



cfms

COMITÉ FRANÇAIS DE MÉCANIQUE
DES SOLS ET DE GÉOTECHNIQUE

Regards croisés sur la pratique de la géotechnique à l'international

Deux projets de tunnels au Portugal: Phases et méthodes d'étude

C. JASSIONNESSE DT-SES SBGC – 11 OCTOBRE 2022

spie batignolles

/génie civil



cfms

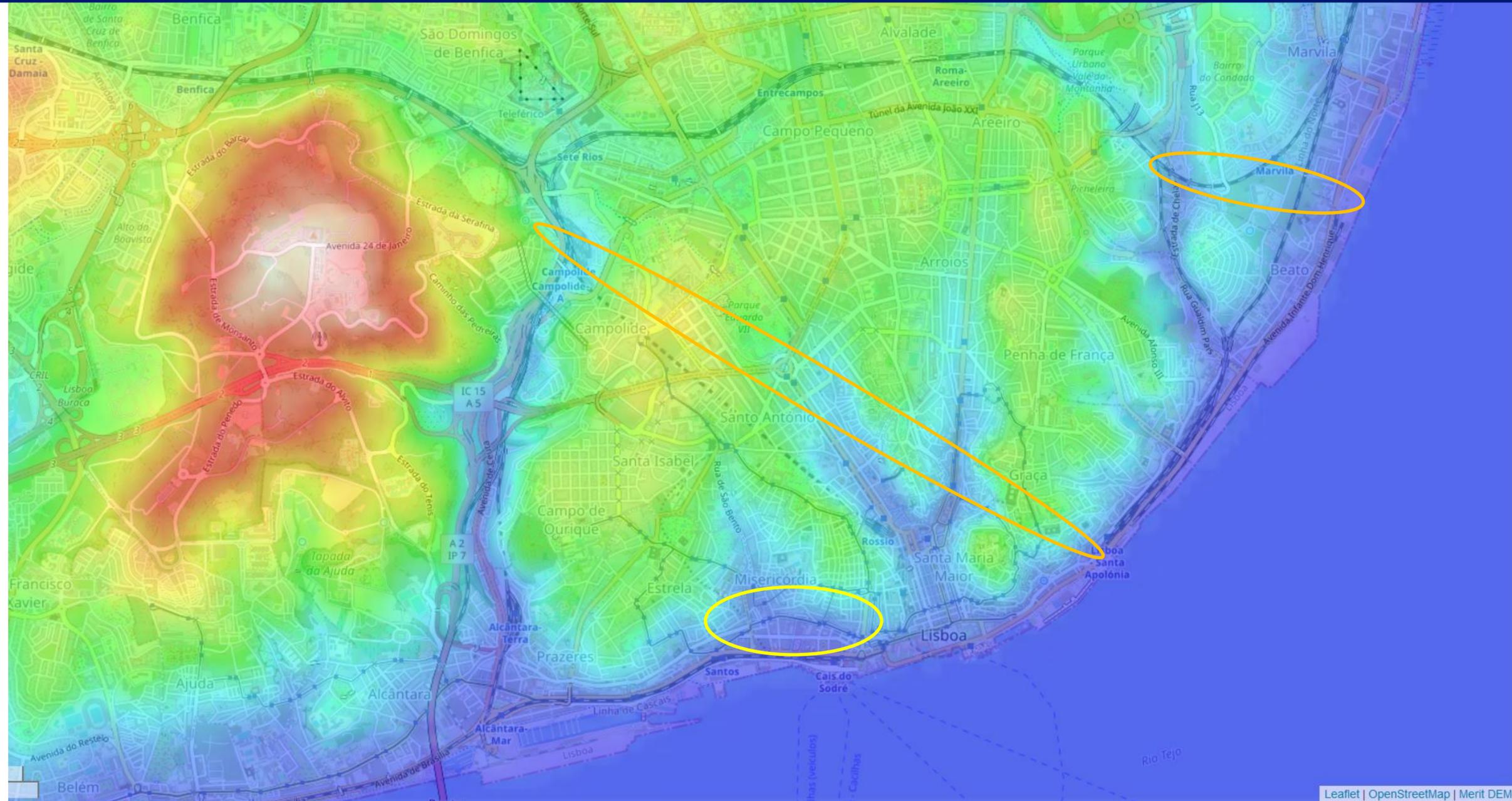
COMITÉ FRANÇAIS DE MÉCANIQUE
DES SOLS ET DE GÉOTECHNIQUE

Le contexte général

Le site de Lisbonne



Le relief



Géologie: les horizons traversés

Metro – Prolongement de la ligne jaune – Lot 2

Tunnel de drainage Monsanto – Santa Apolonia



Aquitainiano	M_{Pr}	Argilas de Prazeres (M ₁)
--------------	-----------------------	---------------------------------------



MESOZÓICO	Cretácico	Cretácico Superior	Cenomaniano superior	β¹	Complexo Vulcânico de Lisboa (*) Rochas piroclásticas - β _p ¹ (**) Filões e chaminés de basalto - β
				G_{Bi}²	Formação de Bica: calcários com rudistas (inclui o nível com <i>Neolobites vibrayeanus</i>)
				G_{Cr}²	Formação de Caneças: calcários, margas, arenitos e dolomitos
	Cretácico Inferior	Albiano sup. a Cenomaniano méd.			

Géologie: les horizons traversés

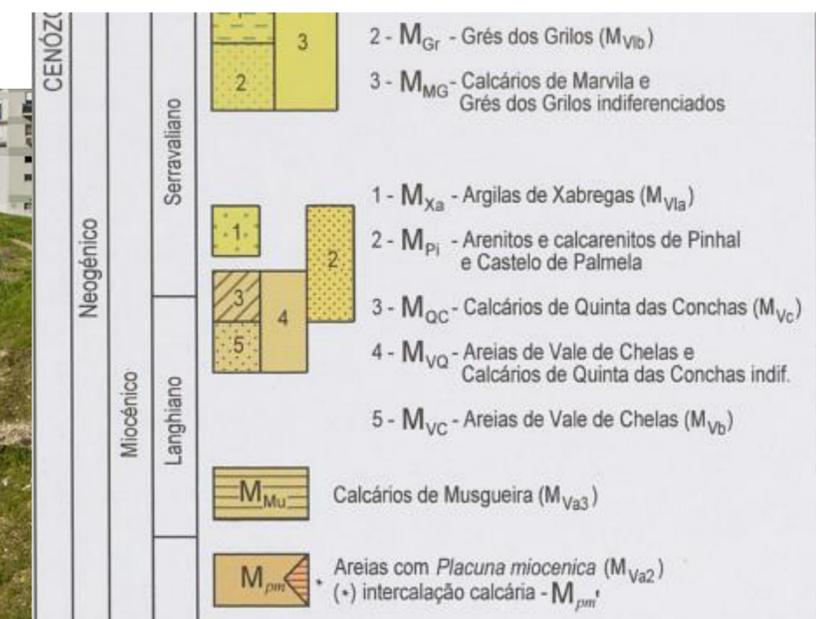
Tunnel de drainage Monsanto – Santa Apolonia



Burdigalieno	M_{QB}	Areias de Quinta do Bacalhau (M_{IVb})
	M_{FT}	Argilas de Forno do Tijolo (M_{IVa})
	M_{Ec}	Calcários de Entrecampos ("Banco Real") (M_{III})
	M_{Es}	Areolas de Estefânia (M_{II})
Aquitainiano	M_{Pr}	Argilas de Prazeres (M_I)

Géologie: les horizons traversés

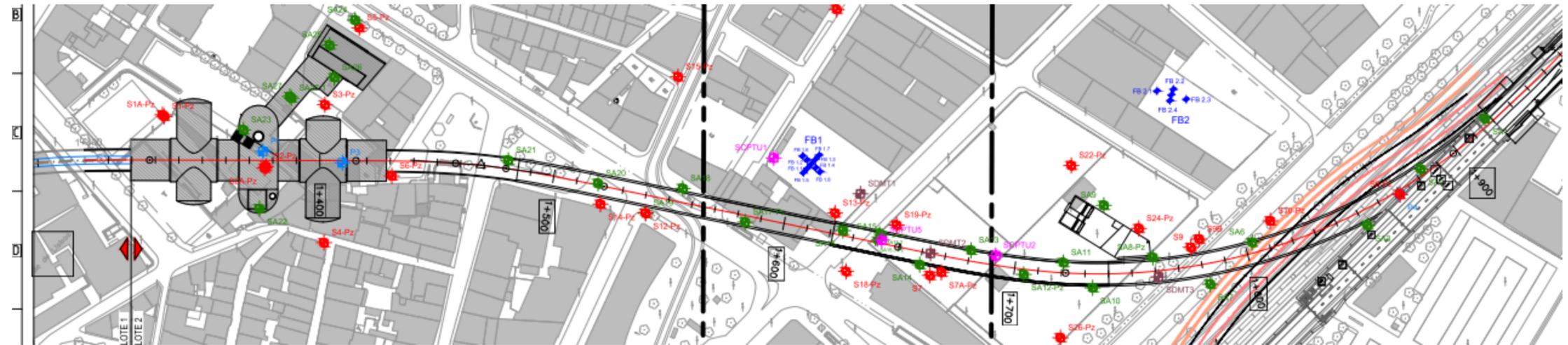
Tunnel de drainage Chelas – Beato



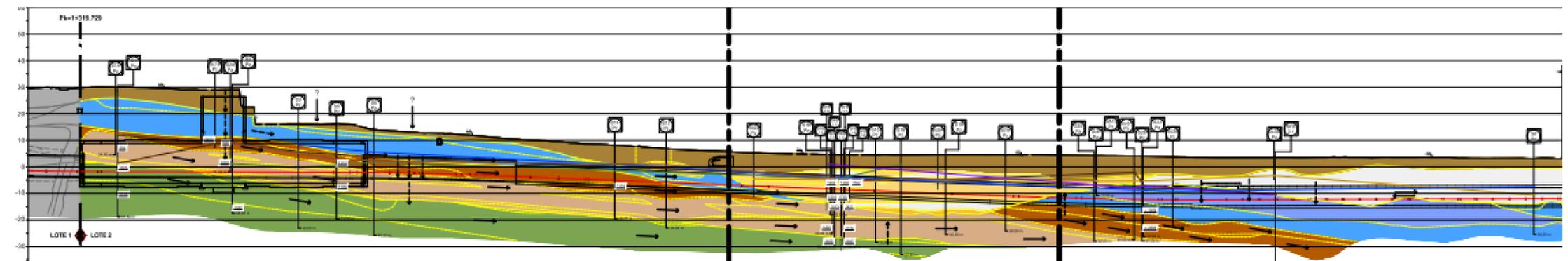
Les projets: prolongement de la ligne de métro « jaune »



Metropolitano de Lisboa

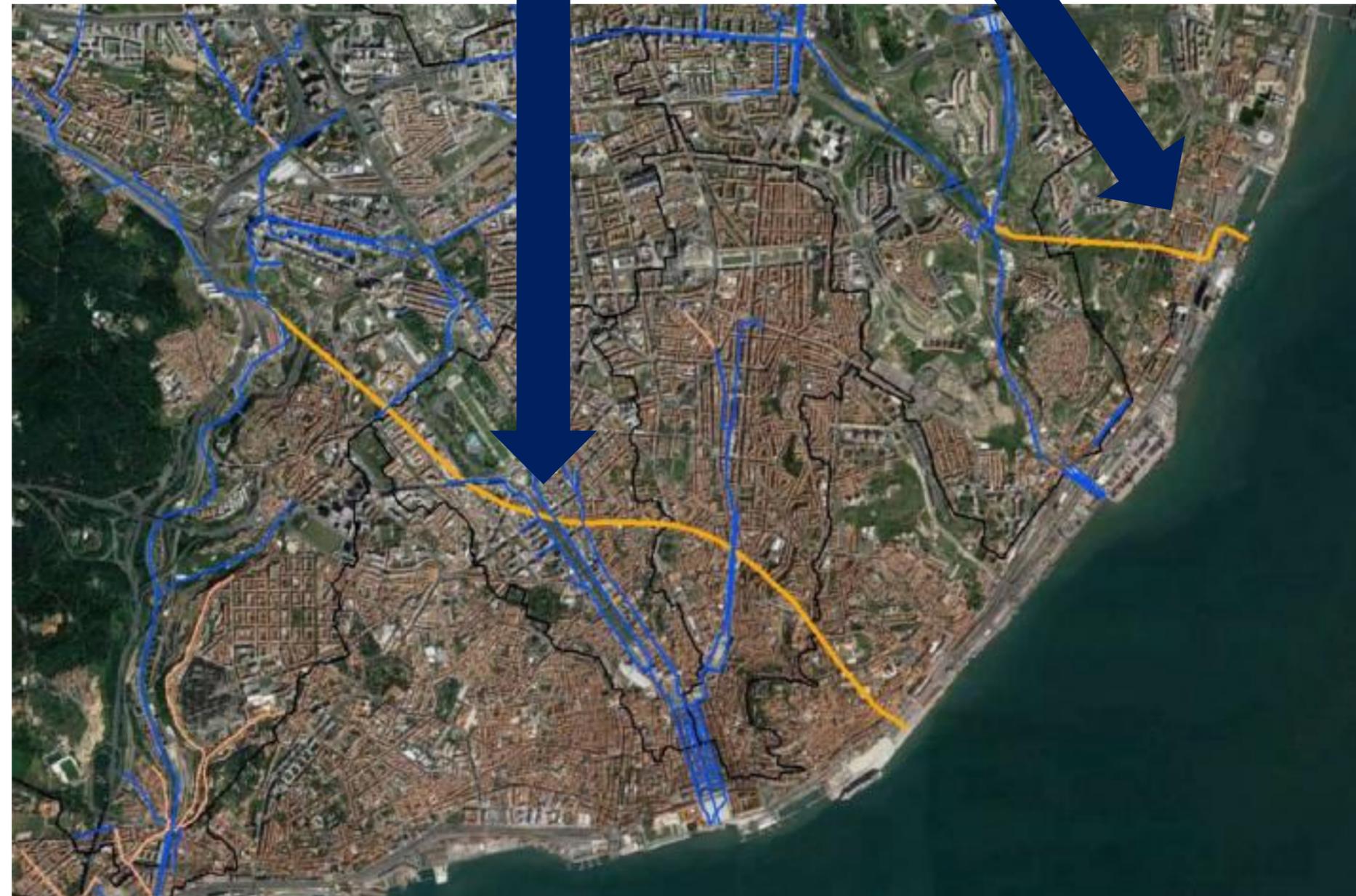


≈ 550 m

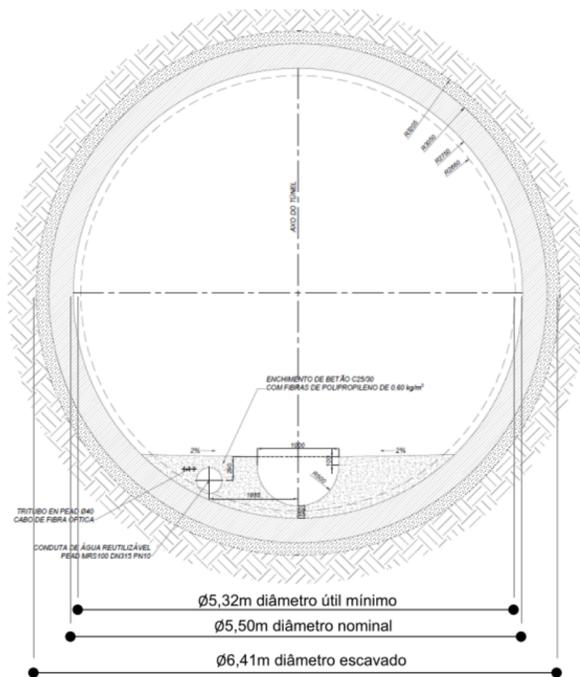


≈ 110 m

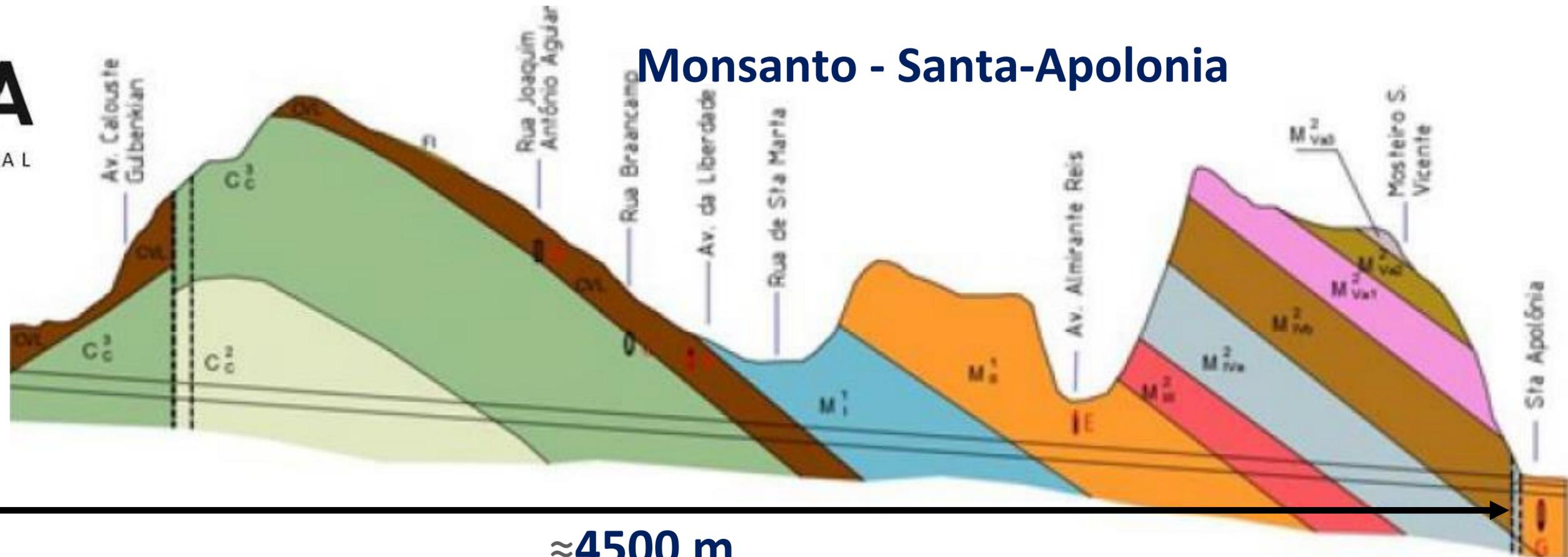
Les projets: Tunnel de drainage « Monsanto-Santa Apolonia » Tunnel de drainage « Chelas-Beato »



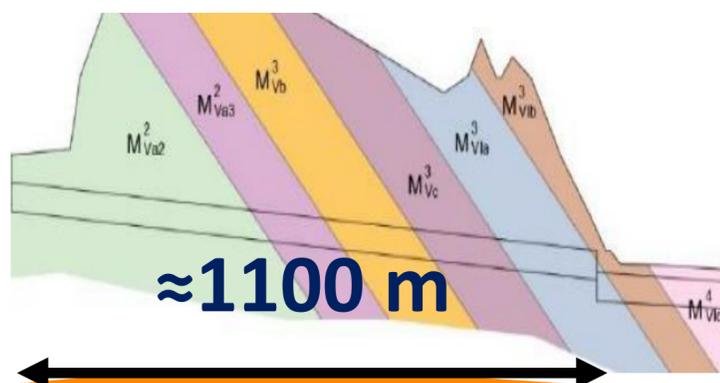
Les projets: Tunnel de drainage « Monsanto-Santa Apolonia » Tunnel de drainage « Chelas-Beato »



Monsanto - Santa-Apolonia



Chelas - Beato



Les acteurs et les phases



Metropolitano de Lisboa



LISBOA
CÂMARA MUNICIPAL



Projet Préliminaire (PP)



Avant-Projet (EP, concours)



Projet d'Exécution (PE)



Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



TÚNEIS DE DRENAGEM DE LISBOA



Les reconnaissances



PP

EP (AVP)

PE

PP

EP (AVP)

PE

Sondages	25	3	41
SPT	235	27	311
PMT	22		39
Lefranc/Lugeon	46	2	51
PZ	8	2	19
Divers:			
Cross-Hole	1		1
CPTu+S	4		
DMT+S	3		
Scissomètre	6		

Sondages	46		26
SPT	oui		oui
PAF/PMT	13		≈16
Lefranc/Lugeon	oui		oui
PZ	36		5
Divers:			
Cross-Hole	1		
MASW			2

Les paramètres géotechniques retenus



Metropolitano de Lisboa

Tabela 46 – Valores característicos dos parâmetros a adotar no projeto de execução

Unidade	γ (kN/m ³)	γ_{sat} (kN/m ³)	c_u (kPa)	E_u (MPa)	c' (kPa)	ϕ' (^o)	E' (MPa)	K_0	k (m/s)	ν	σ (MPa) [rocha]	E' (GPa) [rocha]
At	18	20	---	---	0	29	5	0,5	10 ⁻⁵	0,35	---	---
a(ag)	17	19	* (40)	20	0	28	4	0,5 - 0,7**	10 ⁻⁸	0,46	---	---
a(ar) _a	19	21	---	---	0	37	78	0,5	10 ⁻⁴	0,30	---	---
a(ar) _b	18	20	---	---	0	33	22	0,4	10 ⁻⁵	0,32	---	---
a(cg)	20	22	---	---	0	35	75	0,5	10 ⁻⁶	0,30	---	---
M(ag) _a	22	23	338	98	10	33	61	0,8 - 1,0 **	10 ⁻⁸	0,33	7	1
M(ag) _b	21	22	186	39	0	28	19	0,8 - 1,0 **	10 ⁻⁸	0,38	---	---
M(cal)	24	24	---	---	75	34	400	0,8 - 1,0 **	10 ⁻⁵	0,25	7	7
β_a	27	27	---	---	160	40	2000	0,7 - 1,0 **	10 ⁻⁸	0,25	30	16
β_b	25	25	---	---	60	38	500	0,5	10 ⁻⁶	0,26	6	3
β_c	23	24	---	---	50	34	254	0,5	10 ⁻⁶	0,28	---	---
τ_a	21	22	---	---	60	35	228	0,5 - 1,0 **	10 ⁻⁷	0,27	5	0,5
τ_b	20	21	---	---	30	30	83	0,5	10 ⁻⁷	0,30	---	---
Cc1a	23	24	---	---	50	32	60	0,5 - 1,0 **	10 ⁻⁶	0,23	4	1
Cc1b	24	24	---	---	100	38	400	0,5 - 1,0 **	10 ⁻⁷	0,21	9	3
Cc1c	25	25	---	---	300	40	3900	0,7 - 1,0 **	10 ⁻⁶	0,21	53	27

* $c_u = 2,157z + 5,886$

** Recomendável fazer análises de sensibilidade

Les paramètres géotechniques retenus



Avant-Projet (EP, concours)

trois zones principales ont été définies, puis subdivisées, d'abord en fonction de leur nature et de leur position stratigraphique, à savoir :

ZG3, en réunissant les sols de couverture ou décomprimés ;

ZG2, en rassemblant les sols du substrat et éventuellement des roches tendres ;

ZG1, intégrant le massif rocheux du substrat.

Zona Geotécnica	Sub-zona	Complexos geológicos/Estratigrafia	Litologias	Descrição	Designação
ZG3	B	Aluviões quaternárias e aterros actuais, misturas indiferenciadas de aluviões e aterros	1. Aterros/aluviões	Areias, argilas arenosas, seixos, lodos muito soltos a soltos e/ou muito moles a medianamente consistentes	ZG3B(1)
	A	Aterros actuais	2. Aterros	Materiais heterogéneos de dimensões e natureza variadas (areias, seixos, cerâmica) em geral medianamente compactos	ZG3A(2)
		Miocénico descomprimido	3. Miocénico superficial descomprimido	Solos de natureza argilosa e areno-siltosa medianamente compactos	ZG3A(3)
ZG2	B	Formações do Miocénico	1. Areias miocénicas	Areias siltosas e argilosas, areias finas, por vezes com seixos rolados ou com intercalações argilo-arenosa, compactas	ZG2B(1)
			2. Argilas miocénicas	Argilas siltosas e arenosas, margas e siltes arenosos com intercalações arenosa, muito rijas	ZG2B(2)
	A	Formações do Miocénico e do Complexo Neocretácico Vulcânico de Lisboa (CVL)	1. Areias miocénicas	Areias siltosas e argilosas, areias finas, por vezes com seixos rolados ou com intercalações argilo-arenosa, muito compactas	ZG2A(1)
			2. Argilas miocénicas	Argilas siltosas e arenosas, margas e siltes arenosos com intercalações arenosa, muito rijas	ZG2A(2)
			3. Piroclastos do CVL	Tufos argilosos muito compactos, eventualmente rochas brandas	ZG2A(3)

Les paramètres géotechniques retenus

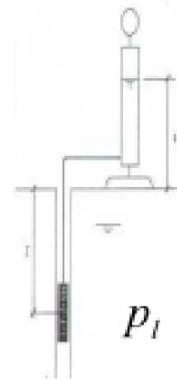
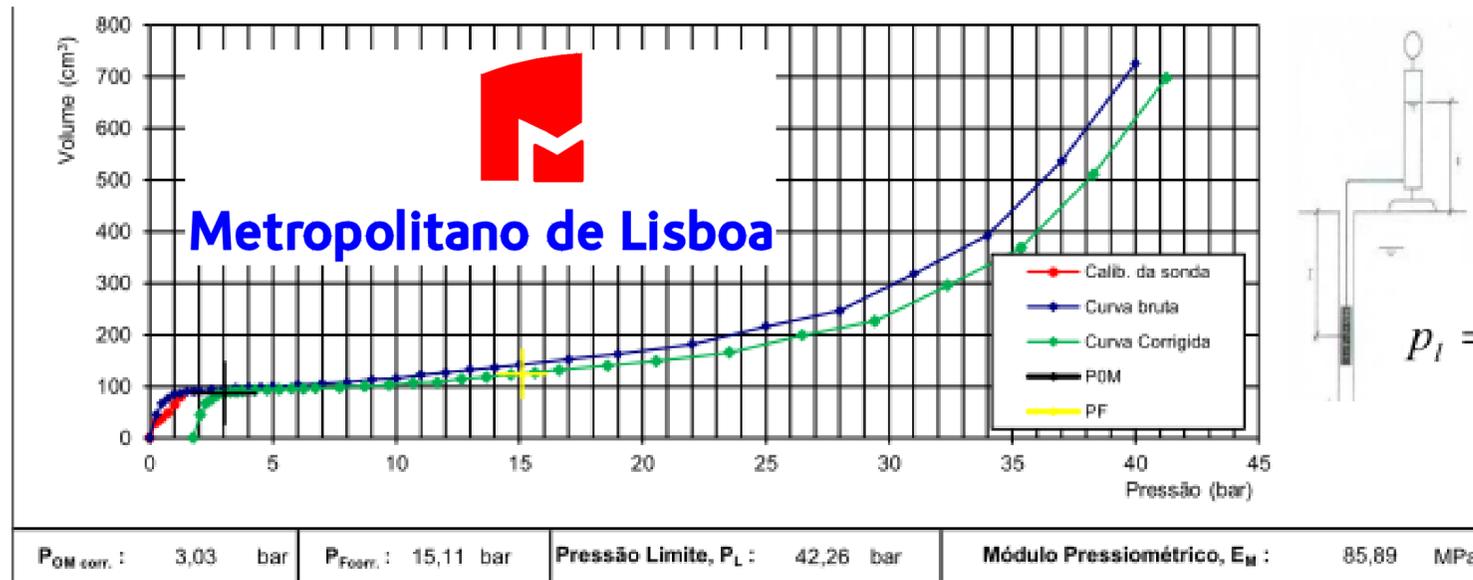


Projet d'Exécution (PE)

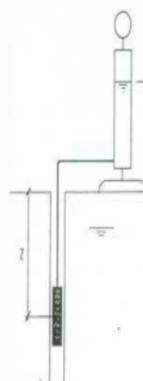
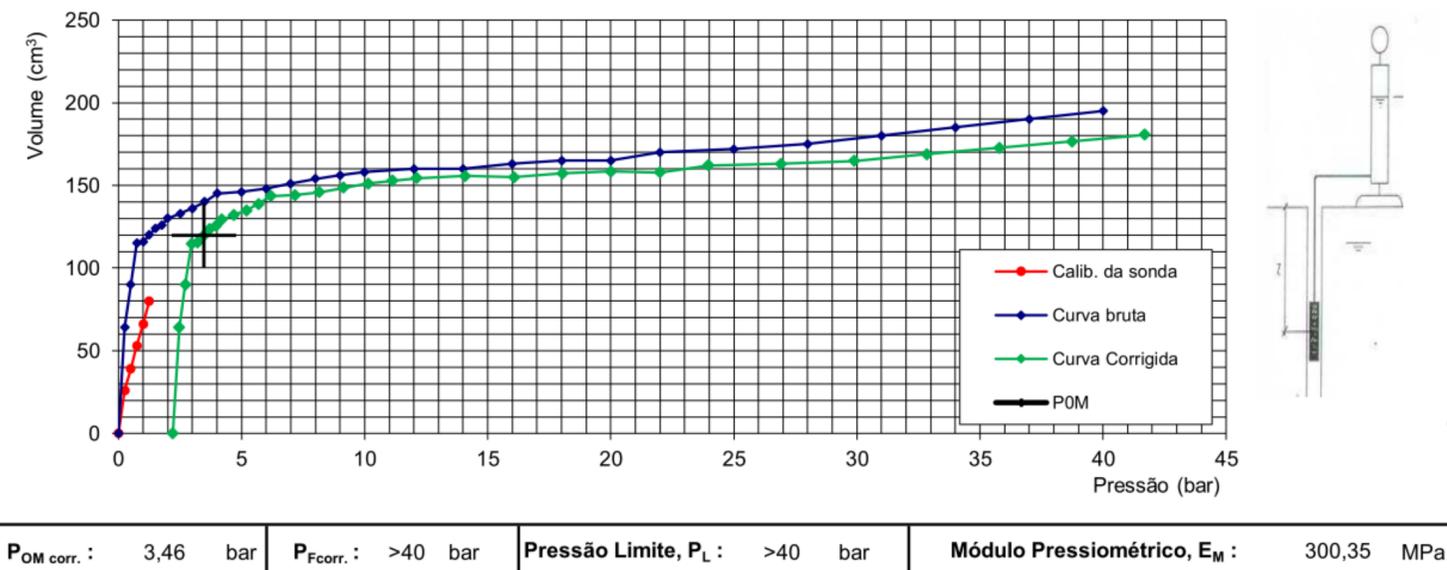
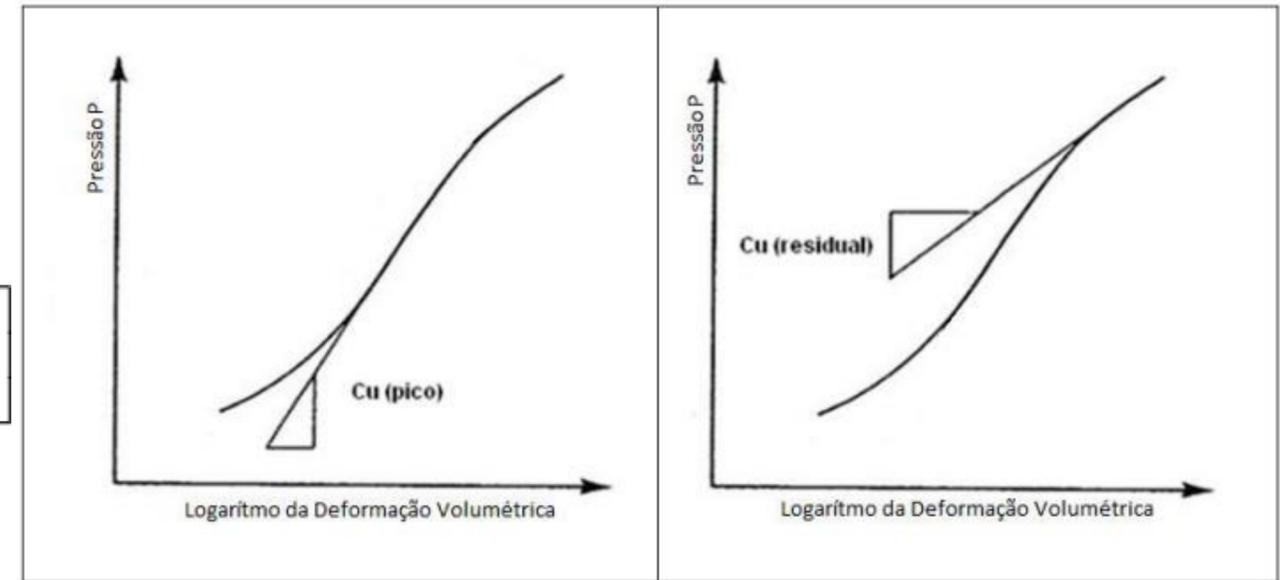
Quadro 3.2 – Parâmetros geotécnicos de dimensionamento

Zona Geotécnica	Designação EP	Designação PE	γ (kN/m ³)	c' (kPa)	ϕ' (°)	cu (kPa)	k ₀	Es (MPa)	E50 (MPa)	v	k (m/s)	Critério de Hoek-Brown								
												GSI	sigci (MPa)	mb	s	a				
ZTM7	ZG3B(1)	ZTM7.2	19	0	28-30	-	0,5	8 - 15	5 - 10	0,35	1X10 ⁻⁵ -1X10 ⁻⁷ {10 ⁻⁶ }	-	-	-	-	-				
	ZG3A(2)	ZTM7.1	19-20	0	30-32	-	0,5	15 - 25 {20}	10 - 20 {15}	0,35		-	-	-	-	-				
ZTM8	ZG3A(3)	ZTM-6.7	20-21	0-40 {0-5(ar)} {10(arg)}	30-33(ar) 25-32(arg)	80-150 {100}	0,5	Es=20-40 {25} Eu=24-45 {30}	14 - 25 {17}	0,35	-	-	-	-	-					
	ZG2B(2)	ZTM-6.6	21	5-40 {25}	30 - 38 {36}	14,4*z+25	[0,3 - 2,7] {0,5-0,8}	5,61*z+9,75	3,74*z+6,50	0,3	2X10 ⁻⁹ -8X10 ⁻⁷ {5x10 ⁻⁸ }	-	-	-	-	-				
	ZG2A(2)	ZTM-6.5	21	5-40 {25}	34 - 40 {36}							-	-	-	-	-	-	-	-	-
	ZG2B(1)	ZTM-6.4	21	0-20 {10}	34-40 {38}	-	[0,3 - 1,4] {0,5-0,8}	36*z^0,5	24*z^0,5	0,3	2X10 ⁻⁹ -3X10 ⁻⁵ {10 ⁻⁷ }	-	-	-	-	-				
	ZG2A(1)	ZTM-6.3	21	0-20 {10}	36-40 {38}							-	-	-	-	-	-	-	-	-
		ZTM-6.2	21-22	5-40 {30}	36 - 40 {38}							38,75*z+52,97	0,5-0,8 {0,6}	17,46*z+23,9	11,64*z+15,91	0,3	1x10 ⁻⁹ -1x10 ⁻¹¹ {10 ⁻¹⁰ }	-	-	-
		ZG1B(1)	ZTM-6.1	19-23	-	-	-	[0,3 - 1,4] {0,3}	2700	1800	0,2	8X10 ⁻⁷ -2X10 ⁻⁵ {10 ⁻⁶ }	45	8	2,384	0,00220	0,508			
ZTM5	-	ZTM-5	21	0-40 {20}	34-38 {35}	13,3*z+100(arg)	0,8-0,9	6*z+45 (arg)	4*z+30 (arg)	0,3	1X10 ⁻⁷ -1X10 ⁻⁸	-	-	-	-	-				
ZTM4	-	ZTM-4	21-22	-	-	-	-	-	120	0,28	-	20	3	0,459	0,00014	0,544				
ZTM3	-	ZTM-3.2	23	-	-	-	0,25	-	1300	0,22	4X10 ⁻⁹ -6X10 ⁻⁸	40	13	0,939	0,0013	0,511				
	ZG1B(3)	ZTM-3.1	23-26	-	-	-	0,25	-	7000	0,2	1X10 ⁻⁷ -9X10 ⁻⁷	55	27	1,604	0,0067	0,504				
ZTM2	-	ZTM-2.2	21-23	40-80	25-28	150-250	0,5-0,6	-	60-100	0,3	1X10 ⁻⁷	-	-	-	-	-				
	ZG1A(4)	ZTM-2.1	23-26	-	-	-	0,2	-	8000(Cc) 1000(Cn)	0,2	5X10 ⁻⁸ -1X10 ⁻⁵ {6X10 ⁻⁷ -2X10 ⁻⁶ }	50(Cc) 43(Cn)	35(Cc) 11(Cn)	2,012(Cc) 1,567(Cn)	0,0039(Cn) 0,0018(Cn)	0,506(Cn) 0,509(Cn)				
ZTM1	ZG2A(3)	ZTM-1.4	20	30-50	33-36	350-450	0,47	-	60-90	0,3	1x10 ⁻⁶ -6x10 ⁻⁹	-	-	-	-	-				
	ZG1B(2)	ZTM-1.3	21	50-70	36-40	700-950	0,47	-	110-140	0,3		-	-	-	-	-				
	ZG1A(5)	ZTM-1.2	24-26	-	-	-	0,2	-	450-650	0,2	3X10 ⁻⁸ -3X10 ⁻⁹	39	15	2,830	0,0011	0,512				
		ZTM-1.1	27-30	-	-	-	0,2	-	30000	0,2		60	80	5,991	0,0117	0,503				

Les interprétations des essais: Exploitation de l'essai pressiométrique

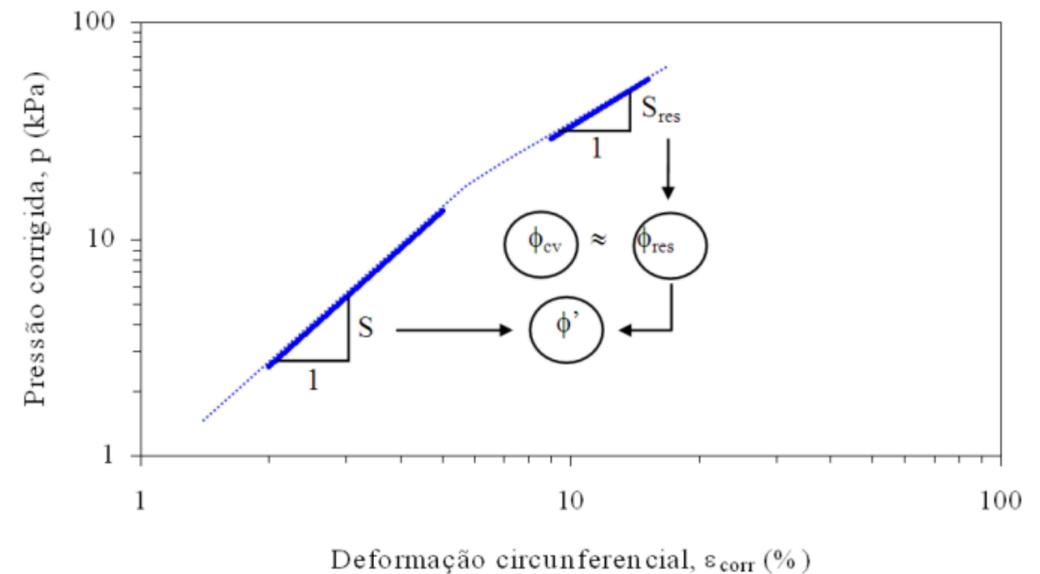


$$p_l = \sigma_{h0} + c_u \left[1 + \ln \left(\frac{G}{c_u} \right) \right]$$



$$\begin{cases} \text{sen} \phi_{res} = \frac{S_{res}}{1 - S_{res}} \\ \text{sen} \phi' = \frac{(1 - S_{res})S}{(S - 2)S_{res} + 1} \end{cases}$$

$$\text{sen}(\psi) = s + (s - 1) * \text{sen} \phi_{cv}$$



Les interprétations des essais: Corrélations



Classification unifiée des sols (USCS) SM, SC, ML, MH, CL et CH

Cohésion

(1) c' (Kpa) estimation prudente = $0,1 \times c_u$

(2) c_u (kPa) = $4,65$ à $6,25 \times \text{NSPT}$

(3) c_u (kPa) = $\text{PL}^*/5,5$

(4) c_u (kPa) = $(\text{PL}^*/10) + 5$

Angle de frottement:

(5) ϕ' (°) = $27,1 + 0,3 \times (\text{N1})60 - 0,00054 \times [(\text{N1})60]^2$

(6) ϕ' (°) = $(20 \times \text{NSPT})^{1/2} + 20$

(7) ϕ'_{nc} (°) = $39 - 11 \times \log(\text{IP})$

(8) $\sin(\phi'_{nc})$ (°) = $-0,1 \times \ln(\text{IP}) + 0,8$

(9) ϕ'_{nc} (°) = $\arcsin(0,8 - 0,094 \ln(\text{IP}))/1,10$

(10) ϕ'_{nc} (°) = $35,7^\circ - 2,8 \times (\text{IP}) + 0,00145 \times (\text{IP})^2 \pm 8^\circ$

(11) $\sin(\phi'_{nc})$ (°) = $0,8 - 0,094 \times \ln(\text{IP})$

(12) $P_{lim} = b \times 2^{(\phi' - 24)/4}$ où b varie de $1,8$ (sols saturés) à $3,5$ (sols secs)

Module:

(12) E_{oed} (Mpa) = $\text{Dans} / 0,5 - 0,67$ (types de sols ML, MH, CH et CL)

(13) E_{oed} (Mpa) = $E_n / 0,25 - 0,33$ (types de sols SM et SC)

(14) $E_{oed} / \text{PL}^* = 16 \times (\text{PL}^* / \text{P0})^{1/2}$ (Mpa)

(15) E_s (Mpa) = $0,5 - 1,0 \times \text{NSPT}$ sur sols fins et $1,0 - 1,2 \times \text{NSPT}$ sur sols granulaires

(16) E_s (Mpa) = $0,3 \times \text{NSPT} + 1,8$ pour les granulats fins

K_0 :

(17) $K_0 = 1 - \sin(\phi')$

(18) $K_0 = 0,19 + 0,233 \times \log(\text{IP})$

Les données de référence



FEUP FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

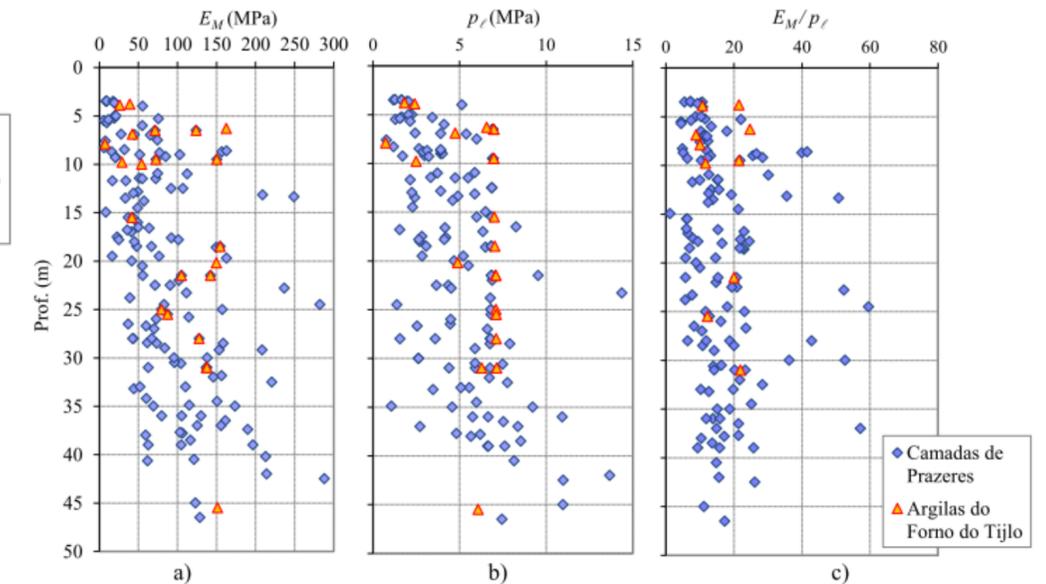
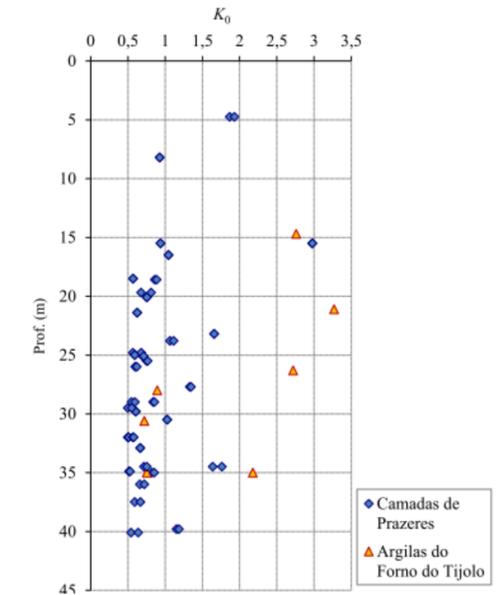
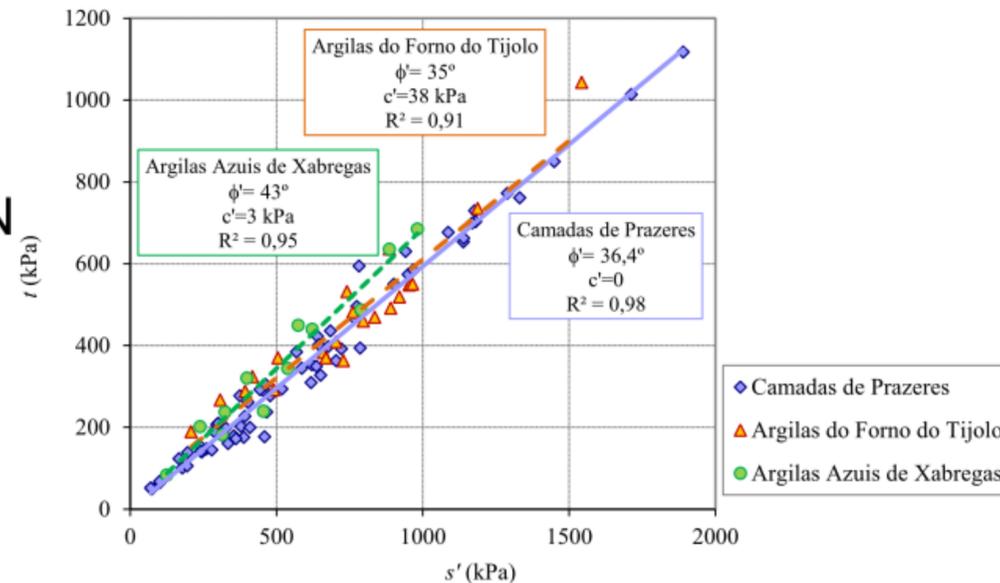
ARGILAS MIOCÉNICAS DE LISBOA PARAMETRIZAÇÃO PARA O DIMENSIONAMEN DE ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS

Mafalda Reis Lima Lopes Laranjo

Dissertação submetida para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil na
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Quadro 9.9 – Resistência não drenada em compressão para as argilas do Miocénico de Lisboa

Unidade	$c_{u, \min}$ (kPa)	$c_{u, \max}$ (kPa)
Camadas de Prazeres	$c_{u, \min} = 10,76 \cdot z + 15,82$	$c_{u, \max} = 27,93 \cdot z + 41,06$
Argilas do Forno do Tijolo	$c_{u, \min} = 17,90 \cdot z + 201$	$c_{u, \max} = 7,23 \cdot z + 81,24$
Argilas Azuis de Xabregas	$c_{u, \min} = 14,25 \cdot z + 19,47$	$c_{u, \max} = 38,75 \cdot z + 52,97$



Les travaux: à suivre...



Merci de votre attention