

Injecção de caldas cimentícias em terrenos arenosos. Modelação física

João Bilé Serra

Laboratório Nacional de Engenharia Civil

Edgar DuarteTomé

FCT-UNL

Injecção de caldas cimentícias em terrenos arenosos. Modelação física

> Resumo da comunicação

- > Critérios de desempenho na injecção por permeação
- > Variáveis de controlo operacional
- > Modelação física em laboratório
- > Programa experimental
- > Resultados
- > Conclusões

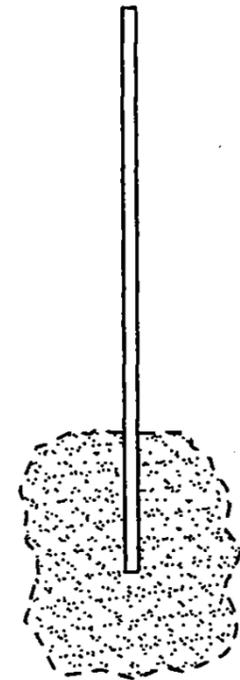
Injecção de caldas cimentícias em terrenos arenosos. Modelação física

- > **Critérios de desempenho na injecção por permeação**
- > Variáveis de controlo operacional
- > Modelação física em laboratório
- > Programa experimental
- > Resultados
- > Análise dos resultados
- > Conclusões

Critérios de desempenho na injeção por permeação

> Aspectos relevantes

- > Processo de injeção controlada de material temporariamente fluido através dos poros do terreno **sem alteração da fábrica**, e cujo **endurecimento** contribui para a melhoria das características hidráulicas e mecânicas do terreno
- > Aplicável em **solos arenosos**
- > **Caldas cimentícias** com adjuvantes estabilizadores (bentonite)
- > **Objectivos**: (1) redução da permeabilidade, (2) eliminação de vazios, previamente a injeção de compactação, (3) melhoria das características de deformabilidade e de resistência (importância secundária)
- > **Critérios**: volume de vazios residual; redução de permeabilidade ao longo do tempo de exploração do terreno (exigência de funcionalidade); redução da compressibilidade volumétrica; trabalhabilidade, estabilidade e distância de penetração da calda



Critérios de desempenho na injeção por permeação

> Aspectos relevantes

- > Injecção parcial de troços de furos (tubo à manchete)
- > Injecção ascendente ou descendente (obturador simples) ou com obturador duplo

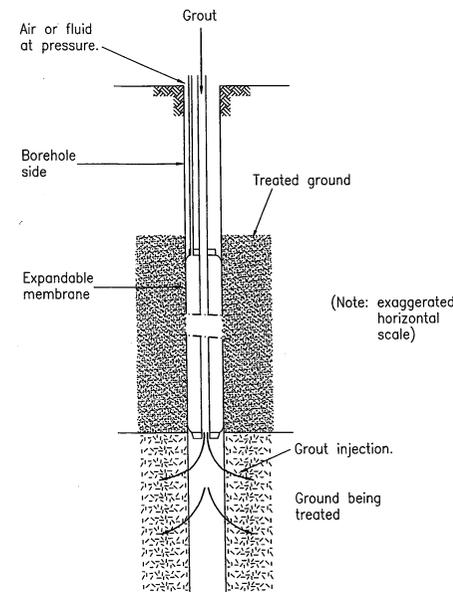
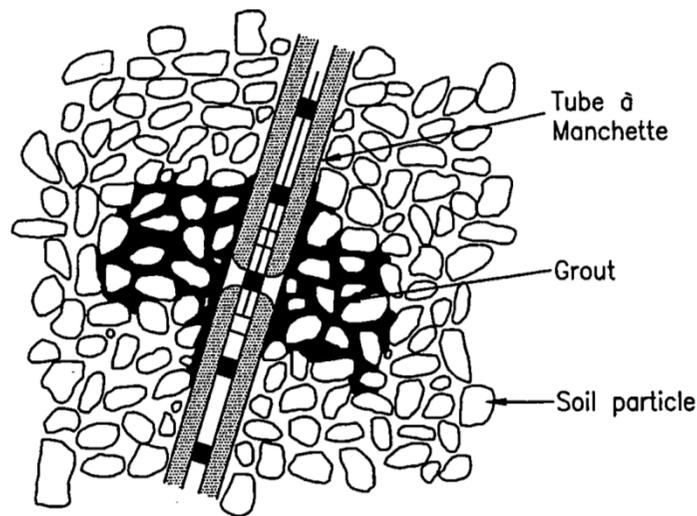
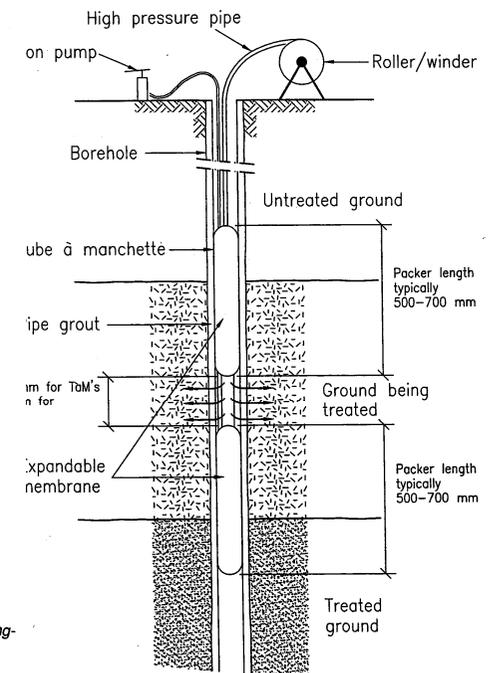


Figure 4.4 Grout injection in an open drillhole (rock) with single packer. Descending-stage grouting (after AFTES, 1991)



Injecção de caldas cimentícias em terrenos arenosos. Modelação física

- > Critérios de desempenho na injecção por permeação
- > **Variáveis de controlo operacional**
- > Modelação física em laboratório
- > Programa experimental
- > Resultados
- > Conclusões

Variáveis de controlo operacional

> **Calda, equipamentos e procedimentos**

- > **granulometria** das componentes da calda
- > **formulação** (traço) da calda
- > tempo de “vida” da calda (**trabalhabilidade**)
- > **caudal e pressão** de injeção
- > **volume** de calda injectada
- > **sequência** de injeção

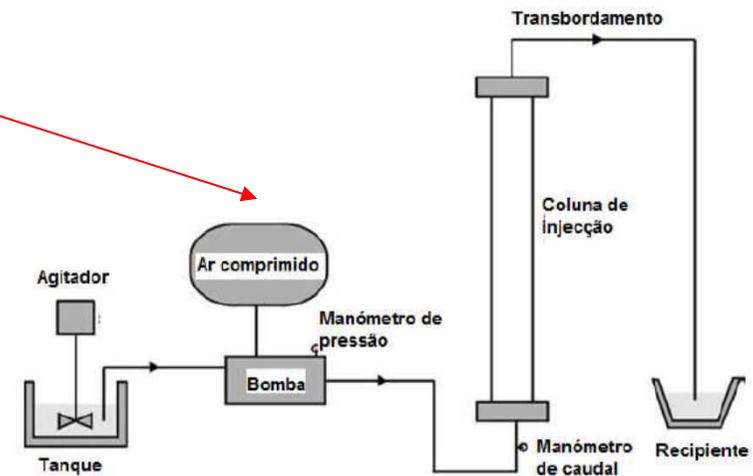
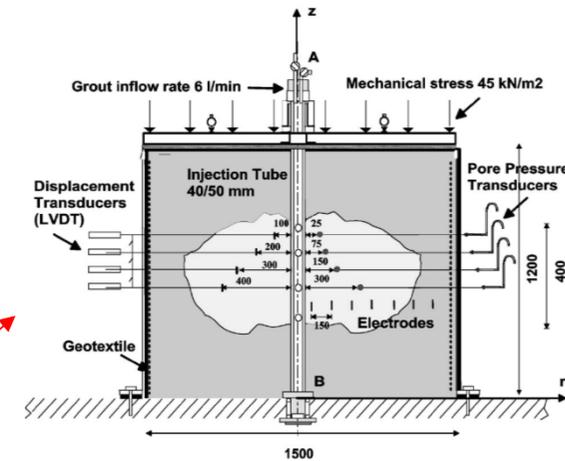
Injecção de caldas cimentícias em terrenos arenosos. Modelação física

- > Critérios de desempenho na injecção por permeação
- > Variáveis de controlo operacional
- > **Modelação física em laboratório**
- > Programa experimental
- > Resultados
- > Conclusões

Modelação física laboratorial

> Objectivos

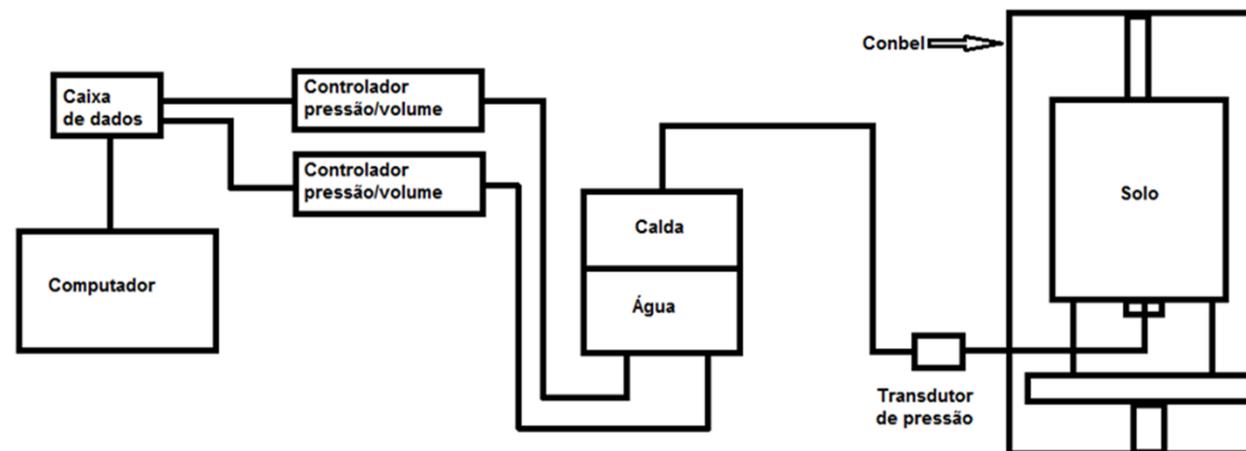
- > Reprodução em condições controladas do processo de injeção
 - > Diversos níveis de **complexidade** e **tipos de efeitos** na modelação
- a. **volume representativo** (distâncias e tempos de permeação, pressão eficaz de injeção)
 - b. **volume “linear”** (eficiência no preenchimento dos vazios, efeitos ao longo do tubo de injeção)
 - c. **pequeno volume** (provete)



Modelação física laboratorial

> Injecção dum pequeno volume

- > Permite estudar os aspectos locais da permeação, a sensibilidade às variáveis básicas, (granulometria, eficiência no preenchimento de vazios, ganhos quanto à permeabilidade, resistência e deformabilidade)

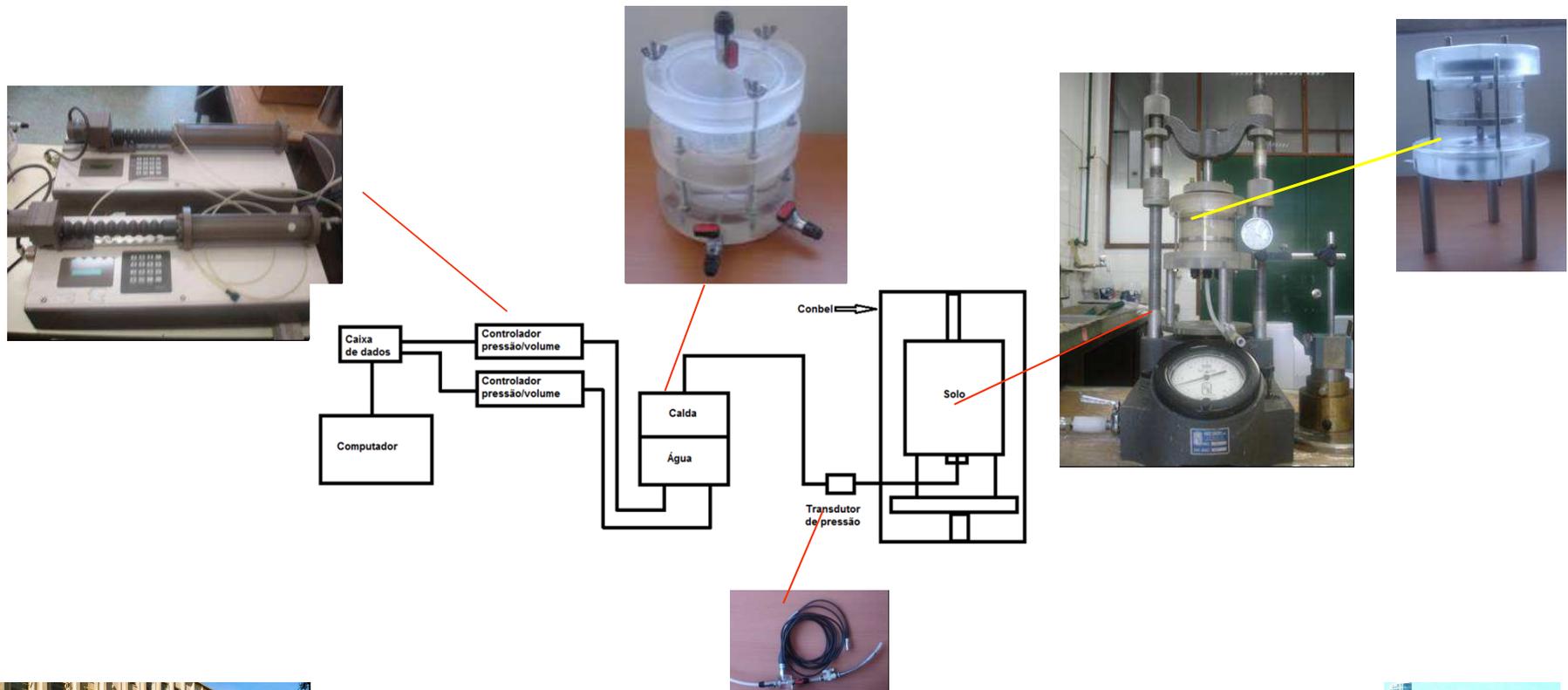


- > Configuração experimental com capacidade para simular o efeito da tensão geo-estática vertical

Modelação física laboratorial

> Configuração experimental

- > computador; caixa de leitura digital de dados; controladores de pressão/volume GDS, câmara de ensaio, actuador servo-hidráulico de força, interface de pressão; transdutor de pressão, deflectómetro



Injecção de caldas cimentícias em terrenos arenosos. Modelação física

- > Critérios de desempenho na injecção por permeação
- > Variáveis de controlo operacional
- > Modelação física em laboratório
- > **Programa experimental**
- > Resultados
- > Conclusões

Programa experimental

> Materiais

> Areia quartzítica mal graduada (SP)

> Cimento: CEM IIB-L 32,5 N (CIMPOR)

> Ficha técnica:

dimensão média das partículas de 5 a 30 μm ;

solubilidade em água ($T=20^\circ\text{C}$), residual (0,1 – 1,5 g/l);

- massa volúmica, real 2,75 – 3,20 g/cm^3 , aparente (baridade) 0,9 – 1,5 g/cm^3 ;
- pH ($T=20^\circ\text{C}$ em água), 11- 13,5;
- ponto de ebulição/fusão $>1250^\circ\text{C}$;
- superfície específica, tipicamente entre 3000 – 5000 cm^2/g (Blaine)
- expansibilidade (mm) ≤ 10 .

> Bentonite sódica natural, com denominação comercial “Pilogel”

Programa experimental

> Objectivos

- > Avaliar a influência da formulação da calda:
 - a. Qualidade da injeção (preenchimento de vazios)
 - b. Permeabilidade
 - c. Resistência à tracção
 - d. Deformabilidade em compressão isotrópica

- > Três rácios (a:c), cruzados com dois teores em bentonite (a:c:b%)

	2% de bentonite	4% de bentonite
Rácio 2:1 de calda	3000 ml de água, 1500 g de cimento, 30 g de bentonite	3000 ml de água, 1500 g de cimento, 60 g de bentonite
Rácio 3:1 de calda	3000 ml de água, 1000 g de cimento, 20 g de bentonite	3000 ml de água, 1000 g de cimento, 40 g de bentonite
Rácio 4:1 de calda	3000 ml de água, 750 g de cimento, 15 g de bentonite	3000 ml de água, 750 g de cimento, 30 g de bentonite

Programa experimental

> Ensaio realizados (maioritariamente aos 28 dias)

- > **Areia:** Granulometria e densidade dos grãos de areia, permeabilidade de carga constante em permeâmetro vertical
- > **Calda:** ensaio com o cone de Marsh, ensaio de exsudação
- > **Provetes de areia injectada:** Permeabilidade e compressão isotrópica em câmara triaxial, compressão diametral (resistência à tracção)
- > **Provetes de areia injectada:** Indicador da qualidade de permeação (1 a 5)



12-4		Apresenta total preenchimento homogêneo do interior e exterior, o topo e base regularizadas.	5
19-6		Apresenta total preenchimento do interior e exterior, com alguns vazios, o topo e a base com lascas.	3
18-7		Apresenta parcial preenchimento do interior e exterior, com alguns vazios, o topo e a base com lascas.	3

Injecção de caldas cimentícias em terrenos arenosos. Modelação física

- > Critérios de desempenho na injecção por permeação
- > Variáveis de controlo operacional
- > Modelação física em laboratório
- > Programa experimental
- > **Resultados**
- > Conclusões

Resultados

> Caracterização das caldas

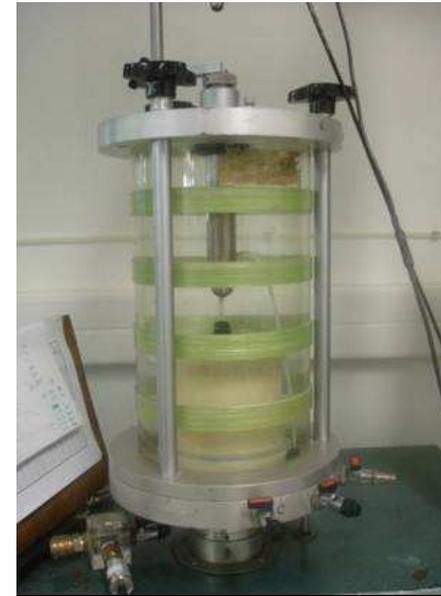
Ensaio	Razão da Calda	Data	Temperatura ambiente (°C)	Cone Marsh (s)	Exsudação (%)	e	H (mm)	Ensaio a que se destina
8-1	2:1:2%	17-09-2010	25	31	16	0,73	96	P, CI
32-1	2:1:2%	10-11-2010	19	31	11	0,76	90	P
16-2	2:1:2%	16-08-2010	24	28	11	0,76	95	T
20-3	2:1:4%	14-09-2010	25	33	4	0,71	91,7	P, CI
33-3	2:1:4%	11-11-2010	19	32	4	0,76	90,1	P, CI
12-4	2:1:4%	09-08-2010	26	36	2	0,76	92	T
26-5	3:1:2%	06-09-2010	24	29	37	0,76	90,7	P, CI
28-5	3:1:2%	28-10-2010	20	29	36	0,76	91,2	P
19-6	3:1:2%	20-08-2010	24	29	39	0,75	91	T
18-7	3:1:2%	19-08-2010	24	29	30	0,76	92	T
9-8	3:1:2%	03-08-2010	24	28	37	0,76	79	T
25-9	3:1:4%	08-09-2010	25	31	10	0,76	89,7	P, CI
30-9	3:1:4%	04-11-2010	19	31	9	0,76	87,9	P
15-10	3:1:4%	13-08-2010	24	31	20	0,76	89	T
23-11	4:1:2%	13-09-2010	25	29	52	0,73	94	P, CI
31-11	4:1:2%	05-11-2010	19	29	48	0,76	92,3	P
10-12	4:1:2%	04-08-2010	25	27	47	0,76	88	T
21-13	4:1:4%	26-08-2010	25	29	38	0,75	68,2	P, CI
29-13	4:1:4%	29-10-2010	19	29	17	0,76	90,3	P, CI
13-14	4:1:4%	10-08-2010	27	30	34	0,76	86	T

Legenda de ensaio: P – permeabilidade; CI – compressão isotrópica; T - tracção

Resultados

> Permeabilidade

- > Permeabilidade em estado saturado
- > Razão entre permeabilidade da areia antes e após injeção



Calda	Provete	Permeabilidade do provete (m/s)	Provete	Permeabilidade da calda (m/s)	Permeabilidade do solo (m/s)	Altura da água (cm)	Permeabilidade após saturação (m/s)	Razão de permeabilidade da saturação	Razão de permeabilidade
2:1:2%	8-1	1,4E-09	11-15	3,0E-10	4,9E-05	100	2,8E-09	2,06	35837
	32-1	1,4E-08				500	6,9E-09	0,49	3417
2:1:4%	20-3	6,0E-09	14-16	1,2E-08	4,9E-05	100	1,1E-08	1,77	8057
	33-3	1,1E-08				500	5,4E-09	0,49	4394
3:1:2%	26-5	1,7E-07	17-17	4,8E-09	4,9E-05	100	3,7E-08	0,21	283
	28-5	7,4E-09				500	9,4E-09	1,27	6524
3:1:4%	25-9	1,7E-07	22-18	5,1E-10	4,9E-05	100	1,8E-07	1,01	278
	30-9	7,1E-08				500	6,7E-09	0,09	681
4:1:2%	23-11	9,4E-08	24-19	6,1E-08	4,9E-05	100	2,6E-09	0,03	515
	31-11	-				500	-	-	-
4:1:4%	21-13	1,0E-07	27-20	1,0E-07	4,9E-05	100	-	-	479
	29-13	3,6E-08				500	6,5E-08	1,81	1344

Resultados

> Compressibilidade isotrópica

- > Compressão normal
- > Descompressão-recompressão

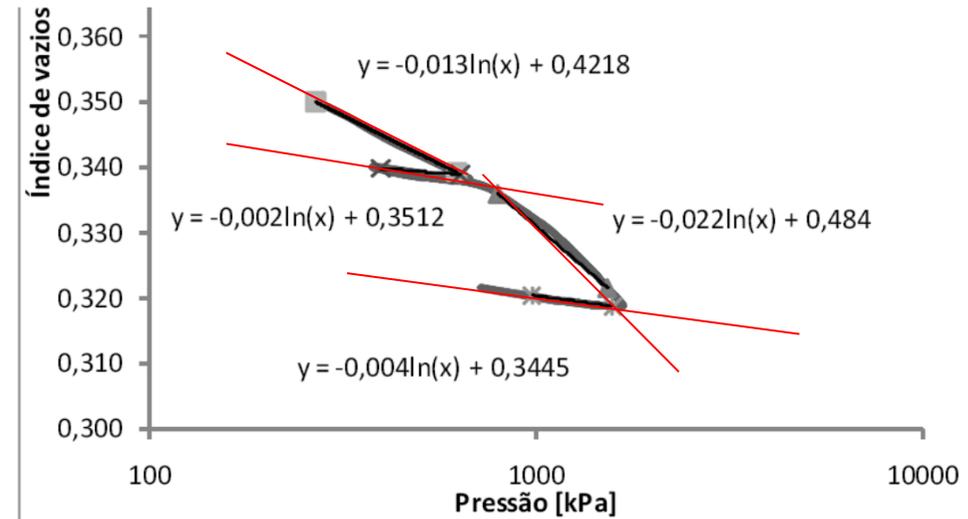


Tabela 6.11 – Resumo de resultados

Provete	Versão do ensaio	e inicial	e final	λ_1	K1	λ_2	K2	Razão 1 entre λ_1 e k1	Razão 2 entre λ_2 e k2
8-1	4	0,52	0,38	0,112	0,008	0,0059	-	14	-
32-1	5	0,33	0,29	0,022	0,002	0,026	0,0007	10	37,14
20-3	3	0,45	0,25	0,08	0,01	0,05	-	8	-
33-3	5	0,36	0,32	0,018	0,002	0,025	0,0011	9	22,73
26-5	2	0,32	0,21	0,08	0,003	0,049	-	26,67	-
28-5	5	0,38	0,34	0,028	0,005	0,024	0,002	5,6	12
25-9	2	0,48	0,35	0,074	0,005	0,062	0,007	14,80	8,86
23-11	2	0,53	0,44	0,076	0,008	0,045	-	9,50	-
21-13	1	0,50	0,40	0,06	0,008	0,052	-	7,50	-
29-13	5	0,35	0,32	0,013	0,002	0,022	0,004	6,50	5,50

Resultados

> Resistência à tracção

- > Relevância decorre da influência negativa na permeabilidade da existência de fissuração (por efeitos de tracção)



Identificação do provete	Data		Idade (dias)	Massa (g)	Dimensões do provete (m)		Força de rotura F (kN)	Tensão de rotura fct (kPa)
	Fabrico	Ensaio			Diâmetro, d	Comprimento, L		
16-2	16-08-2010	13-09-2010	28	1414	0,100	0,095	5,46	368
12-4	09-08-2010	06-09-2010	28	1377	0,100	0,092	3,45	240
19-6	20-08-2010	27-08-2010	7	1435	0,100	0,091	1,55	108
18-7	19-08-2010	02-09-2010	14	1416	0,100	0,092	2,49	172
9-8	03-08-2010	31-08-2010	28	1102	0,100	0,079	1,82	146
15-10	13-08-2010	10-09-2010	28	1254	0,100	0,089	2,34	167
10-12	04-08-2010	01-09-2010	28	938	0,098	0,088	0,22	16
13-14	10-08-2010	07-09-2010	28	1273	0,100	0,086	0,74	55

Injecção de caldas cimentícias em terrenos arenosos. Modelação física

- > Critérios de desempenho na injecção por permeação
- > Variáveis de controlo operacional
- > Modelação física em laboratório
- > Programa experimental
- > Resultados
- > **Conclusões**

Conclusões

> **Efeito da fluidez da calda**

- > As caldas de maior a:c permitiram concluir a injeção em menos tempo e obter o menor valor residual de vazios
- > A exsudação dos provetes cresceu com a razão a:c
- > A resistência à tracção apresentou-se muito sensível à razão a:c, diminuindo com o aumento desta

> **Efeito do teor em bentonite**

- > Os tempos de Marsh dos provetes com teor 4% foram superiores entre 2 s e 5 s aos dos restantes
- > A exsudação dos provetes com teor 4% é inferior em cerca de uma ordem de grandeza à dos restantes
- > A permeabilidade dos provetes com teor 4% foi tendencialmente menor (meia ordem de grandeza) do que a dos com teor 2%
- > Os provetes de 4% apresentaram menor resistência à tracção (cerca de meia ordem de grandeza)
- > A presença da bentonite tende a aumentar a compressibilidade volumétrica dos provetes

Grato pela vossa atenção