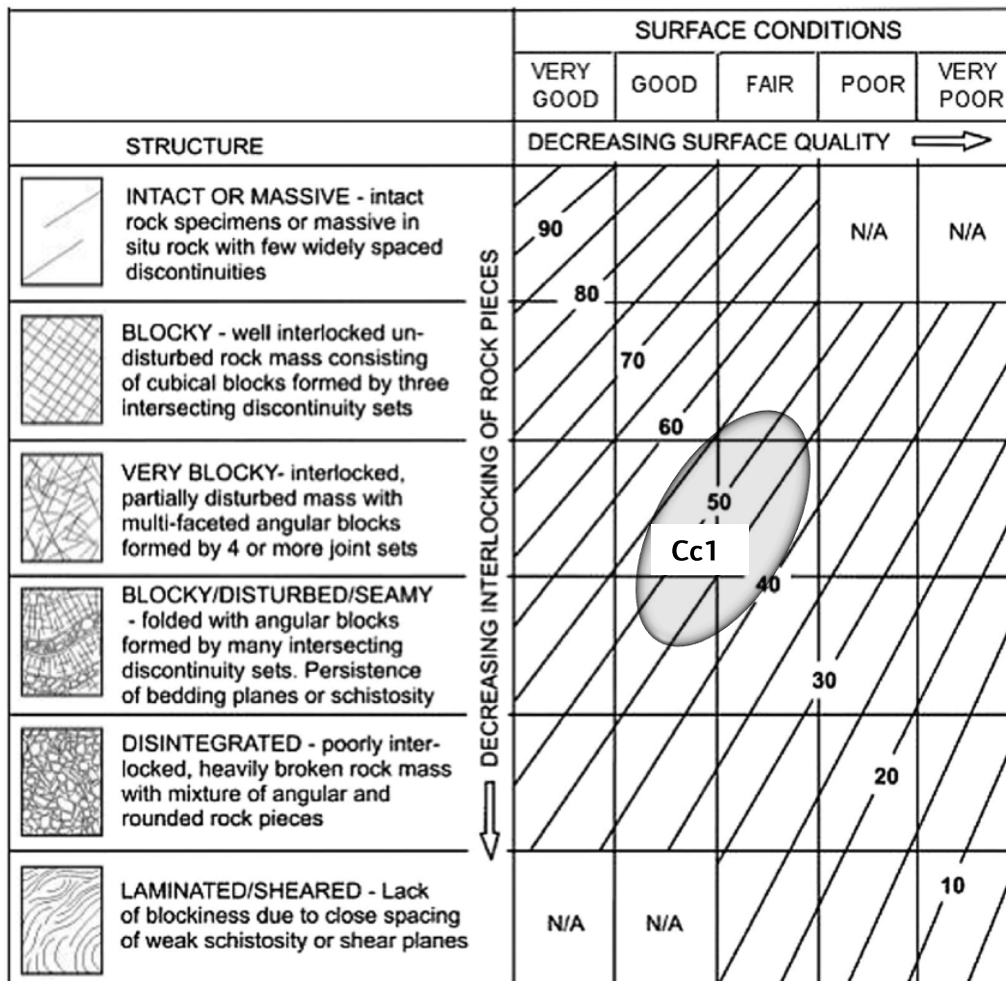


Figura 26 - Unidade Geotécnica Cc1c - gama de valores representativos de IGS

A avaliação das características de resistência da rocha intacta pode ser efetuada com base nos resultados dos ensaios laboratoriais de carga pontual ( $I_{S(50)}$ ) com base na seguinte relação, frequentemente adoptada na literatura internacional:

$$\sigma_{c,i} = K_c \times I_{S(50)}$$

onde,  $K_c$  é um coeficiente que depende do tipo de rocha (sedimentar, metamórfica), bem como da sua resistência. Para formações rochosas caracterizadas por valores baixos de  $I_{S(50)}$  ( $I_{S(50)} < 2$ ), o valor de  $K_c$  é  $K_c = 13$  para formações rochosas com valores intermédios de  $I_{S(50)}$  ( $2 < I_{S(50)} < 5$ ), pode assumir-se um valor de  $K_c = 20$ , enquanto que para formações rochosas associadas a valores elevados de  $I_{S(50)}$  ( $I_{S(50)} > 5$ ), adopta-se um valor de  $K_c = 28$  (Tsiambaos e Sabatakakis, 2004).

Por conseguinte, para a Unidade Geotécnica Cc1c, e com base nos resultados da campanha de ensaios de carga pontual:

$$\sigma_{c,i} = 20 \times (4.00 \div 7.70) \text{MPa} = 80 \div 154 \text{MPa}$$

Além disso, com base em seis (6) ensaios de compressão uniaxial realizados em amostras da Unidade Geotécnica Cc1c, a resistência à compressão uniaxial da rocha intacta ( $\sigma_{c,i}$ ) foi estimada

entre 4,3MPa e 64,5MPa, com um valor médio de 35,3MPa. A figura seguinte ilustra a distribuição em profundidade dos valores medidos e estimados em laboratório da resistência à compressão uniaxial da rocha intacta ( $\sigma_{c,i}$ ).

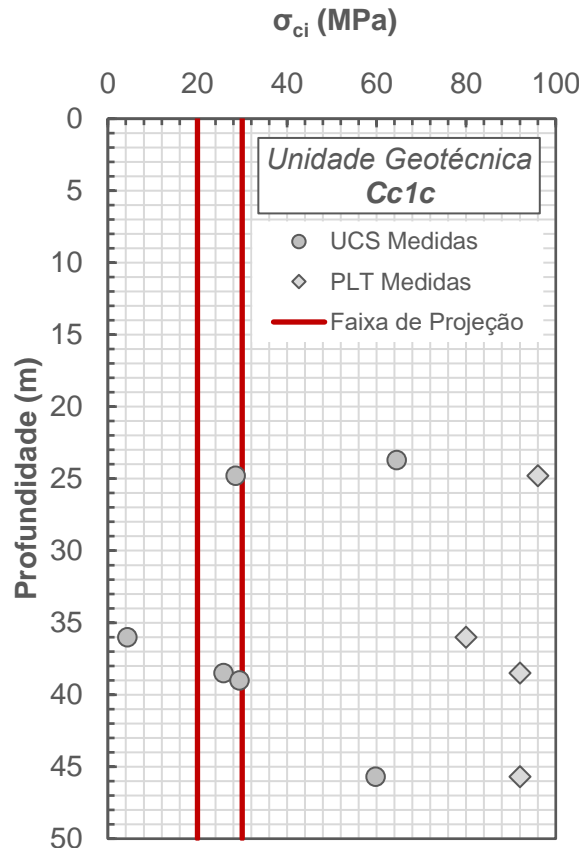


Figura 27 - Unidade Geotécnica Cc1c - Variação de  $\sigma_{c,i}$  com a profundidade

Assim, tendo em conta o exposto, o intervalo de valores  $\sigma_{c,i}$  que se considera representativa, conservadora, para a Unidade Geotécnica Cc1c, é:

$$\sigma_{c,i} = 20 - 30MPa$$

Posteriormente, para a determinação dos parâmetros de resistência e deformabilidade do maciço rochoso da Unidade Geotécnica Cc1c, é utilizado o critério de rotura de Hoek-Brown (Hoek et al., 2002). Para o efeito, foi utilizado o software RocData (Rocscience Inc.) para determinar os parâmetros de resistência equivalentes de Mohr-Coulomb ( $c'$ ,  $\phi'$ ). Os dados de entrada utilizados no programa RocData para determinar os parâmetros de resistência ao cisalhamento são:

- Coeficiente de material,  $m_i$ . Com base na literatura internacional, os valores propostos para os calcários cristalinos são  $m_i = 12 \pm 3$ . Por conseguinte, para os cálculos, o valor representativo é fixado em  $m_i = 12$ .
- Resistência à compressão uniaxial de rocha intacta,  $\sigma_{c,i}$ . Conforme discutido acima, foi estimada como  $\sigma_{c,i} = 20 - 30MPa$ .
- Índice de Resistência Geológica (GSI). Com base nos resultados dos ensaios de compressão uniaxial efetuados em amostras da Unidade Geotécnica Cc1c, os valores de E variam entre

2300MPa e 25200MPa, com um valor médio de  $E_i = 11200MPa$ . Adicionalmente, o módulo de elasticidade da rocha intacta ( $E_i$ ) pode ser aproximado utilizando o coeficiente empírico MR, com base na tabela de referência relevante incorporada no software RocData, e de acordo com a relação  $E_i = \sigma_{c,i} \times MR$ . Com base na tabela de referência do RocData, para os calcários cristalinos, é adotado um valor de  $MR = 500$ , e portanto  $E_i = 12500MPa$ .

- Fator de perturbação do maciço rochoso,  $D$ . Este parâmetro está relacionado com o relaxamento do maciço rochoso, devido à sua perturbação durante a escavação. De acordo com a tabela correspondente do programa RocData, foi considerado um valor representativo de  $D = 0.30$  para a parte subterrânea do túnel. Além disso, para delimitar o possível comportamento geomecânico do maciço rochoso, foi também considerado um fator de perturbação de  $D = 0.0$ , como representativo do maciço rochoso a uma distância da escavação subterrânea. De acordo com Hoek e Brown (2019), considerando que uma escavação de túnel cuidadosamente projetada e executada é alcançada, o valor mais alto do fator de perturbação ( $D = 0.30$ ) pode ser aplicado apenas a uma zona que se estende por 2-3 m em torno da escavação do túnel.
- O cálculo dos parâmetros de dimensionamento geotécnico foi efetuado através da aplicação "túnel", tal como utilizada no RocData, e uma sobrecarga média de  $h = 25m$ .

Considerando os parâmetros de entrada acima referidos, os resultados obtidos com base na aplicação do critério de rotura de Hoek-Brown são apresentados na tabela seguinte.

Tabela 42 – Unidade Geotécnica Cc1c – Aplicação do critério de rotura de Hoek-Brown (RocData, Rocscience Inc.)

Parâmetro		Valor			
Dados de entrada	Método de aplicação	Túneis (h = 25m)			
	Resistência à compressão uniaxial da rocha intacta, $\sigma_{ci}$ (MPa)	25			
	Coeficiente $m_i$	12			
	Módulo de elasticidade da rocha intacta, $E_i$ (GPa)	12.5			
	Fator de perturbação do maciço rochoso, $D$	0.0		0.3	
	GSI	40	55	40	55
Dados de saída	Coesão, $c$ (kPa)	165	289	137	238
	Ângulo de fricção, $\phi$ (°)	53	56	50	55
	Resistência à compressão uniaxial do maciço rochoso, $\sigma_{cm}$ (MPa)	3.82	5.29	3.14	4.55
	Módulo de elasticidade do maciço rochoso, $E_m$ (MPa)	1995	5100	1284	3400

Por conseguinte, a tabela seguinte resume a gama dos parâmetros geotécnicos de projeto propostos.

Tabela 43 – Unidade Geotécnica Cc1c – gama de valores para os parâmetros geotécnicos de projeto.

Parâmetro de projeto	Intervalo de valores	
	D = 0.0	D = 0.30
Peso unitário, $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	24 - 25	
Coesão efectiva, $c'$ (kPa)	180 - 260	130 - 180
Ângulo de fricção efectivo, $\phi'$ (°)	50 - 52	46 - 50
Módulo de elasticidade do maciço rochoso, $E_{rm}$ (MPa)	2000 - 4000	1200 - 2000
Rácio de Poisson, $\nu$	0.20	
Coefficiente de pressão da terra em repouso, $K_0$	0.7 - 1.0	
Coefficiente de permeabilidade, $k$ (m/seg.)	$5,0 \times 10^{-7} - 1,0 \times 10^{-6}$	

---

## 6 PARÂMETROS DE CONCEPÇÃO GEOTÉCNICA

Com base na avaliação e tratamento estatístico dos dados disponíveis da campanha de investigação geotécnica executada in situ e em laboratório, são propostas gamas de valores dos parâmetros geotécnicos de projeto para cada unidade geotécnica, conforme se apresenta na Tabela 44. Finalmente, com base nos intervalos acima referidos, os valores característicos correspondentes dos parâmetros geotécnicos de projeto, para cada unidade geotécnica, são apresentados na Tabela 45.

Note-se que os valores, abaixo tabelados, dos parâmetros geotécnicos das várias unidades geotécnicas reconhecidas se baseiam, em geral, numa abordagem conservadora. Os valores dos parâmetros geotécnicos adotados serão reavaliados no âmbito da fase de Projeto de Execução, com base nos resultados do programa de investigação geotécnica adicional que será realizado nas imediações da Estação de Campo de Ourique.

Tabela 44 - Gama de valores dos parâmetros geotécnicos

Parâmetro	Gama de valores de projeto												
	At	M(ag)b	M(ag)a	$\beta_{w5;w4/5}$		$\beta$		Cc1b		Cc1d		Cc1c	
				D=0.0	*D=0.3	D=0.0	*D=0.3	D=0.0	*D=0.3	D=0.0	*D=0.3	D=0.0	*D=0.3
Peso unitário, $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	18-19	18-20	20-21	23-24		23-24		22-23		23-24		24-25	
Coesão efectiva, $c'$ (kPa)	0 - 5	5-10	15-30	50-70	40-65	100-130	75-120	45-70	35-55	110-150	70-110	180-260	130-180
Ângulo de fricção efectivo, $\phi'$ (°)	26-30	26-30	28-32	45-50	40-45	50-55	45-50	35-40	30-35	44-48	40-45	50-52	46-50
Resistência ao cisalhamento não drenada, $c_u$ (kPa)	-	60-80	250-350	-		-		-		-		-	
Resistência à compressão uniaxial, $\sigma_{ci}$ (MPa)	-	-	-	5-10		5-10		10-20		20-30		20-30	
GSI	-	-	-	20-35		35-55		10-20		20-40		40-55	
Módulo de elasticidade, $E$ (MPa)	7-10	10-20	30-60	-		-		-		-		-	
Módulo de elasticidade do maciço rochoso, $E_{rm}$ (MPa)	-	-	-	150-250	100-200	400-800	200-500	250-300	200-250	800-1400	400-800	2000-4000	1200-2000
Rácio de Poisson, $\nu$	0.35	0.35	0.30	0.25		0.25		0.20		0.20		0.20	
Coefficiente de pressão da terra em repouso, $K_0$	0.5	0.5	0.7	0.7		0.7		0.8		0.8		0.8	
Módulo do edómetro, $E_s$ (MPa)	11-16	16-32	40-80	-		-		-		-		-	

\*Nota: O valor mais elevado do fator de perturbação ( $D = 0.30$ ) pode ser aplicado a uma zona que se estende por 2-3 m à volta da escavação do túnel, de acordo com Hoek e Brown (2019).

Tabela 45 – Valores característicos propostos para os parâmetros geotécnicos

Parâmetro	Gama de valores de projeto												
	At	M(ag)b	M(ag)a	$\beta_{W5;W4/5}$		$\beta$		Cc1b		Cc1d		Cc1c	
				D=0.0	*D=0.3	D=0.0	*D=0.3	D=0.0	*D=0.3	D=0.0	*D=0.3	D=0.0	*D=0.3
Peso unitário, $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	18	19	20	23		23		22		23		24	
Coesão efectiva, $c'$ (kPa)	2	8	20	60	50	110	90	55	45	130	90	210	150
Ângulo de fricção efetivo, $\phi'$ (°)	28	28	30	47	44	52	47	38	32	46	42	50	48
Resistência ao cisalhamento não drenada, $c_u$ (kPa)	-	70	300	-		-		-		-		-	
Resistência à compressão uniaxial, $\sigma_{ci}$ (MPa)	-	-	-	7.5		7.5		15		25		25	
GSI	-	-	-	20-35		35-55		10-20		20-40		40-55	
Módulo de elasticidade, $E$ (MPa)	8	15	45	-		-		-		-		-	
Módulo de elasticidade do maciço rochoso, $E_m$ (MPa)	-	-	-	200	150	600	350	270	220	1100	600	2500	1500
Rácio de Poisson, $\nu$	0.35	0.35	0.30	0.25		0.25		0.20		0.20		0.20	
Coefficiente de pressão da terra em repouso, $K_0$	0.5	0.5	0.7	0.7		0.7		0.8		0.8		0.8	
Módulo do edómetro, $E_s$ (MPa)	12	24	60	-		-		-		-		-	

\*Nota: O valor mais elevado do fator de perturbação ( $D = 0.30$ ) pode ser aplicado a uma zona que se estende por 2-3 m à volta da escavação do túnel, de acordo com Hoek e Brown (2019).



## 7 AVALIAÇÃO DA ESCAVABILIDADE E DA ABRASIVIDADE

### 7.1 Avaliação da escavabilidade

A escavabilidade das formações rochosas (Unidades Geotécnicas  $\beta_{W5;W4/5}$ ,  $\beta$ , Cc1b, Cc1d e Cc1c) que se encontram no Local do Projeto é estimada com base na metodologia proposta por Tsiabaos e Saroglou (2009). De acordo com esta metodologia, a escavabilidade dos maciços rochosos é uma função do sistema de classificação GSI e do índice de carga pontual ( $I_{S(50)}$ ). Os métodos de escavação mais adequados propostos para as diferentes formações rochosas encontradas, de acordo com as respetivas gamas de GSI, bem como o índice de carga pontual ( $I_{S(50)}$ ), tal como estimado e discutido no §5 são ilustrados nas figuras seguintes. Note-se que a escavabilidade das Unidades Geotécnicas  $\beta_{W5;W4/5}$ , e  $\beta$ , caracterizadas pelo índice de carga pontual  $I_{S(50)} < 3MPa$  é avaliada com base na Figura 26, enquanto a escavabilidade das Unidades Geotécnicas Cc1b, Cc1d e Cc1c, caracterizadas pelo índice de carregamento pontual  $I_{S(50)} \geq 3MPa$  é avaliada com base na Figura 27 (Tsiabaos e Saroglou, 2009).

De acordo com a avaliação da escavabilidade, a escavação na maior parte das formações rochosas (basaltos e calcários cristalinos das Unidades Geotécnicas Cc1b e Cc1d) pode geralmente ser efetuada por meios mecânicos (i.e., escavação e rasgamento) sem a utilização de explosivos. O maciço calcário da Unidade Geotécnica Cc1c, mais competente, pouco a moderadamente desagregado e moderadamente alterado, pode exigir a utilização de martelos pneumáticos

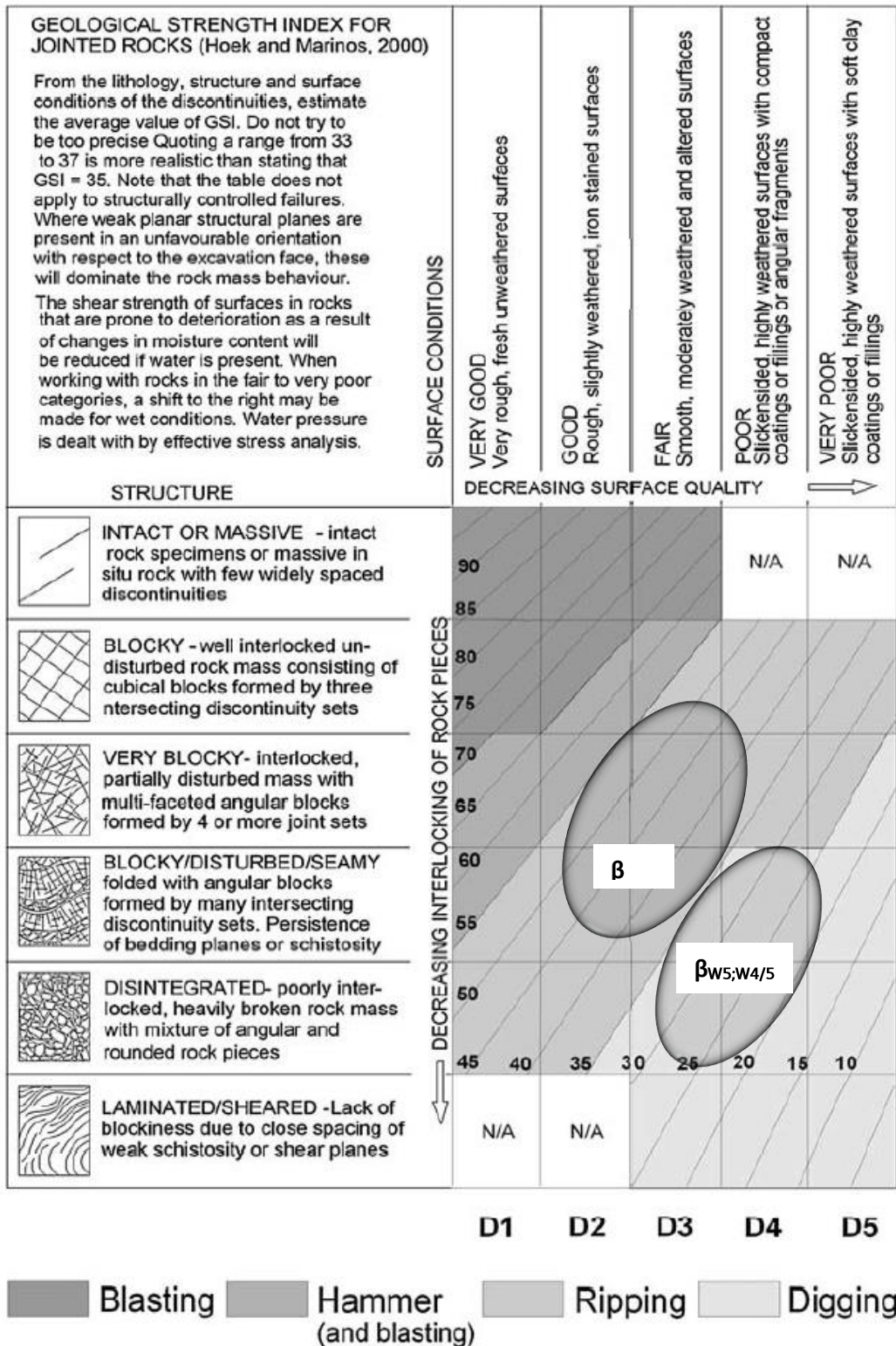


Figura 28 - Avaliação da escavabilidade para as Unidades Geotécnicas  $\beta_{W5;W4/5}$ , e  $\beta$ , com base em Tsiambaos e Saroglou (2009)

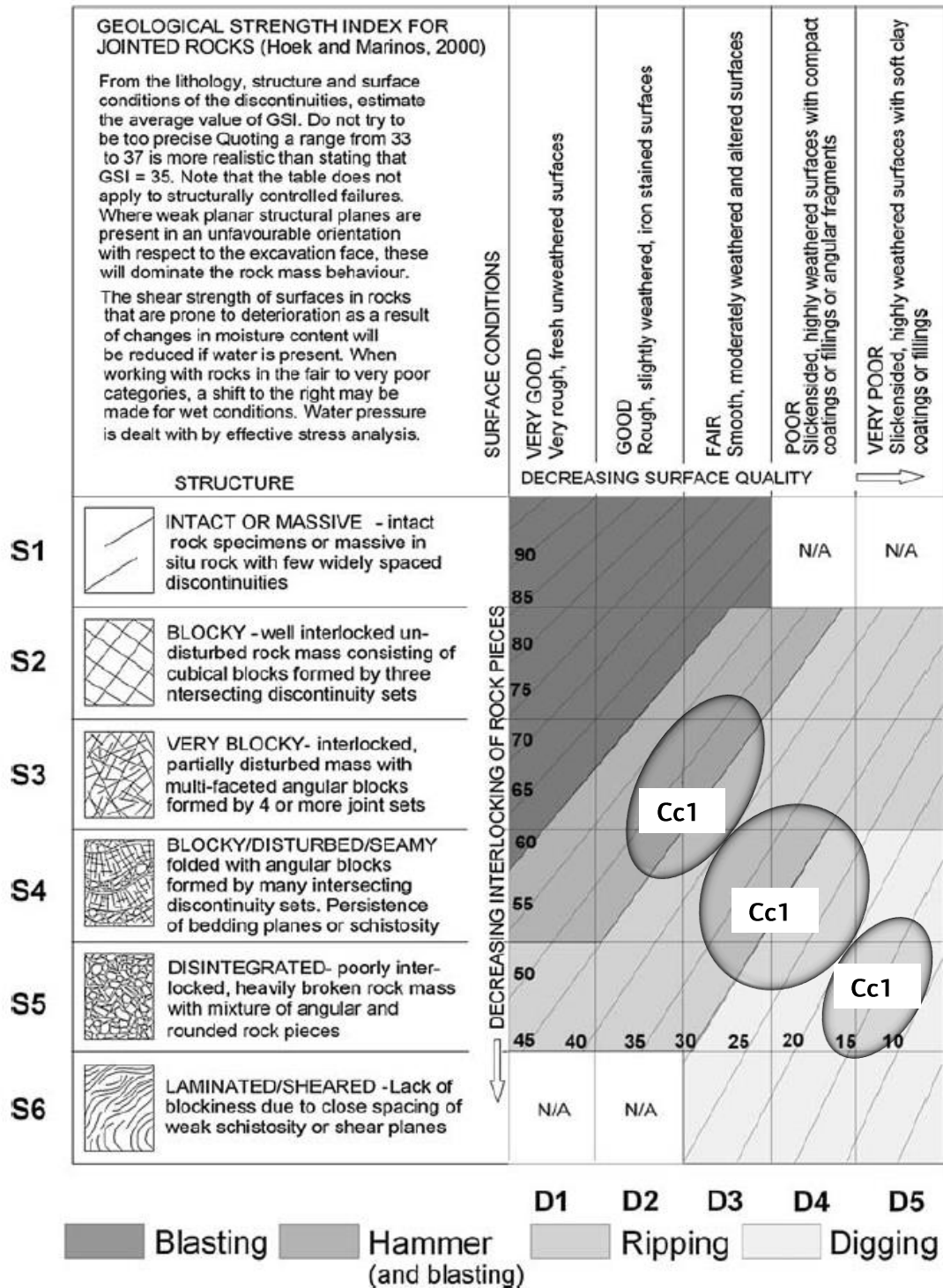


Figura 29 – Avaliação da escavabilidade das Unidades Geotécnicas Cc1b, Cc1d e Cc1c, com base em Tsiambaos e Saroglou (2009)

## 7.2 Avaliação da abrasividade

A avaliação da abrasividade das diferentes formações rochosas que se prevê venham a ser encontradas durante a escavação da estação subterrânea de Campo de Ourique é um fator importante para a estimativa do desgaste esperado dos equipamentos de escavação. Com este objetivo, foram realizados ensaios laboratoriais para determinação do índice de abrasividade (CAI) (ensaio de abrasividade Cerchar) em amostras de rocha, podendo os respetivos resultados ser avaliados com base na literatura internacional (Cerchar, 1986; Michalakopoulos et al., 2006; Rostami et al., 2005; Stanford e Hagan, 2009), conforme se apresenta na tabela seguinte.

Tabela 46 – Classificação da abrasividade das formações rochosas com base no índice de Cerchar (Cerchar, 1986, Stanford e Hagan, 2009, Michalakopoulos et. al, 2006, e Rostami et al., 2005)

Valor CAI	Cerchar, 1986	Michalakopoulos et al., 2006	Universidade Norueguesa de Ciência e Tecnologia (NTNU)	Escola de Minas do Colorado (CSM)
0.3 – 0.5	Não muito abrasivo	Abrasividade muito baixa	Não muito abrasivo	Não muito abrasivo
0.5 – 1.0	Ligeiramente abrasivo	Baixa abrasividade	Ligeiramente abrasivo	
1.0 – 2.0	Abrasividade média a baixa	Abrasividade média	Abrasividade média a baixa	Ligeiramente abrasivo
2.0 – 4.0	Muito abrasivo	Elevada abrasividade	Muito abrasivo	Abrasividade média a baixa
4.0 – 5.0	Extremamente abrasivo	Abrasividade extrema	Extremamente abrasivo	Muito abrasivo
5.0 – 6.0				Quartzítico
6.0 – 7.0	Quartzítico	-	Quartzítico	-

Durante a campanha de investigação geotécnica executada no âmbito do presente estudo de Anteprojecto, foram realizados três (3) ensaios de abrasividade Cerchar em amostras de rocha retiradas do furo SC15-pz. Os resultados correspondentes são apresentados na tabela seguinte.

Tabela 47 – Resultados dos ensaios laboratoriais de agregados para a determinação do Índice de Abrasividade

Furo de sondagem	Profundidade da amostra (m)		Unidade Geotécnica	Índice de Abrasividade CAI	Classificação
	De	Para			
SC15-pz	15.20	16.00	$\beta_{W5;W4/5}$	0.1	Baixa abrasividade
SC15-pz	23.00	24.00	$\beta_{W5;W4/5}$	0.0	Baixa abrasividade
SC15-pz	26.30	26.80	Cc1d	0.9	Abrasividade ligeira

Com base na literatura internacional (Cerchar, 1986; Michalakopoulos et al., 2006; Rostami et al., 2005; Stanford e Hagan, 2009), e nos resultados supramencionados dos ensaios de abrasividade das rochas, as formações rochosas encontradas no local do projeto são caracterizadas por uma abrasividade baixa a ligeira, com valores de CAI entre <0,50 e 1,00. Por conseguinte, estima-se que, devido à natureza dos materiais específicos, em geral, não se espera um desgaste substancial do equipamento de escavação durante a escavação da estação. No entanto, devido ao número limitado de ensaios laboratoriais de abrasividade de rochas realizados em amostras retiradas de furos de sondagem na área do Local do Projeto, bem como devido ao grau variável de diferenciação em termos do grau de meteorização e desintegração dos maciços rochosos encontrados, podem ser encontradas localmente formações com um índice de abrasividade aumentado (CAI>2,0). Assim, para uma estimativa conservadora do desgaste relativo da maquinaria de escavação, as formações encontradas no local do projeto são classificadas com base nas referências acima como "Moderadamente Abrasivas" (CAI~1.0-2.0).

**Registo e Controlo de Alterações**

Revisão	Dados	Descrição
0	2024-09-27	Emissão inicial



---

## 101 ANEXOS



---

## 101.1 Anexo A – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

## 101.1 Anexo A - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Almeida e Sousa, J., Marques, F. e Lemos, L., L. (2001). Análise do Comportamento de um Túnel do Metro de Lisboa Aberto em Argila Miocénica. Geotecnia, Sociedade Portuguesa de Geotecnia, 93; pp 5-32.
- [2] Baguelin, F., Jezequel, J. F., e Shields, D. H. (1978). The pressuremeter and foundation engineering", Trans.Tech. Publ., Alemanha.
- [3] Bowles, J. E. (1997). Análise e projeto de fundações. Quinta edição. McGraw Hill.
- [4] CERCHAR (1986). O Índice de Abrasividade Cerchar. Centre d'études et Recherches de Charbonnages de France, 12S, Verneuil.
- [5] Deere, D. U. (1963). Descrição técnica de núcleos de rocha para fins de engenharia. Felsmechanik und Ingenieurgeologie 1:16-22.
- [6] DIN 1055-2 (2010). Ações em estruturas - Parte 2: Propriedades do solo.
- [7] Earth Manual, Terceira Edição (1991). Departamento do Interior dos EUA, Gabinete de Reclamação.
- [8] Fascículo, nº 62 - Título V. (1993). Regras técnicas de conceção e de cálculo das fundações de obras de engenharia civil. Cahier des clauses techniques générales applicables aux marchés publics de travaux. Ministère de l' Equipement, des transports et du Tourisme, Vol. 182.
- [9] Fernandes, M., M. (1985). Desempenho e análise de uma escavação profunda em Lisboa. 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 12-16 de agosto, São Francisco.
- [10] Fernandes, M., M. (2010). Escavações urbanas profundas em Portugal: prática, projeto, investigação e perspectivas. Solos e Rochas, 33(3), pp. 115-142. Lição Manuel Rocha.
- [11] Ferrão, C., Bezzeghoud, M., Caldeira, B., Borges, J. F. (2016). A Sismicidade de Portugal e da sua Região Atlântica Adjacente de 1300 a 2014: Mapa de Intensidade Máxima Observada (MOI). Seismological Research Letters (2016) 87 (3): 743-750.
- [12] Gambin, M. P. e Rousseau, J. (1988). O Medidor de Pressão Menard: Interpretação e aplicação dos resultados do ensaio do medidor de pressão ao projeto de fundações. General Memorandum, D.60.A.N, SOLS, SOLIS No 26.
- [13] Hobst, L. e Zajic, J. (1983). Anchoring in Rock and Soil. Elsevier Scientific.
- [14] Hoek, E. e Brown, E. T. (2019). O critério de falha Hoek-Brown e GSI - edição de 2018. Jornal de Mecânica das Rochas e Engenharia Geotécnica 11 (2019) 445-463.
- [15] Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Centro de Engenharia Sísmica e Dinâmica de Estruturas, <https://www.lnec.pt>.
- [16] Laranjo, M., L. e Fernandes, M., M. (2021). Resistência ao cisalhamento não drenada de argilas do Miocénico de Lisboa: uma reavaliação com base em resultados de ensaios triaxiais e pressiométricos. SN Ciências Aplicadas, 4:11, <https://doi.org/10.1007/s42452-021-04832-w>.

- 
- [17] Laranjo, M., L. E Fernandes, M., M. (2024). Argilas Miocénicas de Lisboa: Características Físicas e Parametros de Compressibilidade. *Geotecnia, Sociedade Portuguesa de Geotecnia*, ISSN 0379-9522; e-ISSN 2184-8394.
- [18] Marinos, P. e Hoek, E. (2000). GSI: A Geological Friendly Tool for Rock Mass Strength Estimation. *Actas da GeoEng 2000 na Conferência Internacional sobre Engenharia Geotécnica e Geológica, Melbourne, 19-24 de novembro de 2000*, 1422-1446.
- [19] Michalakopoulos, S.T.N., Anagnostou, V.G., Bassanou, M.E., Panagiotou, G.N. (2006). A influência da dureza das pontas de aço no valor do Índice de Abrasividade Cerchar. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 43:321-327.
- [20] Mitchell, J. K. (1976). *Fundamentals of Soil Behavior (Fundamentos do Comportamento do Solo)*. J. Wiley & Sons. Nova Iorque. p.422
- [21] Comando de Engenharia das Instalações Navais (NAVFAC) (1986). *Soil Mechanics Design Manual 7.02*. U.S. Government Printing Office, Washington, D.C. 20402.
- [22] Oliveira, C. S. (1977). *Sismologia, sismicidade e risco sísmico. Aplicações em Portugal. Relatório LNEC. Proc. 36/11/4394*, Lisboa, Portugal.
- [23] Papadopoulos, B. P., e Anagnostopoulos, A. G. (1987). Efeitos das águas subterrâneas na estimativa de assentamentos. *9th Europ. CSMGE, Dublin, Vol. 2*, pp725-729.
- [24] Pedro, A., Zdravković, L., Potts, D. e Almeida e Sousa, J. (2017). Caracterização geotécnica das formações miocénicas na localização do poço de Ivens, Lisboa. *Revista Trimestral de Geologia de Engenharia e Hidrogeologia*, <https://doi.org/10.1144/qjgeh2016-139>.
- [25] Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA). <https://www.ipma.pt/en/>.
- [26] Quiñones-Rozo, C. (2010). A interpretação do teste Lugeon, revisitada. In: *Gestão Colaborativa de Bacias Hidrográficas Integradas. Actas da 30ª Conferência Anual da USSD, Sacramento, CA. Denver: Sociedade Americana de Barragens, 2010: 405-14*.
- [27] Rostami, J., Ghasemi, A., Gharahbagh, E. A., Dogrouz, C., Dahl, F. (2010). Estudo dos Factores Dominantes que Afectam o Índice de Abrasividade do Cerchar. *Journal of Rock Mechanics and Rock Engineering*, v. 47, p. 1905-1919.
- [28] Sowers, G.F. (1979). *Introductory Soil Mechanics and foundations. Geotechnical Engineering, 4ª ed.*, Macmillan, Nova Iorque.
- [29] Stanford, J., Hagan, P. (2009). Uma avaliação do impacto da metalurgia do estilete no Índice de Abrasividade do Cerchar. Aziz, n(ed), *Coal 2009: Coal Operators' Conference, University of Wollongong & the Australasian Institute of Mining and Metallurgy*, p. 348-355.
- [30] Stroud, M. A. (1974). The Standard Penetration Test in Insensitive Clays and Soft Rocks *Proceedings of the European Symposium on Penetration Testing, Stockholm, June 5-7, 1974* 2(2): 367-375.
- [31] Técnicas Louis Menard, Menard Inc. (1975). *The Menard Pressuremeter, Interpretation and Application of Pressuremeter Test Results to Foundation Design*.
- [32] Terzaghi, K. e Peck, R. B. (1967). *Soil Mechanics in Engineering Practice*. J. Wiley & Sons.
- [33] Tomlinson, M. J. (2001). *Projeto de estacas e prática de construção. Sétima edição*. Pearson Education Limited.

- 
- [34] Tsiampaos, G. e Saroglou, H. (2010). Avaliação da escavabilidade de maciços rochosos utilizando o Índice de Resistência Geológica (GSI). Bull Eng Geol Environ (2010) 69:13-27.

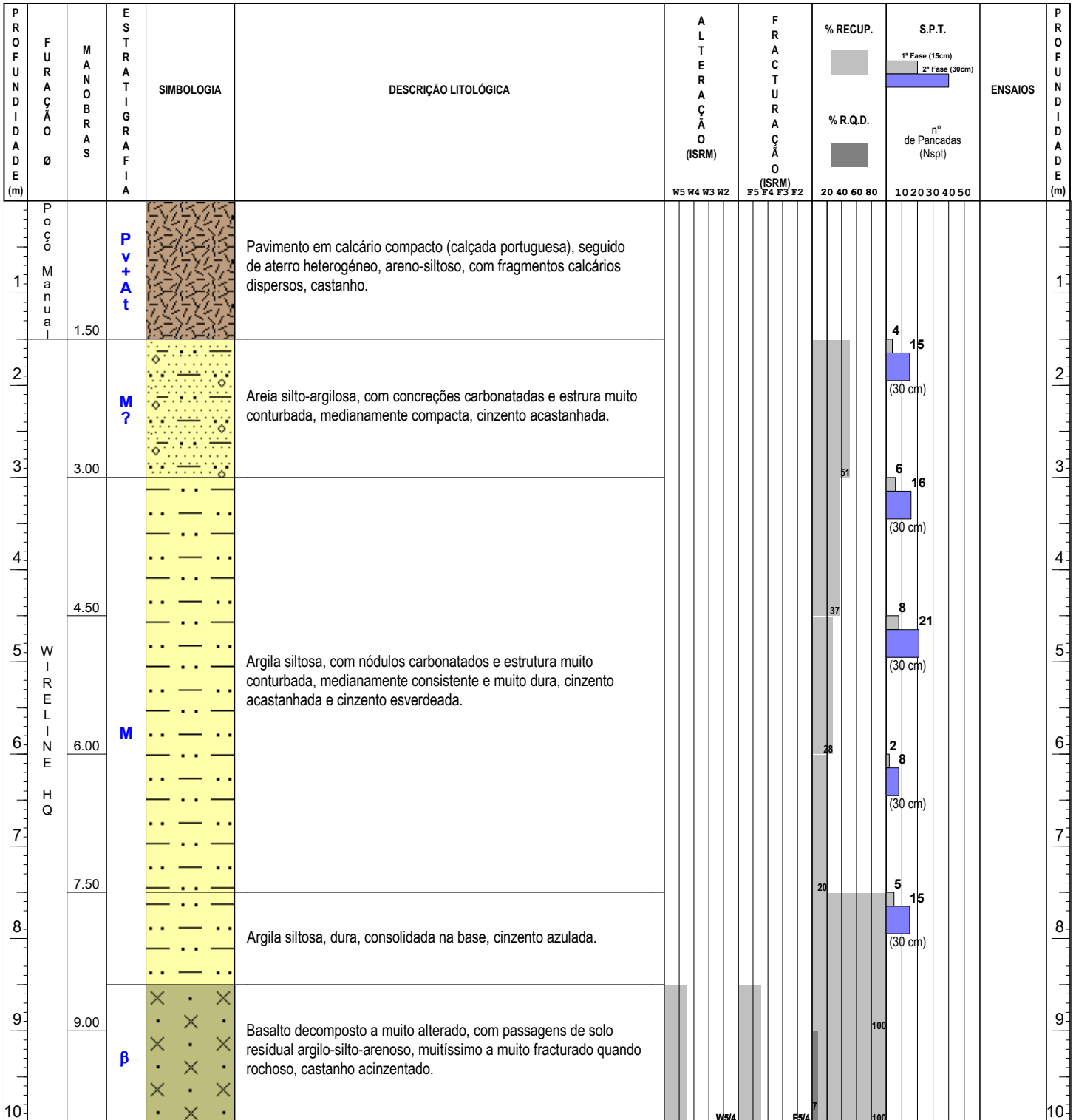
---

## 101.2 Anexo B – REGISTOS E FOTOGRAFIAS DE FUROS DE SONDAGEM



Data de Início	Equipamento	Prof. Final (m)
26/10/2021	Geo-046 Comacchio GEO 601	48

Data de Fim	Nível Freático	Inclinação	Sistema	Coordenadas	Cota	Sondador	Técnico
4/11/2021		90°	PT-TM06 (ETRS89)	M= -89786.588 P= -105027.564	Z= 92.865	Tiago Comba	Paulo Correia



Observações : Ocorreu perda de circulação de água a partir de 16.50m de profundidade.

Entidade :



Obra :

**Metropolitano de Lisboa**  
**Campanha Geotécnica e Geoambiental do**  
**Prolongamento da Linha Vermelha Sul**

Data de Início  
**26/10/2021**

Equipamento  
Geo-046 Comacchio GEO 601

Prof. Final (m)  
**48**

Data de Fim  
**4/11/2021**

Nível Freático

Inclinação  
**90°**

Sistema  
PT-TM06 (ETRS89)

Coordenadas  
M= **-89786.588** P= **-105027.564**

Cota  
Z= **92.865**

Sondador  
**Tiago Comba**

Técnico  
**Paulo Correia**

P R O F U N D I D A D E (m)	F U R A Ç Ã O Ø	M A N O B R A S	E S T R A T I G R A F I A	S I M B O L O G I A	D E S C R I Ç Ã O L I T O L Ó G I C A	A L T E R A Ç Ã O (ISRM)			F R A C T U R A Ç Ã O (ISRM)			% RECUP.	S.P.T.		E N S A I O S	P R O F U N D I D A D E (m)		
						W5	W4	W3	W2	F5	F4	F3	F2	20			40	60
10.50				X . X X . X	Idem.													
11				X X X X X X X X X X X X	Basalto, com abundantes veios calcíticos, algo friável, muito a medianamente alterado, com passagens decompostas (W5) de dimensão centimétrica a decimétrica, muito fracturado, acinzentado e acastanhado com veios esbranquiçados.		W5/4											
12			B															
12.00				X X X X X X X X X X X X	Idem, muito a medianamente alterado.													
13																		
13.50				X X X X X X X X X X X X	Calcário nodular, muito alterado, com evidências de carsificação (terra rossa de espessura centimétrica), muitíssimo a muito fracturado, esbranquiçado e avermelhado.		W4/3											
14																		
14.00				X X X X X X X X X X X X	Idem, muito a medianamente alterado.		W4											
15																		
15.00				X X X X X X X X X X X X	Idem, muito alterado, algo margoso na base.		W4/3											
16																		
16.50				X X X X X X X X X X X X	Calcário compacto a cristalino, muito a medianamente alterado, com vestígios de dissolução cársica nas fracturas, muitíssimo a muito fracturado, por vezes com troços decimétricos sem formação de carote, esbranquiçado e castanho avermelhado.		W4											
17																		
17.00				X X X X X X X X X X X X	Idem, muito alterado, algo margoso na base.		W4											
18																		
18.00				X X X X X X X X X X X X	Calcário compacto a cristalino, muito a medianamente alterado, com vestígios de dissolução cársica nas fracturas, muitíssimo a muito fracturado, por vezes com troços decimétricos sem formação de carote, esbranquiçado e castanho avermelhado.		W4											
19																		
19.50				X X X X X X X X X X X X	Idem, muito alterado, algo margoso na base.		W4											
20																		

Observações : **Ocorreu perda de circulação de água a partir de 16.50m de profundidade.**

Legenda : (5) - Ensaio de Permeabilidade "LUGEON"