

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

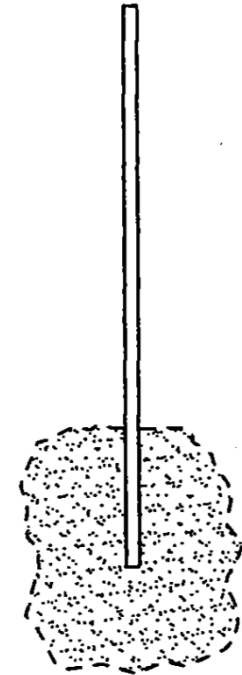
Injecção de caldas cimentícias em terrenos arenosos. Modelação física

- > **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

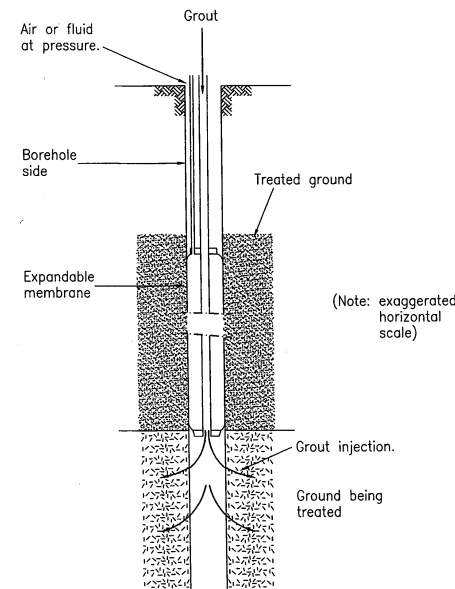
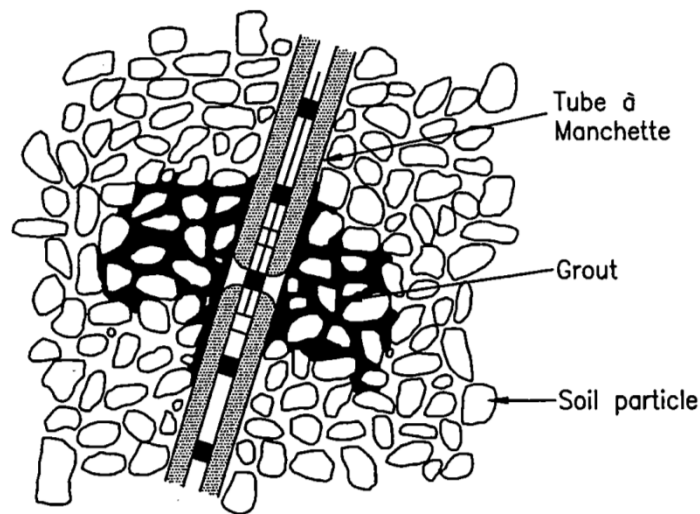
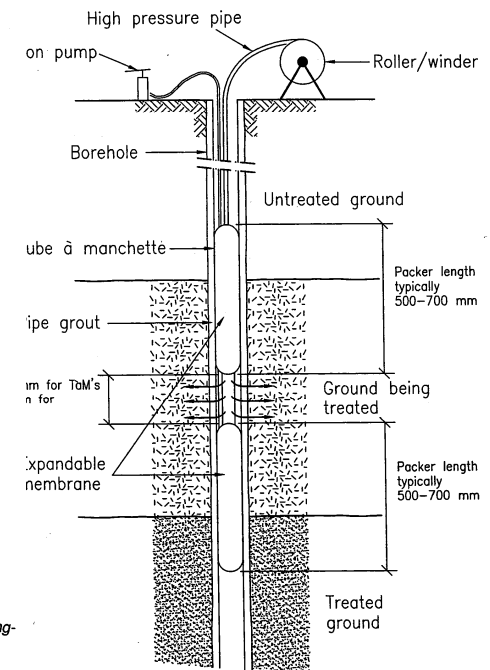


Figure 4.4 Grout injection in an open drillhole (rock) with single packer. Descending-stage grouting (after AFTES, 1991)



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

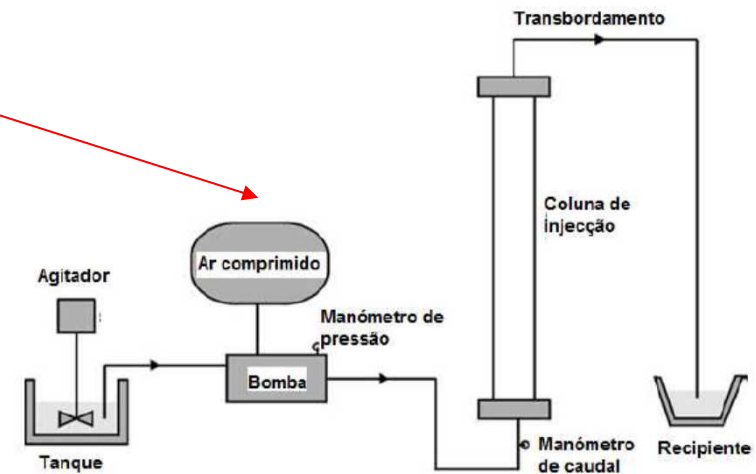
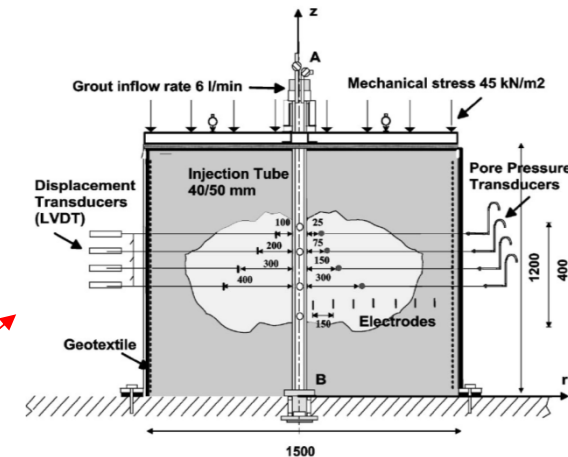
Injecção de caldas cimentícias em terrenos arenosos. Modelação física

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

Modelação física laboratorial

> Objectivos

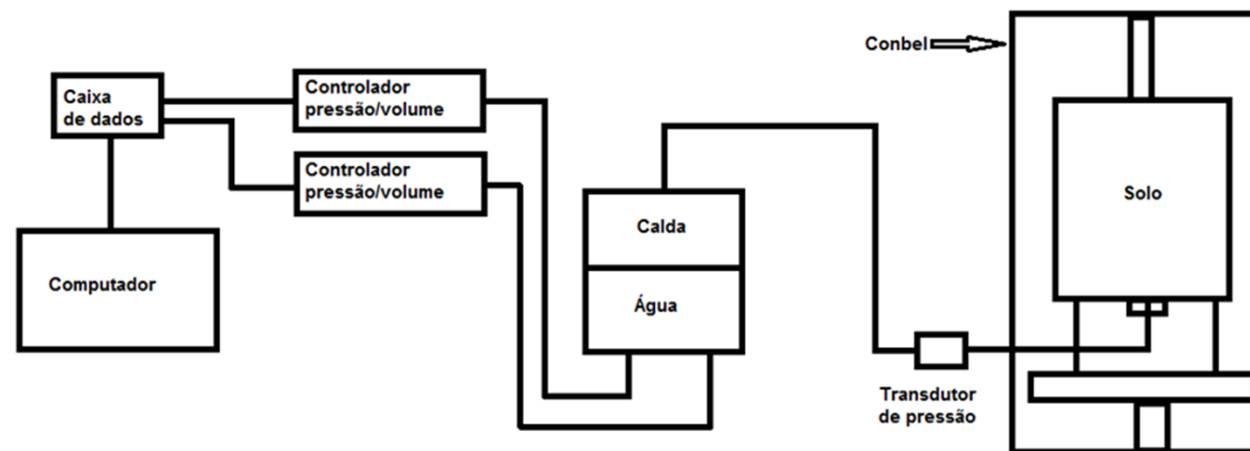
- > Reprodução em condições controladas do processo de injeção
- > Diversos níveis de **complexidade** e **tipos de efeitos** na modelação
 - a. **volume representativo** (distâncias e tempos de permeação, pressão eficaz de injeção)
 - b. **volume “linear”** (eficiência no preenchimento dos vazios, efeitos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

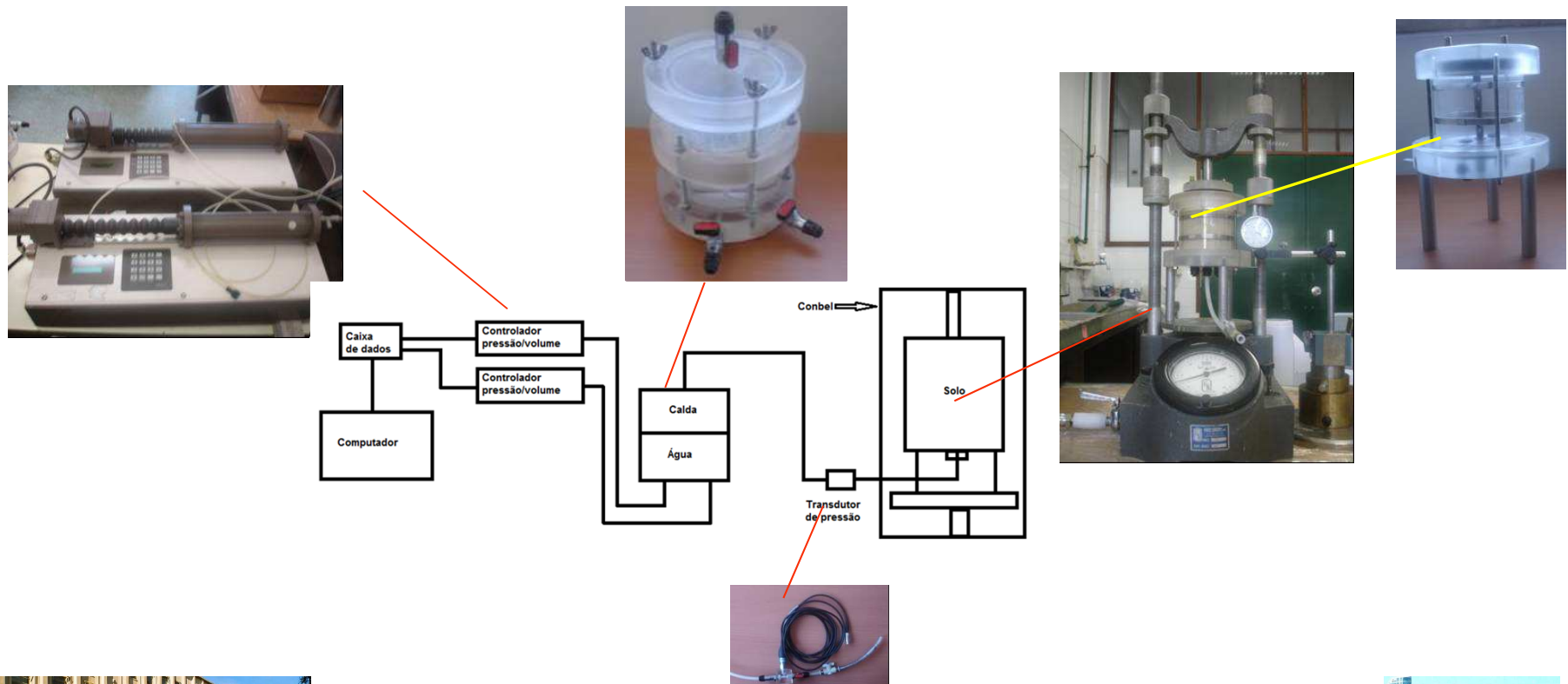


- > Configuração experimental com capacidade para simular o efeito da tensão geo-estática vertical

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

> Ensaios 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

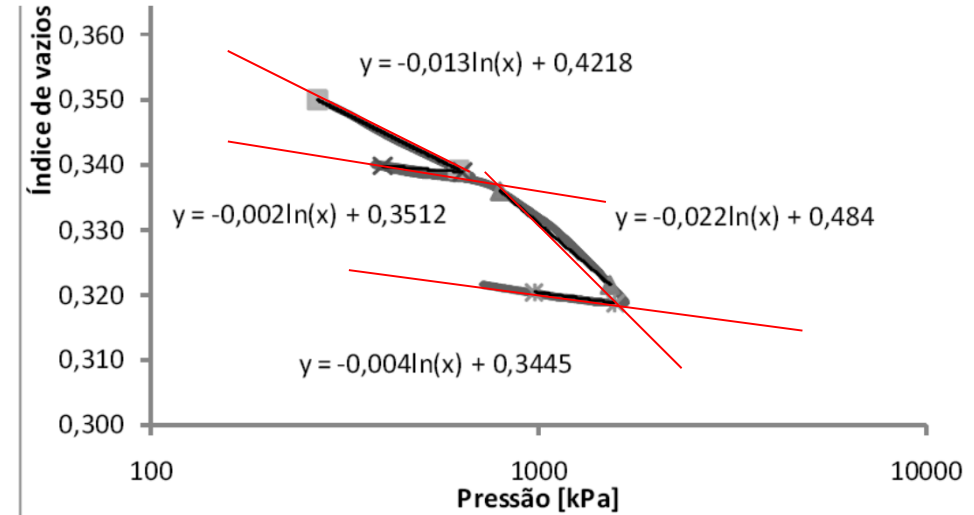


Tabela 6.11 – Resumo de resultados

| 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 a aumentar a compressibilidade volumétrica dos provetes

Grato pela vossa atenção