



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA
Núcleo de Fundações, Taludes e Obras de Suporte

Proc. 503/11/16975

CORTINA DE CONTENÇÃO PERIFÉRICA DO MOSTEIRO DE SANTA CLARA-A-VELHA

Relatório de Análise da Informação Disponível

Contribuições para o dimensionamento e controlo
de qualidade de paredes moldadas auto-endurecedoras

Lisboa • Novembro de 2009

I&D GEOTECNIA

RELATÓRIO 355/2009 – NFTOS

**CONTRIBUIÇÕES PARA O DIMENSIONAMENTO E CONTROLO DE QUALIDADE
DE PAREDES MOLDADAS AUTO-ENDURECEDORAS**

CORTINA DE CONTENÇÃO PERIFÉRICA DO MOSTEIRO DE SANTA CLARA-A-VELHA

RELATÓRIO DE ANÁLISE DA INFORMAÇÃO DISPONÍVEL

ÍNDICE DO TEXTO

1.	ENQUADRAMENTO DA OBRA	- 1 -
2.	PROJECTO	- 4 -
2.1.	DESCRIÇÃO DA SOLUÇÃO ADOPTADA.....	- 4 -
2.2.	TRABALHOS DE PROSPECÇÃO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA	- 5 -
2.3.	ZONAMENTO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO	- 6 -
2.4.	DEFINIÇÃO DA COMPOSIÇÃO DA CALDA	- 6 -
2.5.	ESTUDOS DE MODELAÇÃO	- 8 -
2.5.1.	Considerações gerais.....	- 8 -
2.5.2.	Resultados dos estudos de percolação.....	- 8 -
2.5.3.	Resultados dos estudos de tensão-deformação	- 9 -
2.5.4.	Resultados dos estudos dinâmicos	- 11 -
2.6.	PLANO DE OBSERVAÇÃO	- 13 -
3.	CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICO-GEOTÉCNICAS	- 15 -
3.1.	DESCRIÇÃO DOS TRABALHOS DE PROSPECÇÃO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA	- 15 -
3.2.	RESULTADOS DOS TRABALHOS DE PROSPECÇÃO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA	- 16 -
3.3.	CONSIDERAÇÕES GEOLÓGICO-GEOTÉCNICAS.....	- 27 -
4.	CONSTRUÇÃO	- 30 -
4.1.	ENSAIOS EFECTUADOS PARA DEFINIÇÃO DA COMPOSIÇÃO DA CALDA. DESCRIÇÃO E RESULTADOS. - 30 -	
4.1.1.	Descrição e análise dos ensaios de caracterização das caldas	- 30 -
4.1.2.	Descrição e análise dos ensaios de compressão simples	- 36 -
4.1.3.	Descrição e análise dos ensaios de corte em compressão triaxial	- 51 -
4.1.4.	Descrição e análise dos ensaios de determinação da permeabilidade.....	- 64 -
4.2.	COMPOSIÇÃO DA CALDA.....	- 66 -
4.3.	EQUIPAMENTOS UTILIZADOS. CARACTERÍSTICAS E RENDIMENTOS.....	- 68 -
4.4.	DESCRIÇÃO DOS PROCEDIMENTOS DE FABRICO DA CALDA.....	- 70 -
4.5.	CARACTERÍSTICAS DOS PAINÉIS.....	- 71 -

4.5.1.	Geometria e sequência construtiva dos painéis.....	- 71 -
4.5.2.	Anomalias ocorridas durante a escavação e preenchimento da vala com calda.....	- 75 -
4.5.3.	Consumo de calda e exsudação	- 80 -
4.6.	CONTROLO DE QUALIDADE. DESCRIÇÃO E RESULTADOS	- 85 -
4.6.1.	Controlo da continuidade da parede moldada.....	- 85 -
4.6.2.	Controlo do ambiente de cura	- 85 -
4.6.3.	Controlo das características da calda auto-endurecedora	- 85 -
4.7.3.1.	Descrição e análise dos ensaios de caracterização da calda	- 85 -
4.7.3.2.	Descrição e análise dos ensaios de compressão simples.....	- 89 -
4.7.3.3.	Descrição e análise dos ensaios de corte em compressão triaxial	- 97 -
4.8.3.4.	Descrição e análise dos ensaios de determinação da permeabilidade	- 97 -
5.	EXPLORAÇÃO	- 99 -
5.1.	RESULTADOS DOS ENSAIOS DE LABORATÓRIO EFECTUADOS SOBRE AMOSTRAS RECOLHIDAS NOS PAINÉIS	- 99 -
5.1.1.	Descrição e análise dos ensaios de compressão simples	- 99 -
5.1.2.	Descrição e análise dos ensaios de corte em compressão triaxial	- 101 -
5.2.	RESULTADOS DOS ENSAIOS “IN SITU”	- 103 -
5.2.1.	Sondagens na parede moldada	- 103 -
5.2.2.	Ensaio de penetração dinâmica ligeira.....	- 105 -
5.2.3.	Poços de prospecção	- 111 -
5.2.4.	Ensaio de bombagem.....	- 111 -
5.3.	RESULTADOS DA OBSERVAÇÃO.....	- 111 -
5.3.1.	Descrição do sistema de observação instalado	- 111 -
5.3.2.	Análise dos resultados da observação.....	- 114 -
6.	CONCLUSÕES	- 123 -

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 – Estudos de percolação. Coeficientes de permeabilidade considerados nas modelações.	9 -
Quadro 2 – Estudos de percolação. Descrição e resultados obtidos.	10 -
Quadro 3 – Estudos de tensão-deformação. Características de deformabilidade dos materiais adoptadas no Projecto -Base.	11 -
Quadro 4 – Estudos de tensão-deformação. Descrição e resultados obtidos.	12 -
Quadro 5 – Plano de Observação. Frequência das leituras.	14 -
Quadro 6 – Identificação das sondagens efectuadas na área do mosteiro e dos ensaios “in situ”.	15 -
Quadro 7 – Identificação dos ensaios de laboratório efectuados sobre amostras recolhidas nas sondagens.	16 -
Quadro 8 – Resultados dos ensaios de penetração dinâmica <i>SPT</i>	17 -
Quadro 9 – Resultados dos ensaios de permeabilidade do tipo <i>Lefranc</i>	20 -
Quadro 10 – Resultados dos ensaios de permeabilidade do tipo <i>Lugeon</i>	20 -
Quadro 11 – Resultados dos ensaios de laboratório.	21 -
Quadro 12 – Variação dos níveis piezométricos.	26 -
Quadro 13 – Comportamento dos piezómetros instalados na campanha de 1997, após esgotamento da água dos furos.	26 -
Quadro 14 – Características das amostras ensaiadas para definição da composição da calda.	31 -
Quadro 15 – Definição da composição da calda. Resultados dos ensaios efectuados sobre amostras da calda bentonítica.	32 -
Quadro 16 – Definição da composição da calda. Massa volúmica, viscosidade, pH e exsudação da calda de bentonitecimento.	32 -
Quadro 17 – Definição da composição da calda. Resistência à compressão simples.	36 -
Quadro 18 – Definição da composição da calda. Ensaio de compressão simples. Módulos de deformabilidade aos 18 dias de cura.	51 -
Quadro 19 – Definição da composição da calda. Ensaio de corte em compressão triaxial, consolidados não drenados. Características das amostras ensaiadas.	52 -
Quadro 20 – Definição da composição da calda. Ensaio de compressão triaxial. Tensão deviatórica e extensão na rotura.	60 -
Quadro 21 – Definição da composição da calda. Ensaio de corte em compressão triaxial. Parâmetros de resistência ao corte de pico.	61 -
Quadro 22 – Definição da composição da calda. Ensaio de corte em compressão triaxial. Resistência ao corte para $\sigma'_3 = 0$	61 -
Quadro 23 – Definição da composição da calda. Ensaio de corte em compressão triaxial. Módulos de deformabilidade.	62 -
Quadro 24 – Definição da composição da calda. Ensaio de corte em compressão triaxial. Compressibilidade das amostras.	63 -
Quadro 25 – Definição da composição da calda. Resultados dos ensaios de permeabilidade.	65 -
Quadro 26 – Definição da composição da calda. Resultados da determinação permeabilidade nos ensaios de corte em compressão triaxial.	65 -
Quadro 27 – Áreas totais de escavação por equipamento e respectivos rendimentos. Painéis primários.	69 -
Quadro 28 – Áreas totais de escavação por equipamento e respectivos rendimentos. Painéis secundários.	70 -
Quadro 29 – Características dos painéis do Alinhamento Nascente.	73 -
Quadro 30 – Características dos painéis do Alinhamento Sul.	74 -
Quadro 31 – Características dos painéis do Alinhamento Norte.	74 -
Quadro 32 – Características dos painéis do Alinhamento Poente.	75 -
Quadro 33 – Descrição das situações anómalas detectadas durante a execução dos painéis.	77 -

Quadro 34 –	Percentagens de volume de calda perdida e de exsudação nos painéis do Alinhamento Nascente.....	- 81 -
Quadro 35 –	Percentagens de volume de calda perdida e de exsudação nos painéis do Alinhamento Sul.....	- 82 -
Quadro 36 –	Percentagens de volume de calda perdida e de exsudação nos painéis do Alinham. Poente.	- 83 -
Quadro 37 –	Percentagens de volume de calda perdida e de exsudação nos painéis do Alinham. Norte.	- 83 -
Quadro 38 –	Controlo de qualidade da calda durante a construção. Características da calda bentonítica.	- 86 -
Quadro 39 –	Controlo de qualidade da calda durante a construção. Características da calda auto- -endurecedora.	- 86 -
Quadro 40 –	Controlo da qualidade da calda durante a construção. Ensaios de compressão simples. Teor em água dos provetes.	- 90 -
Quadro 41 –	Controlo da qualidade da calda durante a construção. Ensaios de compressão simples. Tensão de rotura	- 91 -
Quadro 42 –	Controlo da qualidade da calda durante a construção. Ensaios de compressão simples. Módulos de deformabilidade.	- 96 -
Quadro 43 –	Controlo da qualidade da calda durante a construção. Ensaios de corte em compressão triaxial, consolidados não drenados. Características das amostras ensaiadas.	- 97 -
Quadro 44 –	Controlo da qualidade da calda durante a construção. Ensaios de corte em compressão triaxial. Coeficientes de permeabilidade.	- 98 -
Quadro 45 –	Controlo de qualidade na fase de exploração. Ensaios de compressão simples realizados no laboratório da empresa <i>TEIXEIRA DUARTE S.A.</i>	- 99 -
Quadro 46 –	Controlo de qualidade na fase de exploração. Ensaios de compressão simples realizados no <i>Laboratório de Solos da Universidade de Coimbra.</i>	- 100 -
Quadro 47 –	Controlo de qualidade na fase de exploração. Percentagem de recuperação da carotagem efectuada nos painéis após a conclusão da obra.	- 104 -
Quadro 48 –	Controlo de qualidade na fase de exploração. Datas de realização dos ensaios <i>PDL</i> e correspondentes períodos de cura dos painéis do Alinhamento Nascente.	- 107 -
Quadro 49 –	Controlo de qualidade na fase de exploração. Datas de realização dos ensaios <i>PDL</i> e correspondentes períodos de cura dos painéis do Alinhamento Sul.	- 107 -
Quadro 50 –	Controlo de qualidade na fase de exploração. Datas de realização dos ensaios <i>PDL</i> e correspondentes períodos de cura dos painéis do Alinhamento Poente.	- 108 -
Quadro 51 –	Controlo de qualidade na fase de exploração. Datas de realização dos ensaios <i>PDL</i> e correspondentes períodos de cura dos painéis do Alinhamento Norte.	- 108 -
Quadro 52 –	Características dos tubos inclinométricos.	- 113 -
Quadro 53 –	Características dos piezómetros instalados na zona exterior do recinto.....	- 113 -
Quadro 54 –	Características dos piezómetros instalados na zona interior do recinto.....	- 113 -
Quadro 55 –	Níveis piezométricos medidos na campanha de 19 de Setembro de 2007.....	- 119 -

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1 –	Curvas granulométricas e limites de plasticidade das amostras recolhidas nas sondagens S1,97 e S2,97.	22 -
Fig. 2 –	Curvas granulométricas e limites de plasticidade das amostras recolhidas nas sondagens S3,97 e S4,97.	23 -
Fig. 3 –	Curvas granulométricas e limites de plasticidade das amostras recolhidas nas sondagens S5,97 e S6,97.	24 -
Fig. 4 –	Curvas granulométricas e limites de plasticidade das amostras recolhidas nas sondagens S7,97 e S8,97.	25 -
Fig. 5 –	Determinação da composição da calda. Ensaio de compressão simples.....	40 -
Fig. 6 –	Influência da quantidade de cimento <i>CEM II-32.5N</i> sobre a resistência à compressão simples.....	43 -
Fig. 7 –	Influência da quantidade de cimento <i>CEM I-32.5R</i> sobre a resistência à compressão simples.....	44 -
Fig. 8 –	Influência da quantidade de bentonite sobre a resistência à compressão simples da calda.....	45 -
Fig. 9 –	Influência do aditivo <i>AQUABETON</i> sobre a resistência à compressão simples da calda.	46 -
Fig. 10 –	Influência do repouso da calda bentonítica sobre a resistência à compressão simples da calda auto-endurecedora.....	46 -
Fig. 11 –	Influência do tipo de molde sobre a resistência à compressão simples da calda.....	48 -
Fig. 12 –	Influência do tipo de cura da amostra sobre a resistência à compressão simples da calda. Amostras confeccionadas em molde de PVC.	49 -
Fig. 13 –	Influência do período de cura da amostra sobre a resistência à compressão simples da calda.	50 -
Fig. 14 –	Determinação da composição da calda. Ensaio de corte em compressão triaxial. Amostra C1-1 (2ª série)...	53 -
Fig. 15 –	Determinação da composição da calda. Ensaio de corte em compressão triaxial. Amostra C2-1 (1ª série)...	54 -
Fig. 16 –	Determinação da composição da calda. Ensaio de corte em compressão triaxial. Amostra C2-1 (2ª série)...	55 -
Fig. 17 –	Determinação da composição da calda. Ensaio de corte em compressão triaxial. Amostra C2-2 (2ª série)...	56 -
Fig. 18 –	Determinação da composição da calda. Ensaio de corte em compressão triaxial. Amostra C3-1 (1ª série)...	57 -
Fig. 19 –	Determinação da composição da calda. Ensaio de corte em compressão triaxial. Amostra C3-1 (2ª série)...	58 -
Fig. 20 –	Determinação da composição da calda. Ensaio de corte em compressão triaxial. Amostra C3-2 (1ª série)...	59 -
Fig. 21 –	Determinação da composição da calda. Variação do índice de vazios das amostras na fase de consolidação.	64 -
Fig. 22 –	Esquema de fabrico da calda auto-endurecedora (adaptado de um documento fornecido pela <i>TEIXEIRA DUARTE S.A.</i>).....	72 -
Fig. 23 –	Controlo da qualidade da calda durante a construção. Resultados dos ensaios de resistência à compressão simples das amostras A.	93 -
Fig. 24 –	Controlo da qualidade da calda durante a construção. Resultados dos ensaios de resistência à compressão simples.	94 -
Fig. 25 –	Controlo de qualidade na fase de exploração. Ensaio de compressão simples. Variação da resistência em profundidade.	102 -
Fig. 26 –	Resistência à compressão simples das amostras recolhidas na fase de escavação e durante a exploração. Comparação com os valores obtidos na fase de definição da composição da calda. Painel <i>PE6</i>	103 -
Fig. 27 –	Controlo de qualidade na fase de exploração. Comparação dos resultados dos ensaios de compressão simples e dos ensaios <i>PDL</i>	110 -
Fig. 28 –	Evolução dos níveis de água nos piezómetros <i>PHE8</i> e <i>PHI14</i>	115 -
Fig. 29 –	Evolução dos níveis de água nos piezómetros <i>PHE6</i> e <i>PHI10</i>	116 -
Fig. 30 –	Evolução dos níveis de água nos piezómetros <i>PHE7</i> e <i>PHI9</i>	116 -
Fig. 31 –	Evolução dos níveis de água nos piezómetros <i>PHE5</i> e <i>PHI8</i>	117 -
Fig. 32 –	Evolução dos níveis de água nos piezómetros <i>PHE1</i> e <i>PHI1</i>	117 -
Fig. 33 –	Evolução dos níveis de água nos piezómetros <i>PHE4</i> e <i>PHI7</i>	118 -
Fig. 34 –	Evolução dos níveis de água nos piezómetros <i>PHE2</i> e <i>PHI4</i>	118 -
Fig. 35 –	Evolução dos níveis de água nos piezómetros <i>PHI3</i> , <i>PHI5</i> , <i>PHI6</i> , <i>PHI12</i> e <i>PHI16</i>	119 -

ÍNDICE DE FOTOGRAFIAS

Foto 1 –	Perspectiva geral do Mosteiro de Santa Clara-a-Velha e respectivo claustro à data do início das obras.	- 3 -
Foto 2 –	Estaleiro de fabrico da calda auto-endurecedora.	- 69 -
Foto 3 –	Equipamento utilizado na escavação dos painéis.	- 69 -
Foto 4 –	Escavação de um painel de parede moldada auto-endurecedora no Alinhamento Nascente da cortina.	- 75 -
Foto 5 –	Perda de verticalidade de um negativo instalado num painel do Alinhamento Nascente (PE35) a 26 de Fevereiro de 2002.	- 78 -
Foto 6 –	Colapso do terreno confinante com o painel PE6, após a sua escavação (18 de Dezembro de 2001).	- 78 -
Foto 7 –	Perspectiva da submersão do claustro após suspensão da bombagem (23 de Abril de 2002).	- 79 -
Foto 8 –	Fendilhação por retracção de um painel de parede moldada auto-endurecedora. É também visível o rebaixamento da calda no interior do painel.	- 79 -
Foto 9 –	Aspecto das amostras recolhidas na parede moldada auto-endurecedora, durante a escavação. (Dezembro de 2001).	- 87 -
Foto 10 –	Aparelho para medição da resistência do gel (“shearometer”).	- 87 -
Foto 11 –	Execução de uma sondagem num painel do Alinhamento Nascente.	- 104 -
Foto 12 –	Realização de um ensaio PDL num painel do Alinhamento Nascente, a 26 de Fevereiro de 2002.	- 106 -

ÍNDICE DE DESENHOS

Des. 1 –	Prospecção Geológico-Geotécnica. Localização das Sondagens. Planta.
Des. 2 –	Corte Geológico-Geotécnico Segundo o Alinhamento Nascente da Parede Moldada. (Folha 1/3)
Des. 2 –	Corte Geológico-Geotécnico Segundo o Alinhamento Nascente da Parede Moldada. (Folha 2/3)
Des. 2 –	Corte Geológico-Geotécnico Segundo o Alinhamento Nascente da Parede Moldada. (Folha 3/3)
Des. 3 –	Corte Geológico-Geotécnico Segundo o Alinhamento Sul da Parede Moldada.
Des. 4 –	Corte Geológico-Geotécnico Segundo o Alinhamento Poente da Parede Moldada.
Des. 5 –	Corte Geológico-Geotécnico Segundo o Alinhamento Norte da Parede Moldada.
Des. 6 –	Identificação dos Painéis de Parede Moldada. Planta.
Des. 7 –	Plano de Observação. Localização dos Dispositivos de Observação. Planta.

CONTRIBUIÇÕES PARA O DIMENSIONAMENTO E CONTROLO DE QUALIDADE DE PAREDES MOLDADAS AUTO-ENDURECEDORAS

CORTINA DE CONTENÇÃO PERIFÉRICA DO MOSTEIRO DE SANTA CLARA-A-VELHA

RELATÓRIO DE ANÁLISE DA INFORMAÇÃO DISPONÍVEL

1. ENQUADRAMENTO DA OBRA

O Mosteiro de Santa Clara-a-Velha foi fundado pela Rainha Santa Isabel, tendo a sua construção sido iniciada em 1314 e concluída em 1330.

A localização do mosteiro, na margem esquerda do Rio Mondego, marcou a sua história. As sucessivas cheias do rio, agravadas pelo seu progressivo assoreamento, foram degradando as condições de vida na instituição monástica que, com o passar dos anos, sofria inundações com uma frequência cada vez maior. Para combater este problema, a laje térrea da igreja foi reconstruída a cota superior. No século XVII, o rei D. João IV ordenou a construção de um novo mosteiro, num local mais elevado, para o qual se transferiram as religiosas, no ano de 1677. A partir desta data, o antigo mosteiro foi votado ao esquecimento e à ruína.

Foi já nas décadas de trinta e quarenta do século XX, que a *Direcção-Geral dos Edifícios e Monumentos Nacionais* efectuou a primeira intervenção de vulto, com o intuito de recuperar a igreja classificada como “Monumento Nacional”, em 1910. Não obstante, após a conclusão dos trabalhos, o monumento foi novamente abandonado.

Mais recentemente, em 1976 o mosteiro foi comprado pelo Estado Português. Sete anos após a sua aquisição, em 1983, a *Direcção Geral dos Recursos e Aproveitamentos Hidráulicos do Ministério do Equipamento Social* adjudicou à empresa *HIDROPROJECTO* a realização dos “Estudos Relativos à Defesa do Mosteiro de Santa Clara – Coimbra”. Nestes estudos, desenvolvido com o pormenor de um estudo prévio, foram analisadas diversas soluções para viabilizar a escavação na zona do mosteiro que permitisse pôr a descoberto o seu piso principal que se encontrava soterrado e a cerca de 4 m abaixo do nível freático. À data, foram analisadas as seguintes hipóteses: i) rebaixamento do nível freático com recurso exclusivo a bombagem; ii) criação de uma barreira à percolação de água para o interior da área da escavação, constituída por uma parede moldada auto-endurecedora, prolongada por uma cortina de injeção nas formações rochosas e complementada por um sistema de drenagem e de bombagem e iii) criação de uma barreira à percolação de água através de uma parede moldada auto-endurecedora associada a uma “laje de fundo” impermeável, materializada pela injeção das formações aluvionares, numa espessura de 4 m, abrangendo toda a área da escavação, com excepção da área da igreja, onde se preconizava a criação de uma cortina ao longo do seu perímetro exterior, por injeção dos terrenos; eventuais percolações que ainda ocorressem para o interior da área, seriam captadas por um sistema de drenagem e bombagem. Aparentemente este estudo não teve qualquer efeito prático nos anos seguintes.

Em 1989 foi lançado, pelo *Instituto Português do Património Cultural (IPPC)*, um concurso de ideias destinado à “Valorização da Igreja do Mosteiro de Santa Clara-a-Velha”. A adjudicação do projecto de arquitectura foi realizada, em 1990, aos arquitectos João Rapagão e César Fernandes. Em finais de 1994 foi iniciada a

empreitada que constou, numa primeira fase, da escavação arqueológica no interior da igreja, seguindo-se a zona envolvente das fachadas exteriores e o claustro principal adjacente. No sentido de viabilizar estas escavações, foi efectuado o rebaixamento permanente do nível freático com recurso exclusivo a um sistema de bombagem constituído por 13 furos de captação e 3 poços de bombagem¹, seguindo-se a escavação manual do terreno. Esta solução foi implementada após o insucesso da tecnologia “air lift” para a remoção dos solos, facto que foi atribuído à sua plasticidade e compacidade.

A extracção de terras do interior da igreja revelou a existência de uma estrutura sustentadora da primitiva capela funerária e deixou visíveis as abóbadas de tijolo que suportavam o piso seiscentista. Estes trabalhos vieram alterar as concepções historiográficas tradicionais que consideravam a igreja demasiado comprida para a altura. Acresce que esta intervenção evidenciou a luta exercida pela Ordem face ao avanço da água, revelada pela existência de pisos sobrelevados, patamares, etc..

Em finais de Novembro de 1995, junto à fachada Sul do mosteiro, foram postas a descoberto as ruínas do claustro, considerado sumptuoso pelos cronistas da época. Pela sua “singularidade no contexto não só da arquitectura mendicante, como também da arquitectura gótica em geral”, foi considerado do maior interesse que o claustro então descoberto fosse passível de ser visitado. Tratou-se, de facto, de uma das mais importantes revelações no quadro da arqueologia medieval, tanto pela qualidade e quantidade dos vestígios encontrados, como também pelo valor do testemunho das edificações monásticas femininas góticas, na sua maioria mal preservadas ou muito modificadas.

Esta manifestação de interesse nacional levou o *Instituto Português do Património Arquitectónico (IPPAR)* a propor o estudo de três soluções alternativas. Na primeira solução proceder-se-ia à remoção permanente de água do conjunto patrimonial, através do rebaixamento do nível freático, ou seja, prosseguir-se-ia com a solução implementada até à data, mas numa perspectiva definitiva. Na segunda solução propunha-se criar um “espelho de água”, após as escavações. A área colocada a descoberto seria inundada, mas de forma a permanecer visível aos visitantes e protegida das agressões atmosféricas. Como derradeira opção, foi prevista a eventual selagem e enchimento das zonas sujeitas a remoção de terras e a sua re-inundação, após o respectivo estudo arqueológico.

Em particular, e no que se refere à segunda solução, designada em “ambiente húmido”, o estudo efectuado em 1997, pela empresa *AEMITEQ*, concluiu que a água afluyente à área do mosteiro, que iria formar o lago envolvente, teria características ligeiramente agressivas para a estrutura do monumento, essencialmente constituída por pedra calcária. A previsão feita com base na composição da água indicava também a necessidade de se proceder ao seu tratamento afim de evitar o desenvolvimento de fitoplancton que prejudicaria a transparência da água.

A solução em “ambiente seco” foi objecto de apreciação técnica pelo *LNEC*, no final de 1998. Foi assim retomado o estudo efectuado pela empresa *HIDROPROJECTO* em 1983. De acordo com o relatório do *LNEC*, as duas soluções propostas naquele documento correspondiam integralmente aos objectivos estabelecidos pelo *IPPAR*, embora a primeira (cortina + bombagem) fosse aparentemente mais vantajosa do ponto de vista técnico, permanecendo por avaliar o aspecto económico, em resultado da indefinição ainda existente sobre a área a ser objecto de tratamento.

No ano de 2000, o *IPPAR* lançou o concurso do projecto e da construção da “Cortina de Contenção Periférica do Mosteiro de Santa Clara-a-Velha”, em Coimbra. As intervenções a concurso permitiriam minimizar os custos de funcionamento e de manutenção inerentes ao sistema de rebaixamento do nível freático implementado à data,

¹ No documento do IPPAR consta um valor de 3 600 m³/hora para o caudal bombeado à data.

que apresentava alguns sinais de envelhecimento e de degradação. Estas intervenções integrariam uma cortina de impermeabilização – composta por uma parede moldada e pelo tratamento de impermeabilização por injeção do maciço rochoso subjacente –, um sistema de drenagem de águas pluviais e de águas subterrâneas remanescentes (que continuariam a afluir às cotas inferiores do recinto apesar da execução da cortina de impermeabilização) e as respectivas instalações eléctricas, a integração paisagística da área confinante com a cortina de impermeabilização e, finalmente, o plano de observação da obra.

A obra de contenção hidráulica, nos moldes atrás referidos, foi iniciada no último trimestre de 2001, e o primeiro painel da parede moldada foi construído no mês de Dezembro daquele ano. A conclusão da obra data de 2002.

Já mais recentemente, foi lançado um novo concurso para a construção de uma área museológica, obra que se encontrava concluída à data de elaboração deste documento.

Em termos geológico-geotécnicos, no local de implantação do mosteiro ocorrem as formações pertencentes à bacia aluvionar do Mondego, constituída por terrenos de idade Jurássica, essencialmente calcários e margas, que se prolongam na base da série aluvionar constituída por lodos, areias e cascalheiras. Superficialmente, ocorre uma formação de aterro de espessura variável, aparentemente bastante antigo.

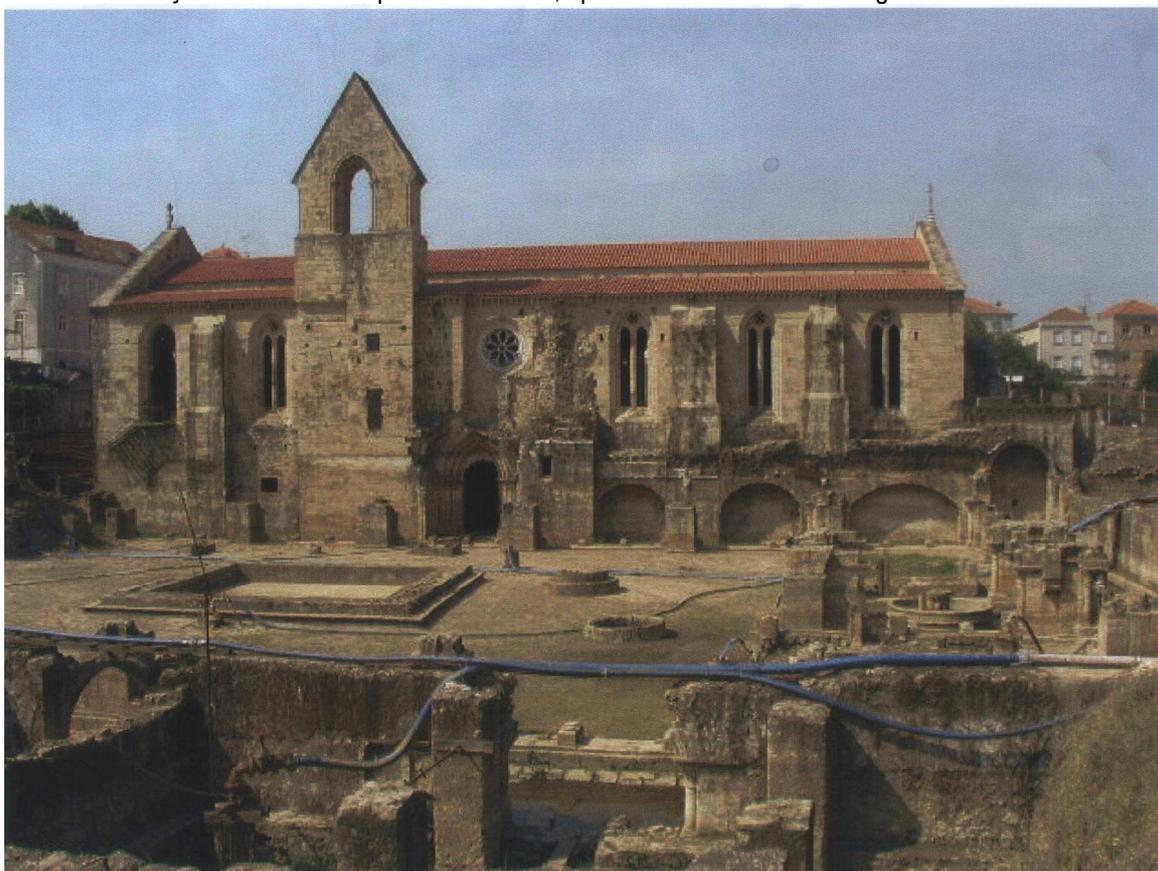


Foto 1 – Perspectiva geral do Mosteiro de Santa Clara-a-Velha e respectivo claustro, à data do início das obras.

2. PROJECTO

O Projecto-Base da intervenção de contenção hidráulica da Zona Arqueológica e Mosteiro de Santa Clara-a-Velha, foi elaborado pela empresa COBA, S.A.. Nos itens subsequentes são descritos os principais aspectos deste projecto.

2.1. DESCRIÇÃO DA SOLUÇÃO ADOPTADA

De acordo com o Projecto-Base [1], elaborado pela empresa COBA, S.A., as intervenções preconizadas incluíam:

- i) uma cortina de impermeabilização, envolvendo a periferia do Mosteiro de Santa Clara-a-Velha e áreas adjacentes com interesse arqueológico, constituída por uma parede moldada prolongada, em profundidade, pelo tratamento de impermeabilização, por injeção, do maciço de fundação;
- ii) um sistema de drenagem de águas pluviais e de águas subterrâneas (incluindo a alimentação eléctrica, os equipamentos e dispositivos de instrumentação acessórios);
- iii) a integração paisagística das áreas afectadas em fase de construção e das áreas confinantes com o coroamento da parede moldada e estruturas interferidas.

A parede moldada seria do tipo auto-endurecedor, plástica e de baixa permeabilidade, sendo os elementos básicos constituintes da mistura, a bentonite, o cimento e a água.

A parede moldada teria uma extensão total de cerca de 488 m e uma profundidade máxima variável entre 18 e 25 m, respectivamente, no Alinhamento Sul e no Alinhamento Nascente. A espessura da parede seria de 0,8 m, valor condicionado pela presença de uma espessa camada de cascalheiras.

O desenvolvimento dos trechos de escavação primários seria de 7,0 m, sendo de 2,0 m o trecho não escavado entre dois trechos primários. Este trecho de escavação secundário daria posteriormente lugar a um painel de 3,0 m, que entraria, portanto, 0,5 m em cada um dos painéis primários previamente executados. Assim, o desenvolvimento final dos painéis seria de 6 m - 3 m - 6 m. A parede ficaria, em média, encastrada no substrato margo-calcário cerca de 0,8 m.

A função de estanqueidade da parede seria prolongada, em profundidade, pelo tratamento de impermeabilização do maciço rochoso, através da execução duma cortina de injeções de calda de cimento até uma profundidade estimada da ordem de 15 m.

A cortina de injeções teria furos afastados de 3 m, definindo-se furos primários, secundários e terciários, com afastamento respectivo de 12, 6 e 3 m, recorrendo-se ao método de aproximações sucessivas ("split spacing"). Para a furação da cortina e posterior injeção, previa-se a colocação de negativos a eixo da parede moldada, encastrados no maciço e solidarizados no topo, constituídos por tubos de 100 mm de diâmetro. O primeiro trecho de injeção, com comprimento, de princípio, de 5 m, seria feito pelo método descendente, sendo os restantes trechos, igualmente de 5 m, realizados pelo método ascendente. No último trecho de injeção far-se-ia um ensaio de permeabilidade *Lugeon*, para determinar a permeabilidade do maciço, decidindo-se, face ao valor obtido, pelo término ou pela continuação do tratamento.

Relativamente às caldas de injeção, previu-se o recurso a caldas estáveis de cimento e água, com adição de areia, sempre que necessário, e bentonite para a estabilização dos inertes. Nas zonas em que existisse risco de arrastamento das caldas por fluxos subterrâneos, previa-se ainda recorrer a aceleradores de presa.

No final dos trabalhos preconizava-se a execução de alguns furos de controlo com ensaios *Lugeon* ao longo de todo o comprimento da cortina, no prolongamento dos furos de controlo a executar para a parede moldada.

A captação do caudal proveniente da percolação remanescente quer através da parede, quer através da cortina de injeção e, também, pelos trechos inferiores do maciço margo-calcário não tratados, seria feita por um sistema de drenagem e de bombagem. Este sistema integraria 7 furos de captação no perímetro Este, Oeste e Norte, sendo equipados com grupos electrobomba submersíveis, com capacidade para bombear de 2,8 l/s. A água captada acederia a um sistema de tubagens em *PVC* com Ø110 a 160 mm que envolveria todo o perímetro protegido e dimensionado por forma a permitir, no futuro, a integração, no sistema, de furos de captação adicionais, atendendo à possibilidade da escavação se prolongar em direcção à zona Sul.

Para além deste sistema de drenagem de águas subterrâneas, existiria ainda uma rede de colectores pluviais, interessando as zonas Norte e Este, contornando o perímetro dos claustros, materializado por tubos de betão Ø400 mm perfurados na calote superior e instalados em valas. Os caudais captados acederiam à estação elevatória equipada com 2 grupos electrobomba de 86 l/s.

Tendo em conta o valor patrimonial de toda a área delimitada pela cortina de impermeabilização e os impactes associados ao tipo de intervenções que iriam ser implementadas, previram-se algumas acções de recuperação paisagística, visando a minoração dos impactes e a valorização da área. Estas acções seriam implementadas ao longo do corredor que acompanha os alinhamentos de implantação da parede moldada, integrando a realização de sementeiras e plantio de espécies adequadas. Tratamento semelhante seria dado às zonas localizadas no talude Norte, na proximidade do mosteiro.

2.2. TRABALHOS DE PROSPECÇÃO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA

Os trabalhos de reconhecimento geológico-geotécnico que fundamentaram o Projecto-Base foram realizados em duas fases. A primeira no âmbito da campanha de prospecção de 1984/1985 e a segunda na campanha de 1997.

Na primeira fase realizaram-se 10 sondagens mecânicas à percussão, com ensaios de penetração dinâmica *SPT* (em geral de 2 em 2 m). Estas sondagens interessaram as camadas aluvionares e o maciço rochoso subjacente, tendo sido excepção a sondagem *S5A,84* com 6,7 m de comprimento, executada apenas para reconhecer o desenvolvimento lateral dos lodos detectados na sondagem *S5,84*. Em todos os furos de sondagem foram instalados piezómetros, com excepção das sondagens *S1,84* e *S7,84*.

Na segunda fase executaram-se mais 10 furos de sondagem, atravessando as formações aluvionares e entrando alguns metros no maciço subjacente, a menos da sondagem *S3B,97*, executada apenas para a instalação de um piezómetro. Nestas sondagens foram realizados ensaios *SPT*, com afastamento de 1,5 a 2 m, colhendo-se ainda algumas amostras para identificação dos solos. Nas formações aluvionares foram ainda executados ensaios de permeabilidade do tipo *Lefranc* (de carga constante e de carga variável) e, na formação rochosa fissurada, foram realizados ensaios de absorção de água do tipo *Lugeon*, medindo-se ainda o respectivo índice de qualidade do maciço (*RQD*) nos tarolos de sondagem. Após execução das sondagens, foram instalados em todos os furos (exceptuando o *3B*) tubos metálicos selados ao maciço com calda de cimento, permitindo a afluência de água apenas através dos trechos, não revestidos, inseridos nas formações rochosas. Estes dispositivos permitiram medir os níveis piézométricos no maciço e efectuar um ensaio de bombagem a caudal constante, em regime transitório. Sobre algumas amostras remexidas, retiradas do amostrador do ensaio *SPT*, foram realizados ensaios de laboratório de identificação geotécnica, designadamente análises granulométricas por peneiração e limites de Atterberg, com vista à classificação dos terrenos.

2.3. ZONAMENTO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO

De acordo com o projecto, os terrenos interessados pela obra situam-se na bordadura do rio Mondego, na sua margem esquerda.

Tratam-se de formações pertencentes à bacia aluvionar do Mondego, situando-se na zona que se aproxima da encosta, constituída por terrenos de idade Jurássica, essencialmente calcários e margas, que se prolongam na base da série aluvionar. Superficialmente, ocorre uma formação de aterro com espessura variável, aparentemente bastante antigo, tendo aliás sido objecto de trabalhos de investigação arqueológica na envolvente do mosteiro.

Ainda de acordo com o projecto, as formações ocorrentes no local podem ser descritas da seguinte forma:

- Formação actual:
 - C1 - Depósitos de aterros antigos, arenosos a argilosos, com pedras e fragmentos de cerâmica castanhas a amareladas, por vezes com intercalação de lodos cinzentos.
- Formações do Quaternário:
 - C2A - Lodos siltosos a arenosos cinzentos escuros, moles a muito moles.
 - C2B - Areias médias a grosseiras, mais ou menos argilosas, por vezes com seixos, medianamente a muito compactas.
 - C2C - Depósitos grosseiros constituídos por areia e cascalheiras, mais ou menos argilosas, geralmente muito compactas.
- Formações do Jurássico:
 - C3A - Argilas amarelas a cinzentas escuras, folhetadas, ligeiramente margosas, moles a muito moles.
 - C3B - Margas amareladas a acastanhadas com intercalações de calcários margosos pulverulentos, por vezes dolomíticas, com resistência variável.
 - C3C - Camada de argila mole cinzenta escura com superfícies espelhadas.
 - C3D - Calcários margosos carsificados, cinzentos a amarelados, por vezes pulverulentos a detriticos.

2.4. DEFINIÇÃO DA COMPOSIÇÃO DA CALDA

A escolha duma calda auto-endurecedora, com resistência mecânica basicamente conferida pelo cimento e com deformabilidade e com estanqueidade garantida fundamentalmente pela suspensão bentonítica, visou o adequado controlo da percolação através dos terrenos confinantes e a necessidade de se garantir um comportamento plástico num grande domínio de deformação.

Neste contexto, foi estabelecida como composição básica da calda, uma mistura de água, bentonite e cimento, seleccionados em proporções convenientes, de forma a satisfazer os seguintes requisitos:

- durante a escavação, a calda deveria comportar-se como uma lama densa tradicional para execução e suporte da escavação, tendo como principal finalidade assegurar a estabilidade da vala;
- posteriormente, após a execução e o preenchimento total da escavação e a presa se ter realizado, a mistura deveria exibir um comportamento adequado como constituinte da cortina de estanqueidade, sendo caracterizada por baixa permeabilidade e elevada resistência à erosão e exibindo um comportamento mecânico conveniente, fundamentalmente habilitando a cortina a sofrer deformações sem fissuração.

Tendo em consideração os requisitos anteriores, foram estabelecidas as seguintes propriedades e características da calda:

- Massa volúmica (calda fresca)..... 1040 a 1100 kg/m³

- Viscosidade (Marsh).....30 a 40 s
- pH.....9 a 12
- Resistência ao corte do gel (10 min).....0,012 a 0,018 kPa
- Resistência à compressão simples (28 dias)300 a 400 kPa
- Resistência à compressão simples (90 dias)500 a 700 kPa
- Coeficiente de permeabilidade..... 10^{-8} m/s
- Módulo de deformabilidade 100 a 150 MPa

Para que fossem respeitados os valores atrás definidos, a calda deveria ter a seguinte composição teórica:

- Água..... 1000 l
- Cimento..... 150 a 200 kg
- Bentonite 40 a 60 kg

A água a utilizar na amassadura seria doce, límpida e isenta de substâncias orgânicas, de cloretos ou de sulfatos em percentagens prejudiciais, bem como de óleos, de ácidos e de outras impurezas.

O cimento a utilizar seria o Portland Normal, considerado adequado às condicionantes locais de implantação da obra e à adequada fiabilidade da calda.

No que se refere à bentonite, depois de activada, a mesma teria um limite de liquidez superior a 400% e, em suspensão na água, não conteria nem partículas superiores a 0,08 mm, nem elementos prejudiciais à presa do cimento.

A composição atrás referida seria reformulada sempre que ocorressem as seguintes situações:

- i) atravessamento de camadas muito permeáveis, com grande poder de filtração \Rightarrow aumento da viscosidade da mistura ou introdução de aditivos;
- ii) quando a calda dos painéis extremos se tornasse “pastosa” devido a um rápido processo de reacção de presa \Rightarrow escolha de uma associação bentonite-cimento de baixa reacção ou introdução de um aditivo corrector;
- iii) adensamento da calda por integração de finos da escavação (com reflexos sobre as características finais da calda como elemento definitivo da parede) \Rightarrow alteração para uma calda menos evolutiva e mais fluida, por exemplo, por redução da quantidade de bentonite, ou por alteração do tipo de bentonite utilizado;
- iv) adensamento por perda de água por filtragem \Rightarrow alteração do tipo de bentonite utilizado ou aumento da viscosidade da mistura.

A introdução de aditivos na mistura seria ponderada nas seguintes situações:

- i) sempre que ocorresse contaminação por água salgada ou por outros sais agressivos e substâncias dissolvidas na água; neste caso, previa-se a eventual incorporação de aditivos de correcção, tais como substâncias coloidais orgânicas, fécula e seus compostos;
- ii) sempre que fosse necessário reduzir o poder de filtração em solos muito permeáveis; para este efeito poderiam ser utilizados colmatantes diversos de acção obstrutiva;
- iii) sempre que o início da reacção da presa com o cimento ocorresse de forma rápida, tornando a calda nos painéis já executados “pastosa”, impedindo a adequada homogeneização na zona de contacto e reentrância dos painéis secundários nos primários; nesta situação optar-se-ia pela incorporação de um retardador de presa;
- iv) sempre que ocorresse adensamento por integração de finos da escavação na calda; para minimizar este efeito, seria introduzida ou aumentada a dosagem do retardador de presa.

A composição final da mistura seria determinada com base nos resultados dos ensaios a realizar previamente à execução da obra.

2.5. ESTUDOS DE MODELAÇÃO

2.5.1. Considerações gerais

No Projecto-Base apresentam-se modelações de suporte à definição da geometria e das características dos elementos que constituem a cortina de impermeabilização – parede moldada e tratamento de impermeabilização por injeção – e ao dimensionamento do sistema de drenagem.

Os estudos efectuados incluíram a realização de análises de percolação – essenciais para estimar a eficiência da cortina na redução dos caudais afluentes, quantificar esses caudais e ainda determinar a configuração da superfície freática –, estudos de tensão-deformação, tendo em conta as possíveis acções a que a parede estaria sujeita, designadamente pressões hidrostáticas e sobrecargas, e estudos dinâmicos para avaliar a forma como a estrutura se comportaria durante a ocorrência de acções sísmicas.

Foram realizadas análises de sensibilidade, nas quais se admitiram hipóteses de cálculo conservativas, tendo-se considerado, para além de situações correntes, algumas situações excepcionais, nomeadamente de aumento do diferencial de pressões hidrostáticas, de redução da espessura da parede e da ocorrência de sobrecargas no tardo da parede, entre outras.

As acções consideradas no dimensionamento foram o diferencial de pressões hidroestáticas (da ordem de 4 m para situações de serviço normal e de 6 m em situações excepcionais), as acções sísmicas e ainda eventuais sobrecargas. Outras acções como as deformações por consolidação do terreno, as deformações de fluência, a rotura progressiva, a retracção/expansão e ainda a alteração/degradação da parede moldada, foram consideradas pouco prováveis ou de reduzida expressão. Em particular, e no que se refere aos fenómenos de fluência e de retracção/expansão, o Projectista previu a realização de ensaios específicos numa fase posterior do projecto. Quanto à alteração/degradação da parede, considerada pouco provável no período de vida útil da obra, os seus efeitos poderiam ser detectados através da análise dos resultados do sistema de observação a instalar na área.

Os resultados dos estudos de modelação permitiram ao Projectista validar a concepção geral das intervenções de impermeabilização e garantir a funcionalidade e a segurança da cortina, quer para situações correntes de serviço da obra, quer para situações excepcionais.

2.5.2. Resultados dos estudos de percolação

Nos estudos de percolação o Projectista recorreu ao método de elementos finitos, mediante a utilização do programa de cálculo automático, *SEEPW*. Nos cálculos efectuados foram admitidos modelos simplificados bidimensionais. Esta simplificação foi justificada pelo facto de se admitir que os diversos poços em funcionamento no recinto seriam suficientes para que o rebaixamento do nível freático na área em estudo fosse uniforme. Os estudos incidiram sobre dois perfis perpendiculares à parede, considerados representativos da área em estudo.

No Quadro 1 apresentam-se os valores de coeficiente de permeabilidade considerados no projecto e que foram validados pelas modelações efectuadas, conforme consta do Quadro 2, onde se apresentam as hipóteses de cálculo consideradas e os respectivos resultados.

Quadro 1 – Estudos de percolação. Coeficientes de permeabilidade considerados nas modelações.

MATERIAIS	COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE (m/s)
Aterro	5×10^{-5}
Solo argilo-arenoso	5×10^{-5}
Lodos	5×10^{-5}
Areia grosseira	5×10^{-4}
Cascalheira	1×10^{-4}
Areão argiloso	1×10^{-5}
Argila margosa	1×10^{-6}
Formação margo-calcária	5×10^{-6}
Parede moldada	1×10^{-8}
Tratamento de impermeabilização por injeção	5×10^{-7}

Da análise do Quadro 2 conclui-se que:

- i) a espessura da parede não foi condicionada pela necessidade de reduzir o caudal afluyente à escavação, pouco afectada por este aspecto, mas sim por motivos construtivos, relacionados com o atravessamento de camadas espessas de cascalheiras e com a necessidade de garantir uma espessura mínima nas juntas entre painéis, que poderia ser afectada por desvios na sua verticalidade;
- ii) o comprimento da cortina de estanqueidade por injeção não foi condicionado pela necessidade de reduzir o caudal afluyente à escavação, pouco sensível a variações deste parâmetro, mas sim pelo facto da informação geotécnica disponível para o maciço rochoso a maior profundidade ser insuficiente para se tomar uma decisão fundamentada.

2.5.3. Resultados dos estudos de tensão-deformação

As principais preocupações e objectivos dos estudos de tensão-deformação foram a avaliação das deformações da parede moldada e das tensões aplicadas em resultado do diferencial de pressões hidrostáticas entre o interior e o exterior da cortina e de outras cargas resultantes de situações não correntes. As análises realizadas permitiram aferir e validar a geometria e as características da parede moldada, designadamente, no que respeita à sua espessura e resistência do material constituinte.

Os estudos de tensão-deformação foram realizados recorrendo ao método de elementos finitos, mediante a utilização de um programa de cálculo automático – *SIGMAW*. Na análise dos esforços induzidos na parede, em virtude do diferencial de pressões hidrostáticas, foi também utilizado um modelo simplificado de vigas em meio elástico, desenvolvido na empresa projectista, com o objectivo de aferir e de validar os resultados obtidos. Este programa também utiliza o método dos elementos finitos para a resolução das indeterminações, empregando, para o efeito, elementos do tipo barra.

Nas modelações realizadas adoptaram-se leis de comportamento simples – elasto-plásticas e, essencialmente, lineares elásticas – opção que se deveu ao tipo de informação de base disponível. Desta forma, o Projectista refere que os resultados obtidos com a modelação deveriam ser considerados como indicativos da ordem de grandeza do parâmetro em questão – deformações e esforços – e não como valores absolutos.

Quadro 2 – Estudos de percolação. Descrição e resultados obtidos.

CENÁRIO DE CÁLCULO	OBJECTIVOS	CAUDAL (l/s)	COMENTÁRIOS
1. Situação inicial, sem bombagem.	Determinar a influência da bombagem sobre a magnitude do caudal afluyente à área.	6,6	<ul style="list-style-type: none"> Sem o rebaixamento forçado do NF, o caudal afluyente à zona da escavação seria cerca de 5 a 6 vezes inferior aos valores bombeados à data do Projecto-Base.
2. Situação existente à data do Projecto Base (rebaixamento do NF com recurso exclusivo a bombagem).	Aferir os modelos de cálculo, designadamente, os coeficientes de permeabilidade atribuídos aos materiais, através da comparação com os valores reais do caudal bombeado exclusivamente com o sistema de bombagem.	37,0	<ul style="list-style-type: none"> O caudal real bombeado, de 500 m³/hora é cerca de 4 vezes superior ao resultante da modelação. A diferença foi explicada pelos seguintes factores: i) as aflúncias superficiais resultantes da precipitação sobre a bacia hidrográfica não foram contabilizadas; ii) as aflúncias subterrâneas, nomeadamente, através de cavernas cársicas ou de outras descontinuidades não são simuláveis; iii) foram admitidas hipóteses simplificativas nos cálculos. Apesar desta diferença, mantiveram-se as hipóteses de cálculo, por se considerar irrealista a atribuição de coeficientes de permeabilidade superiores aos considerados e que foram baseados nos resultados dos trabalhos de prospecção geológico-geotécnica.
3. Situação posterior às intervenções preconizadas no Projecto-Base.			
3.1. Situação posterior às intervenções projectadas (descritas em 2.1.)	Dimensionar as intervenções de impermeabilização e o sistema de bombagem e drenagem e determinar a sua eficiência através da comparação com o caudal bombeado antes da sua implementação.	4,2	<ul style="list-style-type: none"> Redução do caudal afluyente para 11% do caudal estimado no ponto 2. Rebaixamento eficiente do NF. Valor do caudal em consonância com o estimado no relatório do LNEC.
3.2. Igual a 3.1, mas sem sistema de bombagem / drenagem.	Determinar a eficiência das intervenções sem bombagem e drenagem.	2,0	<ul style="list-style-type: none"> Redução do caudal afluyente em 18 vezes relativamente à situação modelada em 2. O objectivo de rebaixamento do NF, nas zonas de escavação, para cotas inferiores às do terreno, não é atingido apenas com as intervenções de impermeabilização.
3.3. Igual a 3.1, mas atribuindo à parede espessura inferior à projectada.	Determinar a espessura de parede mais adequada para cumprir os objectivos definidos.	4,4	<ul style="list-style-type: none"> Caudal superior em 5% ao estimado em 3.1. A eficiência da solução é pouco afectada pela espessura da parede moldada.
3.4. Igual a 3.1, mas atribuindo ao tratamento por injeção uma profundidade inferior à projectada (10 m).	Definir a profundidade mínima do tratamento de impermeabilização profundo para cumprir os objectivos definidos.	4,4	<ul style="list-style-type: none"> Caudal 5% superior ao estimado em 3.1. A eficiência da solução é pouco afectada pela profundidade atingida pelo tratamento por injeção.
3.5. Igual a 3.1, mas prevendo-se uma subida de 1 m do NF na zona exterior da parede.	Dimensionar o sistema de bombagem / drenagem numa situação de ocorrência excepcional.	4,8	<ul style="list-style-type: none"> Acréscimo de 14% no caudal afluyente à escavação relativamente à situação de referência (3.1.).
3.6. Igual a 3.1, mas prevendo a ocorrência de descontinuidades simuladas através de duas aberturas contínuas de 0,5 m.	Dimensionar o sistema de bombagem / drenagem numa situação de ocorrência excepcional.	6,7	<ul style="list-style-type: none"> Caudal superior ao estimado na situação de referência (3.1.) em cerca de 60% (o Projectista considerou ser pouco provável a ocorrência de uma descontinuidade em toda a extensão da cortina e optou por dividir o caudal da modelação por 2).
3.7. Situação final da obra de fecho da cortina.	Estimar a velocidade de percolação durante o fecho da cortina e avaliar os seus efeitos sobre a integridade da mesma.	-	<ul style="list-style-type: none"> Modelação simplificada, admitindo que a percolação se faz, exclusivamente, no plano horizontal. A velocidade de percolação não ultrapassou o valor de $5,3 \times 10^{-5}$ m/s para um caudal afluyente de $1,6 \times 10^{-4}$ m³/s/m. O valor obtido é muito reduzido, tendo o Projectista considerado que não colocava em causa a integridade da parede na zona de fecho.

No Quadro 3 apresentam-se as características de deformabilidade adoptadas nos cálculos e no Quadro 4 sintetizam-se os resultados dos cálculos efectuados através do programa *SIGMAW*.

Quadro 3 – Estudos de tensão-deformação. Características de deformabilidade dos materiais adoptadas no Projecto-Base.

MATERIAIS	MÓDULO DE DEFORMABILID. (MPa)	COEFICIENTE DE POISSON	COEFICIENTE REACÇÃO (kN/m ³)
(C1) Depósitos de aterros antigos arenosos e argilosos com intercalações lodosas.	8 a 15	0,4	10 000 a 20 000
(C2A) Lodos siltosos e arenosos moles a muito moles.	8 a 10	0,45	5 000
(C2B) Areias médias a grosseiras mais ou menos argilosas.	15 a 50	0,3 a 0,35	25 000 a 100 000
(C2C) Depósitos grosseiros - areias e cascalheiras mais ou menos argilosas, geralmente muito compactas.	75	0,3	150 000
(C3A) Argilas moles a muito moles.	8	0,4	5 000 a 10 000
(C3B) Marga dolomítica com intercalações de calcários margosos.	100 a 250	0,25 a 0,3	100 000 a 250 000
(C3C) Camada de argila mole.	8	0,4	5 000

No que se refere à parede moldada, o módulo de deformabilidade adoptado foi de 50 MPa, atendendo às especificações do Caderno de Encargos, no qual se indicavam valores a variarem entre 20 MPa e 100 MPa, consoante a extensão do material.

Tendo em consideração os resultados dos cálculos efectuados, o Projectista concluiu que a funcionalidade e a segurança da parede estariam garantidos, facto que resultava da significativa deformabilidade da cortina que a habilitava a deformar-se em conjunto com o solo confinante, sem que ocorressem fissurações, para qualquer situação de vida da obra estudada.

No que se refere às tensões a que a parede estaria sujeita, o Projectista concluiu que as mesmas seriam inferiores à resistência da calda constituinte, com excepção da situação excepcional de subida do *NF*, em que as tensões de tracção no trecho superior da parede seriam superiores à sua resistência. Porém, uma vez que estas tensões ocorreriam no trecho acima do *NF*, o Projectista concluiu que a funcionalidade da parede não seria comprometida.

2.5.4. Resultados dos estudos dinâmicos

A integridade da parede moldada quando submetida a acções sísmicas, em particular no que se refere à sua função impermeabilizante, foi verificada através de uma análise dinâmica, tendo o Projectista recorrido ao programa de cálculo automático, *FLAC*.

Este programa permite modelar o comportamento dinâmico, em regime não linear, de obras geotécnicas em estado de deformação plana. Os cálculos baseiam-se num algoritmo explícito, de diferenças finitas, para a integração das equações completas do movimento, utilizando massas concentradas nos pontos nodais. No caso de serem aplicadas leis constitutivas não-lineares esta formulação é inteiramente não-linear.

Quadro 4 – Estudos de tensão-deformação. Descrição e resultados obtidos.

DESCRIÇÃO DA SITUAÇÃO DE CÁLCULO	RESULTADOS DOS CÁLCULOS	COMENTÁRIOS
1. Situação normal de serviço da obra.	$d_{max} = 31 \text{ mm}$ $\epsilon_{max} = 0,14\%$ $M_{max.} = 5,9 \text{ kNm/m}$ $\sigma_{comp,max} = 312 \text{ kPa}$ $\sigma_{tracção,max} = 24 \text{ kPa}$ $\tau_{max} = 11,8 \text{ kPa}$	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Os deslocamentos e extensões obtidos são de pequena magnitude, garantindo a funcionalidade e a segurança da parede. ▪ A parede encontra-se comprimida em toda a sua altura, à excepção do trecho superior, localizado acima do NF, que se encontra parcialmente traccionado. ▪ Os valores das tensões a que a parede estará sujeita ao longo da sua altura, são inferiores à resistência prevista para o material constituinte da parede, garantindo-se, assim, a funcionalidade e a segurança da parede.
2. Situação correspondente à subida do nível de água, no terreno exterior à parede, em 1 m relativamente ao nível normal, em simultâneo com o rebaixamento do nível no interior do recinto até à cota mínima de operação das bombas.	$d_{max} = 50 \text{ mm}$ $\epsilon_{max} = 0,20\%$ $M_{max.} = 9,3 \text{ kNm/m}$ $\sigma_{comp,max} = 344 \text{ kPa}$ $\sigma_{tracção,max} = 69 \text{ kPa}$ $\tau_{max} = 19,6 \text{ kPa}$	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Esta é a situação mais desfavorável em termos de deslocamentos e esforços a que a parede moldada estará sujeita. ▪ Os deslocamentos e extensões obtidos são ainda de pequena magnitude, garantindo a funcionalidade e segurança da parede. ▪ Em relação à situação de exploração normal (Situação 1) constata-se que o momento-flector aumenta 1,5 a 2 vezes. ▪ A parede encontra-se comprimida em toda a sua altura, à excepção do trecho superior, localizado acima do NF, que se encontra parcialmente traccionado. O valor da tracção a que a secção estará sujeita ultrapassa a resistência do material, mas a funcionalidade da parede não é afectada, uma vez que a secção traccionada se localiza acima do NF. ▪ Os valores das tensões de compressão e de corte a que as secções estarão sujeitas, são inferiores à resistência prevista para o material constituinte da parede, garantindo-se, assim, a funcionalidade e segurança da parede.
3. Situação correspondente à presença de sobrecargas na zona exterior e adjacente à parede (20 kPa) para simular a eventual construção de edificações ou de aterros.	$d_{max} = 37 \text{ mm}$ $\epsilon_{max} = 0,16\%$ $M_{max.} = 7,1 \text{ kNm/m}$ $\sigma_{comp,max} = 324 \text{ kPa}$ $\sigma_{tracção,max} = 47 \text{ kPa}$ $\tau_{max} = 15,0 \text{ kPa}$	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Esta é uma situação intermédia em relação às duas anteriores (1 e 2), verificando-se que quer os deslocamentos e as extensões quer os esforços são de pequena magnitude, garantindo a funcionalidade e a segurança da parede. ▪ A parede encontra-se comprimida em toda a sua altura, à excepção do trecho superior, localizado acima do NF, que se encontra parcialmente traccionado. ▪ Os valores das tensões a que a parede estará sujeita ao longo da sua altura são inferiores à resistência prevista para o material constituinte da parede, garantindo-se assim a funcionalidade e segurança da parede.

Os acelerogramas utilizados foram gerados pelo programa *SIMQKE-II*. Foram considerados dois tipos de sismo, correspondendo às acções regulamentares do tipo 1 e do tipo 2. As durações foram, respectivamente, de 10 s e 30 s. Foram utilizadas as funções de densidade espectral de potência de aceleração regulamentares para o terreno tipo II. Os valores tabelados foram multiplicados por 0,25 (α_2), valor especificado para a zona sísmica C, onde se localiza a obra. Para o amortecimento foi assumido o valor $D = 0,1$, isto é 10% do amortecimento crítico. O amortecimento por radiação não foi modelado no Projecto-Base.

Tendo como base os resultados, o Projectista concluiu que, para ambos os tipos de acção sísmica, ocorreria uma amplificação da aceleração horizontal de cerca de 10 vezes, entre a base e o topo da parede e que nenhum elemento da parede entraria em cedência durante a actuação da acção sísmica, o que confirmava a sua integridade funcional para esta situação excepcional.

2.6. PLANO DE OBSERVAÇÃO

Para conhecimento das condições de funcionalidade e avaliação das condições de segurança da cortina de impermeabilização (parede moldada e tratamento de impermeabilização por injeção do maciço de fundação) e da conformidade do seu comportamento relativamente ao preconizado, foi definido um sistema de observação.

Na definição do Plano de Observação, foram identificados, em primeiro lugar, os incidentes e os acidentes plausíveis, tendo em consideração a função da obra e o facto da parede se encontrar confinada por terreno natural de ambos os lados. Estes seriam, essencialmente, os seguintes:

- i) deformações horizontais excessivas que poderiam conduzir a fissuração ou roturas localizadas da parede;
- ii) percolações excessivas que poderiam levar à subida do nível freático no interior da área delimitada pela cortina e a fenómenos de erosão interna dos terrenos ou da calda da parede interessados pelas afluições não controladas.

As causas que poderiam originar os dois tipos de incidente ou de acidente referidos são as seguintes:

- i) o aumento das acções de dimensionamento para valores não previstos, por exemplo, o aumento do impulso hidrostático diferencial entre a zona exterior e a zona interior da cortina ou a ocorrência de sismos de magnitude superior à considerada no Projecto-Base;
- ii) a utilização localizada de caldas com características mecânicas inferiores às especificadas ou a sua mistura localizada com materiais escavados;
- iii) acções físicas ou químicas sobre os materiais constituintes da parede, conduzindo, progressivamente à sua degradação;
- iv) acções físico-químicas sobre os terrenos confinantes com a parede, causando a sua degradação progressiva;
- v) a ocorrência de descontinuidades entre painéis consecutivos da parede ou a redução localizada da sua espessura devido, por exemplo, a um deficiente controlo da verticalidade durante a execução;
- vi) a deficiente ligação da parede ao maciço de fundação e/ou ao tratamento de impermeabilização.

A ocorrência destes cenários poderia conduzir à rotura localizada e/ou perda de eficiência da cortina de impermeabilização com eventual submersão do piso inferior do mosteiro e das cotas inferiores do restante recinto. No entanto, e dado o carácter localizado que os potenciais incidentes e/ou acidentes teriam, a consequente subida do *NF*, nas áreas a cotas inferiores, poderia ser compensada pelo sistema de drenagem implementado, naturalmente durante um período de transição em que se procederia à caracterização e à

correção dos potenciais incidentes e/ou acidentes, para o que contribuiria a análise dos resultados do sistema de observação instalado.

Tendo em consideração o exposto anteriormente, o Projectista propôs a instalação dos seguintes dispositivos:

- 9 tubos inclinométricos, instalados em painéis da parede moldada, para controlo dos deslocamentos horizontais internos em perfis representativos do seu desenvolvimento e em zonas localizadas na proximidade de edificações;
- 18 bases de alongâmetro de três pernos, para medição dos deslocamentos planimétricos relativos entre juntas de painéis consecutivos da parede moldada para aferir a sua continuidade;
- 20 câmaras piezométricas, instaladas em 8 furos, para medição dos níveis hidráulicos de forma a controlar a percolação e a variação da superfície de saturação nos terrenos exteriores à zona delimitada pela parede;
- 41 câmaras piezométricas, instaladas em 18 furos, para medição dos níveis hidráulicos nos terrenos interiores à zona delimitada pela parede;
- medidores de nível (sondas piezo-resistivas) para registo dos níveis hidráulicos nos furos de bombagem e para medição indirecta dos caudais bombeados.

As câmaras piezométricas referidas ficariam localizadas nas várias formações interessadas com comportamento hidráulico diferenciado e situadas quer na zona exterior, quer na zona interior delimitada pela parede moldada e pelo respectivo tratamento de impermeabilização do maciço de fundação.

A obra seria ainda objecto de inspecção visual, tendo sido estabelecidos os seguintes aspectos a serem objecto de atenção particular:

- i) o topo da parede e os trechos laterais visíveis, verificando e registando a eventual ocorrência de fissuras e movimentos entre painéis;
- ii) toda a área interior confinada pela parede moldada, identificando zonas húmidas, ressurgências e/ou movimentos;
- iii) os furos de bombagem, verificando a eventual ocorrência de movimentos ou de fenómenos anormais nas suas imediações;
- iv) o sistema de observação, verificando a sua integridade e a sua funcionalidade.

No que se refere à leitura dos dispositivos, apresentam-se, no Quadro 5, as frequências estabelecidas para cada fase de vida da obra, assim como a periodicidade prevista para as inspecções visuais.

Quadro 5 – Plano de Observação. Frequência das leituras.

	FASE DE CONSTRUÇÃO	1º PERÍODO DE EXPLORAÇÃO (1 a 2 anos)	PERÍODO POSTERIOR DE EXPLORAÇÃO
Tubos inclinométricos	Mensal	Trimestral	Semestral
Bases de alongâmetro	Quinzenal	Mensal	Trimestral
Piezómetros hidráulicos	Quinzenal	Mensal	Trimestral
Medidor de nível	Registo	Registo	Registo
Inspecção visual de rotina	Mensal	De 2 em 2 meses	Trimestral
Insp. visual de especialidade	No final da construção	Anual	Anual
Insp. visual excepcional	Após ocorrência excepcional	Após ocorrência excepcional	Após ocorrência excepcional

3. CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICO-GEOTÉCNICAS

3.1. DESCRIÇÃO DOS TRABALHOS DE PROSPECÇÃO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA

Os trabalhos de prospecção geológico-geotécnica efectuados na área do mosteiro, em três épocas distintas – 1958/1959, 1984/1985 e 1997 –, foram da responsabilidade da empresa *TEIXEIRA DUARTE, S.A.* A descrição da informação disponibilizada pelas campanhas é apresentada no Quadro 6 e no Quadro 7. No Des. 1 apresenta-se a localização, em planta, de todas as sondagens efectuadas no local. É de salientar que a localização das sondagens efectuadas na campanha de 1958/1959 não é rigorosa.

No total foram realizadas 26 sondagens, acompanhadas pela realização de ensaios de penetração dinâmica do tipo *SPT* e de ensaios de determinação da permeabilidade do tipo *Lefranc* e do tipo *Lugeon*. Nalgumas sondagens foram recolhidas amostras para a realização de ensaios de laboratório que se limitaram à determinação da granulometria por peneiração e à determinação dos limites de consistência.

Tratando-se de uma obra de impermeabilização, foi preocupação fundamental, no planeamento dos trabalhos de prospecção, a determinação da permeabilidade das diversas formações interessadas. Neste sentido, foram introduzidos piezómetros na grande maioria dos furos de sondagem, e efectuados alguns ensaios de esgotamento dos furos e ainda um ensaio de bombagem.

Quadro 6 – Identificação das sondagens efectuadas na área do mosteiro e dos ensaios “in situ”.

CAMPANHA	IDENTIFICAÇÃO	COTA TOPO	PROF. (m)	ENSAIOS REALIZADOS
1958/1959	S1,59	(*)	12,50	1 ensaio <i>Lefranc</i>
	S1A,59	(*)	12,65	-
	S1B,59	(*)	16,20	3 ensaios <i>Lefranc</i>
	S2,59	18,70	17,70	4 ensaios <i>Lefranc</i>
	S3,59	18,40	15,90	4 ensaios <i>Lefranc</i>
	S4,59	(*)	20,35	3 ensaios <i>Lefranc</i>
1984/1985	S1,84	19,28	19,10	2 ensaios <i>SPT</i>
	S2,84	18,40	19,95	5 ensaios <i>SPT</i>
	S3,84	17,83	25,34	13 ensaios <i>SPT</i>
	S4,84	17,27	17,40	2 ensaios <i>SPT</i>
	S5,84	18,00	25,10	14 ensaios <i>SPT</i>
	S5A,84	18,00	6,70	-
	S6,84	17,68	19,65	10 ensaios <i>SPT</i>
	S7,84	17,92	19,15	10 ensaios <i>SPT</i>
	S8,84	16,79	17,44	9 ensaios <i>SPT</i>
S9,84	18,17	26,35	14 ensaios <i>SPT</i>	
1997	S1,97	18,01	29,60	17 ensaios <i>SPT</i> , 3 ensaios <i>Lefranc</i> , 1 ensaio <i>Lugeon</i>
	S2,97	18,52	27,25	13 ensaios <i>SPT</i> , 3 ensaios <i>Lefranc</i> , 1 ensaio <i>Lugeon</i>
	S3,97	18,11	27,40	13 ensaios <i>SPT</i> , 1 ensaio <i>Lugeon</i>
	S3A,97	18,25	25,50	4 ensaios <i>SPT</i> , 1 ensaio <i>Lugeon</i>
	S3B,97	17,95	15,50	-
	S4,97	18,13	19,70	9 ensaios <i>SPT</i> , 1 ensaio <i>Lugeon</i>
	S5,97	18,04	21,50	10 ensaios <i>SPT</i> , 1 ensaio <i>Lugeon</i>
	S6,97	18,11	35,00	16 ensaios <i>SPT</i> , 3 ensaios <i>Lefranc</i> , 1 ensaio <i>Lugeon</i>
	S7,97	19,83	31,05	15 ensaios <i>SPT</i> , 3 ensaios <i>Lefranc</i>
S8,97	19,03	22,00	14 ensaios <i>SPT</i> , 3 ensaios <i>Lefranc</i> , 1 ensaio <i>Lugeon</i>	

(*) Desconhecida

Quadro 7 – Identificação dos ensaios de laboratório efectuados sobre amostras recolhidas nas sondagens.

CAMPANHA	SONDAGEM	DESIGNAÇÃO	PROF. (m)	ENSAIOS EFECTUADOS
1997	S1,97	0261/97	2,8-3,25	Granulometria e limites de Atterberg
		0262/97	4,3-4,75	Granulometria e limites de Atterberg
		0263/97	5,8-6,25	Granulometria e limites de Atterberg
	S2,97	0264/97	3,5-3,95	Granulometria e limites de Atterberg
		0265/97	5,5-5,95	Granulometria e limites de Atterberg
		0266/97	9,5-9,95	Granulometria e limites de Atterberg
	S3,97	0267/97	3,6-4,05	Granulometria e limites de Atterberg
		0268/97	5,6-6,05	Granulometria e limites de Atterberg
		0269/97	7,6-8,05	Granulometria e limites de Atterberg
	S4,97	0292/97	1,6-2,05	Granulometria e limites de Atterberg
		0293/97	3,6-4,05	Granulometria
		0294/97	7,6-8,05	Granulometria e limites de Atterberg
	S5,97	0295/97	1,6-2,05	Granulometria e limites de Atterberg
		0296/97	3,6-4,05	Granulometria e limites de Atterberg
		0297/97	5,6-6,05	Granulometria e limites de Atterberg
	S6,97	0270/97	3,0-3,45	Granulometria
		0271/97	4,5-4,95	Granulometria
		0272/97	6,0-6,45	Granulometria e limites de Atterberg
	S7,97	0226/97	3,5-3,95	Granulometria
		0227/97	5,3-5,75	Granulometria
		0228/97	6,8-7,25	Granulometria
	S8,97	0298/97	3,5-3,95	Granulometria e limites de Atterberg
		0299/97	5,0-5,45	Granulometria e limites de Atterberg
		0300/97	6,5-6,95	Granulometria e limites de Atterberg

3.2. RESULTADOS DOS TRABALHOS DE PROSPECÇÃO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA

Os resultados dos trabalhos de prospecção geológico-geotécnica encontram-se resumidos no Quadro 8 ao Quadro 11.

Na Fig. 1 à Fig. 4 apresentam-se as curvas granulométricas das amostras ensaiadas e a sua localização na carta de plasticidade.

No Quadro 12 apresentam-se os resultados das leituras do nível de água efectuadas nos piezómetros instalados nalgumas sondagens e no Quadro 13 sintetiza-se o comportamento manifestado pelos piezómetros instalados na campanha de 1997, durante e após o esgotamento de água do furo.

É de salientar que na campanha de 1984/1985 faz-se menção a dificuldades na obtenção de amostras indeformadas.

Na campanha de 1997 e mais especificamente na sondagem S3,97 foi detectada a presença de uma caverna com cerca de 1 m de altura, nas formações calcárias.

No que se refere aos resultados dos ensaios *Lefranc*, foi tido em consideração que os mesmos fornecem, frequentemente, valores inferiores aos reais. “Esta anomalia sistemática é atribuída à deposição nas paredes da lanterna ou no topo do maciço filtrante das partículas finas que existem sempre em suspensão na água situada no interior da coluna de revestimento que colmatam, mais ou menos, a lanterna e conduzem a valores de permeabilidade inferiores aos reais” [Teixeira Duarte, S.A.].

Quadro 8 – Resultados dos ensaios de penetração dinâmica SPT.

CAMPANHA	SONDAGEM	ACTUAL		QUATERNÁRIO						JURÁSSICO							
		C1		C2A		C2B		C2C		C3A		C3B		C3C		C3D	
		Prof. (m)	N _{SPT}	Prof. (m)	N _{SPT}	Prof. (m)	N _{SPT}	Prof. (m)	N _{SPT}	Prof. (m)	N _{SPT}	Prof. (m)	N _{SPT}	Prof. (m)	N _{SPT}	Prof. (m)	N _{SPT}
1984	S1,84	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	17,95	60	-	-	-	-
	S2,84	-	-	-	-	12,85	Nega	15,07	Nega	-	-	19,45	60	-	-	-	-
	S3,84	-	-	7,15	8	2,15	17	11,15	31	-	-	20,15	52	-	-	-	-
					4,15	3	13,15	45				21,15	40				
					10,15	15	14,88	Nega				23,15	50				
							15,45	60				25,15	60				
							16,45	60									
	S4,84	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	16,35	59	-	-	-	-
												17,40	Nega				
S5,84			6,15	3	2,15	8	17,15	26	-	-	24,08	Nega	-	-	-	-	
			8,15	4,15	2	19,15	35				25,10	Nega					
			10,55	11,15	9	21,15	35										
				13,15	3	23,15	60										
				15,15	35												
S6,84	2,15	3	-	-	4,15	39	10,15	Nega	16,15	12	-	-	-	-	-	-	
					6,15	34	12,15	Nega	18,15	8							
					8,15	53	14,15	30	19,65	Nega							
S7,84	-	-	-	-	2,15	10	6,15	58	-	-	18,15	46	16,15	0	-	-	
					4,15	60	8,15	42			19,15	13					
							10,15	34									
							12,11	Nega									
							14,15	35									
S8,84	2,15	8	-	-	6,15	60	12,05	Nega	-	-	16,15	60	-	-	-	-	
	4,15	7			8,15	60	14,07	Nega			17,15	60					
					10,15	60											
S9,84	2,15	7	4,15	6	12,15	14	20,15	Nega	-	-	25,84	Nega	-	-	-	-	
			6,15	6	14,15	23	22,15	60			26,35	Nega					
			8,15	6	16,15	47	24,15	60									
			10,15	9	18,15	60											

Quadro 8 – Resultados dos ensaios de penetração dinâmica SPT (cont.).

CAMPANHA	SONDAGEM	ACTUAL		QUATERNÁRIO						JURÁSSICO							
		C1		C2A		C2B		C2C		C3A		C3B		C3C		C3D	
		Prof. (m)	N _{SPT}	Prof. (m)	N _{SPT}	Prof. (m)	N _{SPT}	Prof. (m)	N _{SPT}	Prof. (m)	N _{SPT}	Prof. (m)	N _{SPT}	Prof. (m)	N _{SPT}	Prof. (m)	N _{SPT}
1997	S1,97	-	-	1,45	4	2,95	5	14,5	60	-	-	21,95	60	25,95	60	-	-
				4,45	1	10,45	14	16,3	60			23,95	60				
				5,95	1	11,95	7	17,85	60			27,95	27				
				7,75	0	13,45	42	19,85	15								
				8,95	4												
	S2,97	1,65	5	-	-	9,65	13	11,65	60	21,65	41	23,65	56	-	-	-	-
		3,65	2					13,65	60			25,65	60				
	5,65	2					15,65	60									
	7,65	13					17,65	60									
							19,65	60									
S3,97	1,75	3	-	-	3,75	4	7,75	29	-	-	19,76	60	-	-	-	-	
					5,75	2	9,85	40			22,40	30					
							11,85	60			23,85	60					
							13,85	60			25,85	60					
							15,78	60									
							17,75	60									
S3A,97	-	-	-	-	-	-	17,85	60	23,15	30	-	-	-	-	-	-	
							19,85	60									
							21,55	60									
S4,97	-	-	-	-	1,75	11	8,05	15	-	-	15,75	60	-	-	17,75	60	
					3,75	19	9,60	Nega									
					5,75	7	11,75	25									
							13,75	60									
S5,97	1,75	9	-	-	-	-	3,75	25	-	-	17,85	60	-	-	19,76	60	
							5,75	49									
							7,75	48									
							9,85	60									
							11,85	60									
							13,83	60									
							15,85	17									

Quadro 8 – Resultados dos ensaios de penetração dinâmica SPT (cont.).

CAMPANHA	SONDAGEM	ACTUAL		QUATERNÁRIO						JURÁSSICO							
		C1		C2A		C2B		C2C		C3A		C3B		C3C		C3D	
		Prof. (m)	N _{SPT}	Prof. (m)	N _{SPT}	Prof. (m)	N _{SPT}	Prof. (m)	N _{SPT}	Prof. (m)	N _{SPT}	Prof. (m)	N _{SPT}	Prof. (m)	N _{SPT}	Prof. (m)	N _{SPT}
1997	S6,97	1,15	9	-	-	3,15	1	12,15	52	-	-	18,15	26	19,65	5	-	-
		4,65	12			13,64	60					22,65	60	21,15	5		
		6,15	48			15,15	60					24,07	60				
		7,65	40			16,55	60										
		9,15	53														
	10,65	40															
	S7,97	1,15	20	-	-	9,95	60	6,95	36	16,15	12	20,65	40	-	-	-	-
		3,65	2					8,45	35	17,65	60	21,15	60				
		5,45	16					11,65	50	19,15	28	23,28	60				
							13,15	31									
S8,97	0,65	4	-	-	-	-	8,65	33	-	-	15,75	4	-	-	-	-	
	2,15	5					10,15	48			16,65	32					
	3,65	3					11,65	60			18,12	60					
	5,15	3					13,15	60			20,13	60					
	6,65	8					14,65	60									

Quadro 9 – Resultados dos ensaios de permeabilidade do tipo Lefranc.

CAMPANHA	SONDAGEM	PROF. (m)	FORMAÇÃO	PERMEAB. (m/s)
1958-1959	S1B,59	12,5 - 13,7	(C2B) areão com burgau.	1×10^{-5}
	S2,59	10,0	(C1) lodo arenoso com fragmentos.	NA
		14,8 - 15,4	(C2C) areão grosseiro com burgau.	$1,9 \times 10^{-4}$
1997	S3,59	6,25 - 6,4	(C1) areia cinzenta.	$1,2 \times 10^{-4}$
		9,4 - 10,4	(C1) areão lodoso.	$3,0 \times 10^{-6}$
		12,1 - 12,8	(C2B/C2C) areão com burgau.	4×10^{-5} a 7×10^{-5}
		15,8 - 15,9	(C2B/C2C) areão grosseiro com burgau.	9×10^{-5}
1997	S1,97	7,0	(C2A) lodo cinzento escuro.	$2,6 \times 10^{-6}$
		10,8	(C2B) areia grosseira argilosa com seixos.	$4,8 \times 10^{-6}$
		14,8	(C2C) cascalheira argilosa, amarelada.	$1,6 \times 10^{-4}$
	S2,97	7,0 - 7,75	(C1) aterro arenoso c/ pedras e fragmentos de cerâmica.	$4,3 \times 10^{-5}$
		11,0 - 11,5	(C2B) areia grosseira acastanhada com areão e seixos rolados.	2×10^{-5}
S6,97	15,0 - 15,5	(C2C) cascalheira argilosa amarelada.	$1,4 \times 10^{-5}$	
	5,7 - 6,0	(C2B) argila arenosa, avermelhada com seixos rolados.	$1,7 \times 10^{-6}$	
	9,8 - 10,3	(C2B) areia grosseira argilosa acastanhada com seixos.	$1,3 \times 10^{-6}$	
S7,97	14,0 - 14,5	(C2C) areão argiloso com seixos.	$2,1 \times 10^{-6}$	
	6,3	(C1) aterro argilo-arenoso com fragmentos de cerâmica.	$5,3 \times 10^{-6}$	
S8,97	10,0	(C2B) areia grosseira, um pouco argilosa, acastanhada com areão.	$7,3 \times 10^{-6}$	
	14,0 - 14,5	(C2C) cascalheira argilosa acastanhada.	$1,2 \times 10^{-6}$	
	6,0 - 6,5	(C1) lodo arenoso cinzento acastanhado com pedras e fragmentos de cerâmica.	$5,5 \times 10^{-6}$	
S8,97	10,0 - 10,5	(C2C) areão argiloso acastanhado com seixos.	$1,7 \times 10^{-6}$	
	14,0 - 14,5	(C2C) areão argiloso acastanhado com cascalheira.	$7,8 \times 10^{-6}$	

NA – Não houve absorção de água.

Quadro 10 – Resultados dos ensaios de permeabilidade do tipo Lugeon.

CAMPANHA	SONDAGEM	PROF. (m)	FORMAÇÃO	REGIME DO ESCOAMENTO	PERMEAB. (m/s)
1997	S1,97	27,8 – 29,6	(C3B) marga amarelada com intercalações de calcário margoso.	Turbulento	$5,4 \times 10^{-6}$
	S2,97	25,5 – 27,2	(C3D) marga cinzenta escura com intercalações de calcário margoso.	Lavagem de diaclases	$6,4 \times 10^{-6}$
	S3,97	25,7 – 27,4	(C3D) marga cinzenta escura com intercalações calcárias margosas.	Turbulento	$4,6 \times 10^{-6}$
	S3A,97	23,5 – 25,5	(C3B) margas amareladas com intercalações calcárias margosas.	Turbulento	$6,1 \times 10^{-6}$
	S4,97	17,7 – 19,7	(C3D) calcário margoso amarelado.	Turbulento	$5,1 \times 10^{-6}$
	S5,97	19,7 – 21,5	(C3D) calcário amarelado com intercalações de calcário margoso.	Laminar	$1,2 \times 10^{-6}$
	S6,97	27,0 – 31,7	(C3B/C3D) margas amareladas e calcários margosos cinzento-amarelados	Turbulento	$2,8 \times 10^{-6}$
		30,5 – 35,0	(C3B/C3D) margas acinzentadas e margas amareladas.	Turbulento	$2,6 \times 10^{-6}$
S8,97	20,0 – 22,0	(C3D) calcário margoso amarelado com intercalações de margas calcárias.	Lavagem de diaclases	$2,0 \times 10^{-6}$	

Quadro 11 – Resultados dos ensaios de laboratório.

SOND.	PROF. (m)	AMOSTRA	DESCRIÇÃO	GRANULOM.		LIMITES		CLAS. UNIFIC:
				> #10	< #200	LL (%)	IP (%)	
S1,97	2,8 – 3,25	0261/97	(C2B) areia média a grosseira amarelada (N _{SPT} =5)	10,3	2,8	NP	NP	SP - areia mal graduada
	4,3 – 4,75	0262/97	(C2A) lodo siltooso, cinzento escuro (N _{SPT} =1)	0,3	79,9	NP	NP	ML silte com areia
	5,8 – 6,25	0263/97	(C2A) lodo cinzento escuro (N _{SPT} =1)	0,3	94,8	33	9	CL argila magra
S2,97	3,5 – 3,95	0264/97	(C1) lodo cinzento acastanhado escuro c/ pedras (N _{SPT} =2)	4,9	83,3	33	13	CL – argila magra c/ areia
	5,5 – 5,95	0265/97	(C1) aterro arenoso c/ pedras e fragmentos de cerâmica (N _{SPT} =2)	34,1	20,5	43	13	SM areia siltosa
	9,5 – 9,95	0266/97	(C2B) areia gros. acastanhada c/ areão e seixo rolado (N _{SPT} =13)	47,5	23,4	26	9	SC - areia argil. c/ cascalho
S3,97	3,6 – 4,05	0267/97	(C2B) areia média a gros. muito lodosa cinzenta acasta. (N _{SPT} =4)	16,6	16,3	23	4	SM areia siltosa
	5,6 – 6,05	0268/97	(C2B) areão lodoso, cinzento escuro (N _{SPT} =2)	73,0	18,8	30	10	SC areia argilosa
	7,6 – 8,05	0269/97	(C2C) areão argiloso, amarelado, c/ seixos (N _{SPT} =29)	63,1	9,5	20	5	GW-GC cascalho bem grad. c/ argila
S4,97	1,6 – 2,05	0292/97	(C2B) areia gros., um pouco argilosa, avermelhada, c/ seixos (N _{SPT} =11)	39,6	27,4	21	8	SC areia argilosa c/ cascalho
	3,6 – 4,05	0293/97	(C2B) areia gros. um pouco argil. alaranjada, c/ seixos (N _{SPT} =19)	54,1	12,0	-	-	-
	7,6 – 8,05	0294/97	(C2C) areia amarelado c/ seixos (N _{SPT} =15)	54,0	11,8	NP	NP	SW-SM areia bem graduada c/ silte
S5,97	1,6 – 2,05	0295/97	(C1) solo argilo-arenoso castanho escuro (N _{SPT} =9)	7,2	77,9	43	17	CL – argila magra c/ areia
	3,6 – 4,05	0296/97	(C2C) areão um pouco argiloso, alaranjado, c/ seixos (N _{SPT} =25)	58,0	12,5	22	5	GC-GM cascalho argiloso-siltoso
	5,6 – 6,05	0297/97	(C2C) areão um pouco argiloso, amarelado, c/ seixos (N _{SPT} =49)	63,2	8,9	NP	NP	GW-GM Cascalho bem graduado c/ silte
S6,97	3,0 – 3,45	0270/97	(C2B) areia gros. argilosa, castanho escura c/ seixos (N _{SPT} =1)	32,3	18,0	-	-	-
	4,5 – 4,95	0271/97	(C2B) argila arenosa, averm. c/ seixos mal rolados (N _{SPT} =12)	60,8	12,0	-	-	-
	6,0 – 6,45	0272/97	(C2B) argila arenosa, avermelhada, c/ seixos (N _{SPT} =48)	57,7	11,2	23	7	GW-GC Cascalho bem grad. c/ argila
S7,97	3,5 – 3,95	0226/97	(C1) aterro argiloso c/ fragmentos de calcário (N _{SPT} =2)	44,9	46,3	-	-	-
	5,3 – 5,75	0227/97	(C1) aterro argilo-arenoso c/ fragmentos cerâmica (N _{SPT} =16)	39,7	51,3	-	-	-
	6,8 – 7,25	0228/97	(C2C) cascalheira argilosa, acastanhada (N _{SPT} =36)	64,2	27,3	-	-	-
S8,97	3,5 – 3,95	0298/97	(C1) lodo arenoso c/ fragmentos de cerâmica (N _{SPT} =3)	6,7	49,0	25	6	SC-SM Areia argilosa/siltosa
	5,0 – 5,45	0299/97	(C1) lodo arenoso cinzento-acastanhado c/ pedras e fragmentos de cerâmica (N _{SPT} =3)	6,3	62,9	28	5	ML Silte arenoso
	6,5 – 6,95	0300/97	(C1) lodo arenoso cinzento-acastanhado c/ pedras e fragmentos de cerâmica (N _{SPT} =8)	36,1	32,4	23	5	SC-SM Areia argilo-siltosa

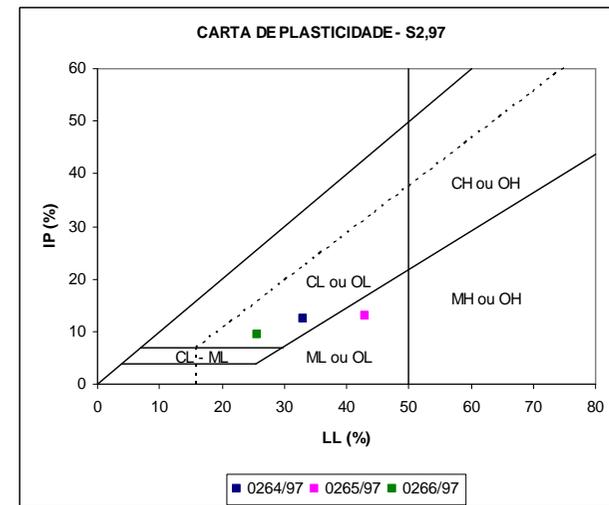
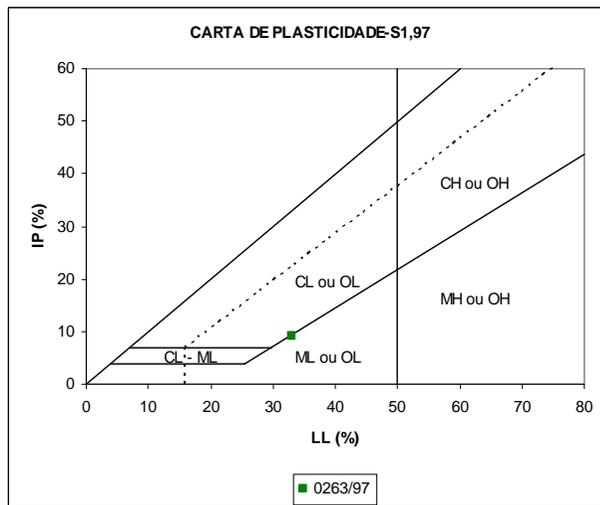
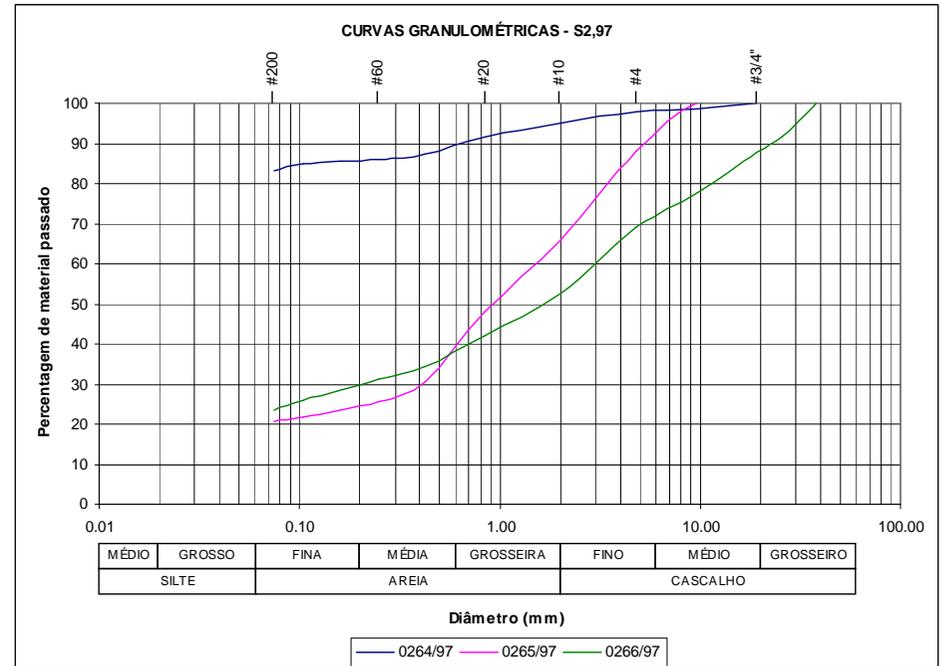
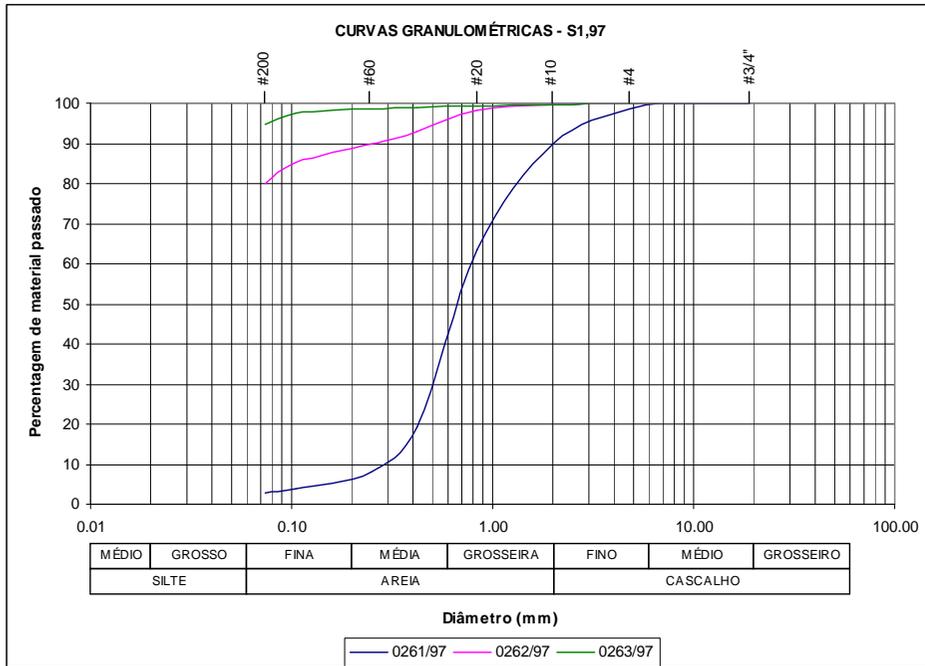


Fig. 1 – Curvas granulométricas e limites de plasticidade das amostras recolhidas nas sondagens S1,97 e S2,97.

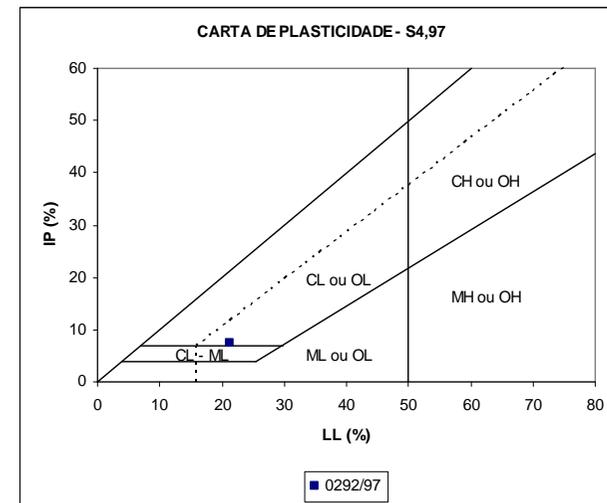
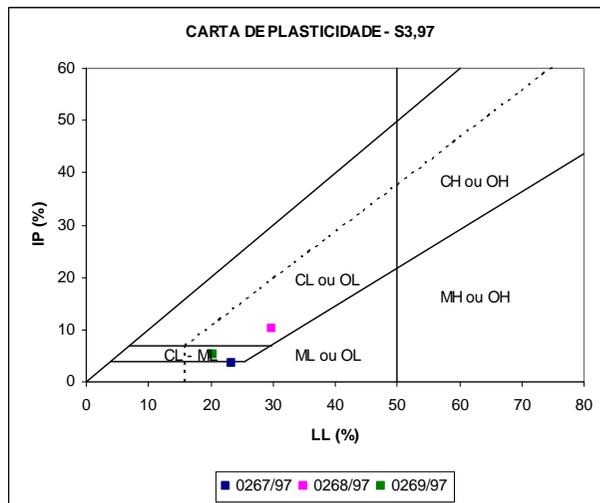
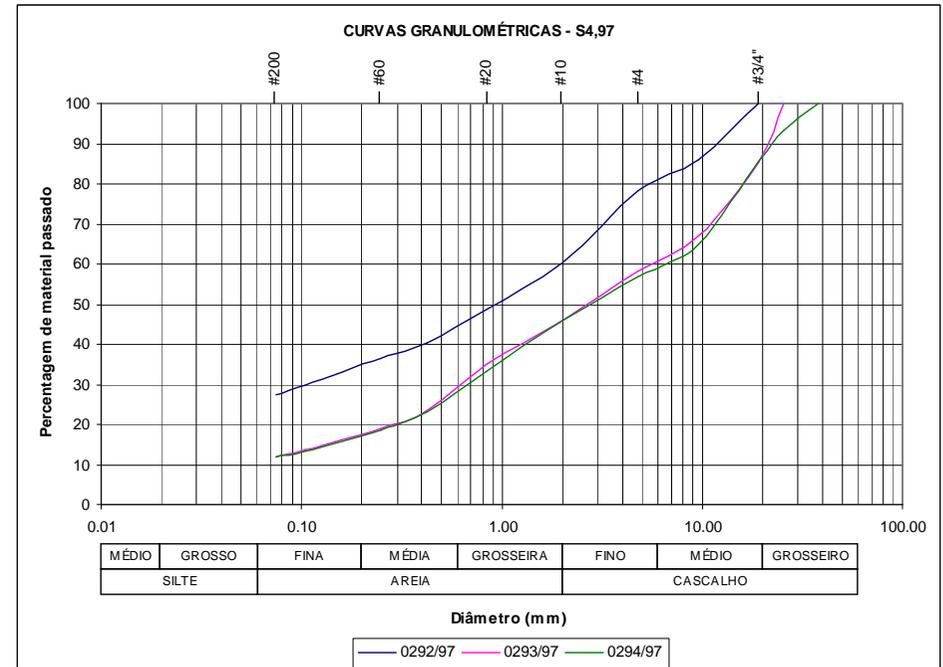
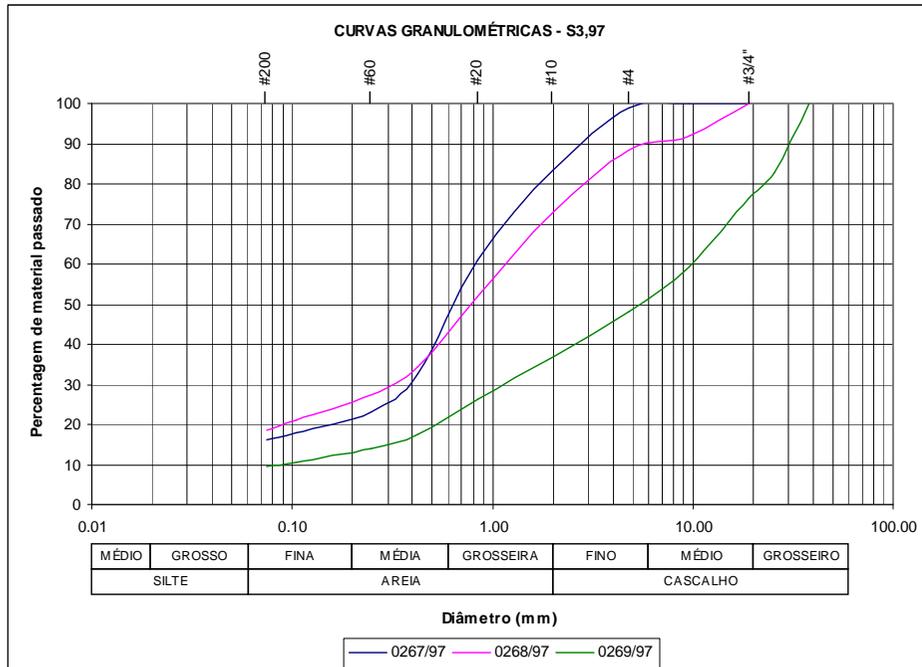


Fig. 2 – Curvas granulométricas e limites de plasticidade das amostras recolhidas nas sondagens S3,97 e S4,97.

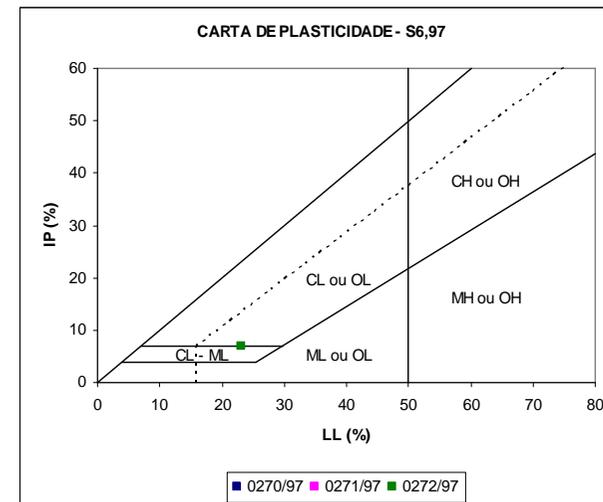
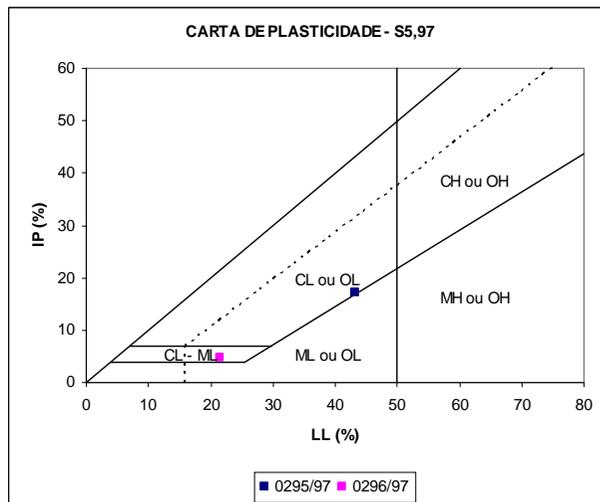
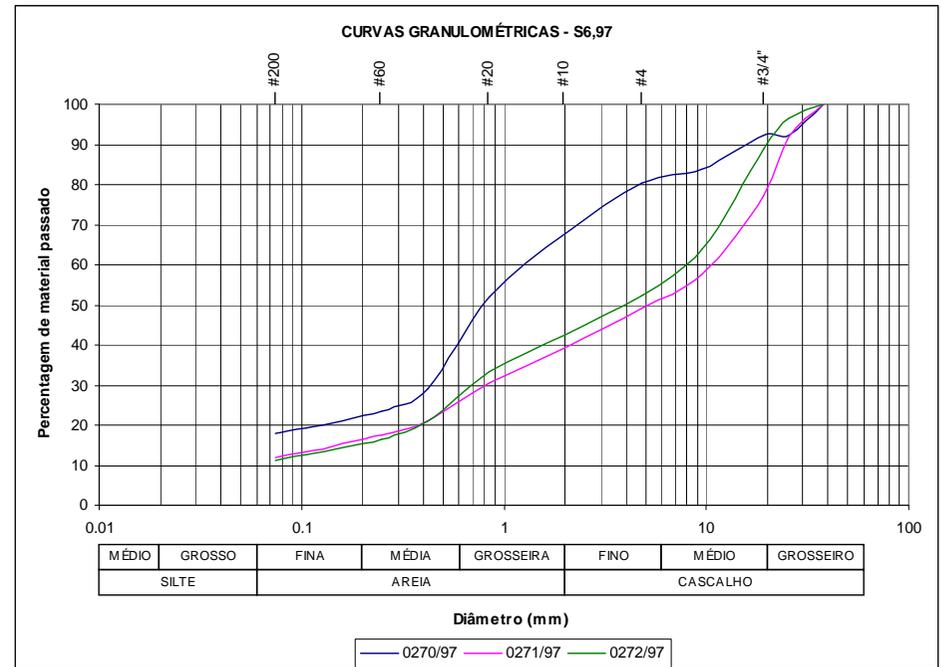
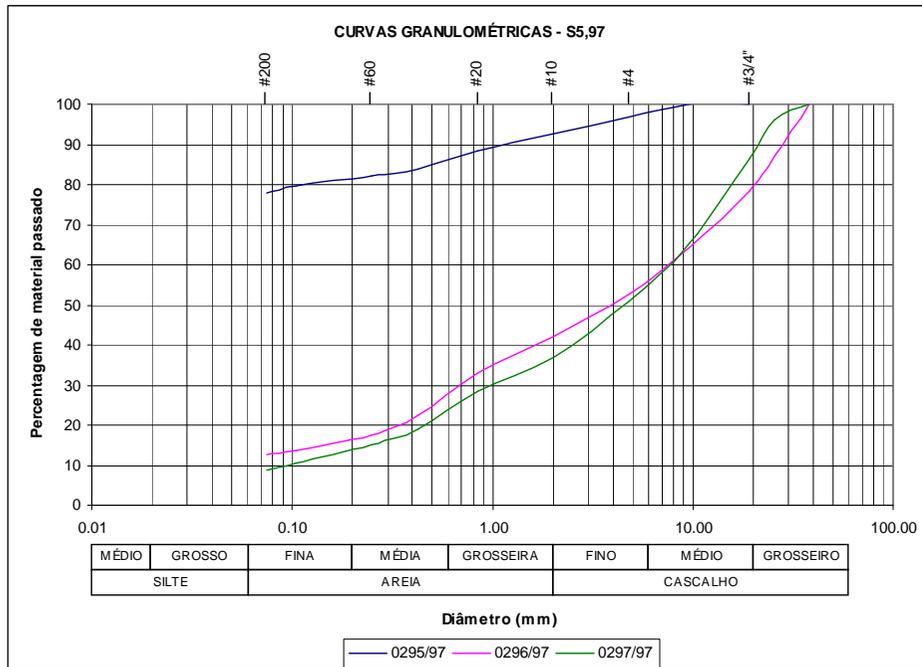


Fig. 3 – Curvas granulométricas e limites de plasticidade das amostras recolhidas nas sondagens S5,97 e S6,97.

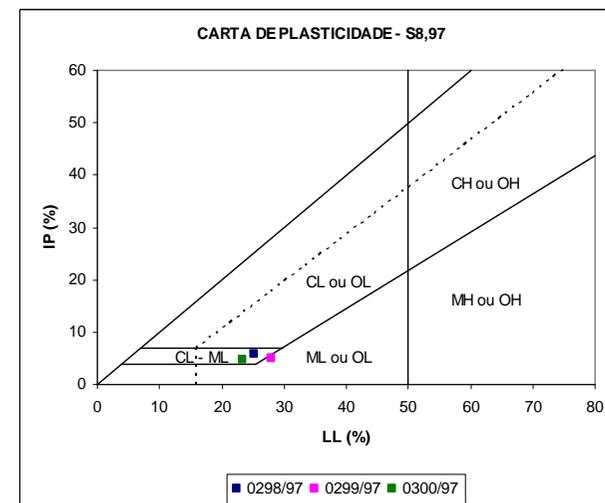
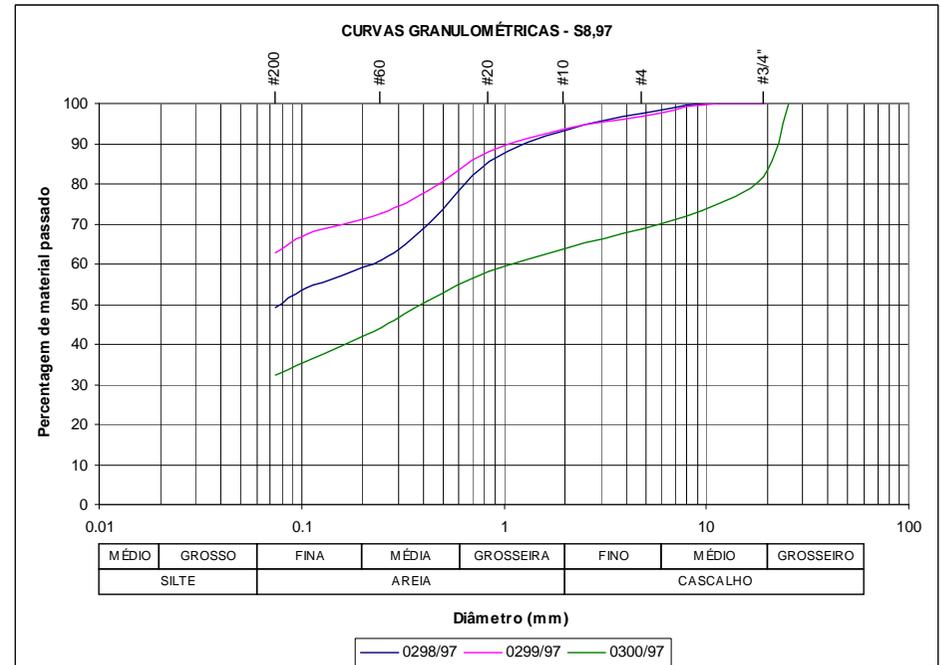
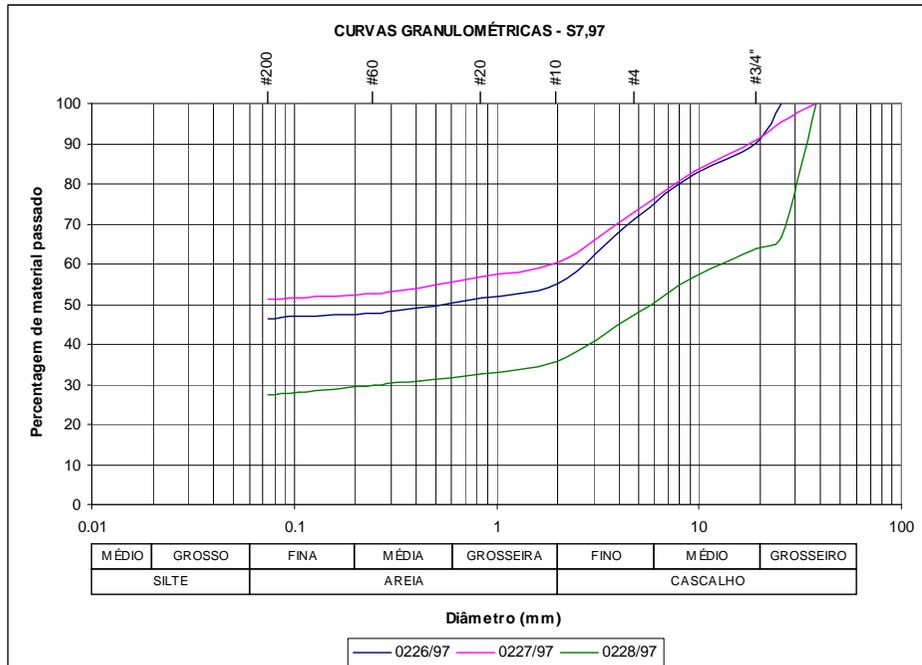


Fig. 4 – Curvas granulométricas e limites de plasticidade das amostras recolhidas nas sondagens S7,97 e S8,97.

Quadro 12 – Variação dos níveis piezométricos.

CAMPANHA	SONDAGEM	PERÍODO MEDIÇÃO	FORMAÇÃO	COTA MÉDIA DO NF (m)
1984/1985	S2,84	17/4 a 7/5	Aluvionar	16,30 a 15,55
	S3,84	17/4 a 7/5	Aluvionar e 2 m na margo-calcária	16,64 a 15,65
	S4,84	17/4 a 7/5	Aterro, aluvionar e 1,4 m na margo-calcária	16,36 a 15,56
	S5,84	17/4 a 7/5	Aluvionar e 1,1 m na margo-calcária	16,15 a 15,51
	S5A,84	17/4 a 7/5	Aluvionar	16,05 a 15,42
	S6,84	3/5 a 7/5	Aterro, aluvionar e 3,5 m na margo-calcária	16,34 a 16,50
	S8,84	23/4 a 7/5	Aluvionar	16,21 a 15,36
	S9,84	17/4 a 7/5	Aluvionar	15,80 a 14,47
1997	S1,97	5/6 a 12/6	Margo-calcária	16,01 a 16,05
	S2,97	5/6 a 12/6	Margo-calcária	14,70
	S3,97	5/6 a 12/6	Margo-calcária	15,11 a 15,14
	S3A,97	11/6 a 12/6	Margo-calcária	14,88 a 14,90
	S3B,97	5/6 a 12/6	Aluvionar	14,99 a 15,00
	S4,97	5/6 a 12/6	Margo-calcária	15,41 a 15,47
	S5,97	5/6 a 12/6	Margo-calcária	15,04 a 15,07
	S6,97	5/6 a 12/6	Margo-calcária	15,41 a 15,44
	S7,97	5/6 a 12/6	Margo-calcária	14,53
S8,97	5/6 a 12/6	Margo-calcária	14,06 a 14,11	

Quadro 13 – Comportamento dos piezómetros instalados na campanha de 1997, após esgotamento da água dos furos.

SONDAGEM	FURAÇÃO NO MACIÇO MARGO-CALCÁRIO (m)	COMPORTAMENTO
S1,97	1,8	Com a utilização de uma bomba com uma capacidade máxima de bombagem de 2,5 m ³ /hora, apenas se conseguiu rebaixar o nível de água no interior do furo em 3 cm.
S2,97	1,75	Após esgotamento do furo, observou-se a recuperação do nível de água de 20 m, em 30 minutos.
S3,97	1,7	Após o esgotamento do furo, observou-se a recuperação do nível de água até ao valor inicial em 25 minutos.
S3A,97	2,0	Após o esgotamento do furo, observou-se a recuperação do nível de água até ao valor inicial em 15 minutos.
S4,97	2,0	Não foi possível esgotar o furo com a bomba de capacidade máxima de 2,5 m ³ /hora.
S5,97	1,8	Após o esgotamento do furo, observou-se a recuperação do nível de água de 13 m, 30 minutos.
S6,97	11,0	Com a utilização de uma bomba com uma capacidade máxima de bombagem de 2,5 m ³ /hora, apenas se conseguiu rebaixar o nível de água no interior do furo em 8 cm.
S7,97	10,1	Não foi possível esgotar o furo com a bomba de capacidade máxima de 2,5 m ³ /hora.
S8,97	2,0	Após o esgotamento do furo, observou-se uma recuperação do nível de água de 8 m, em 30 minutos.

Na campanha de 1997 foi ainda efectuado um ensaio de bombagem, a caudal constante, de 1,8 m³/hora, em regime variável, nas formações margo-calcárias. O rebaixamento do nível de água da sondagem S3,97, de 14,4 m durante 480 minutos, conduziu aos seguintes rebaixamentos nas sondagens adjacentes: de 0,57 m na sondagem S3A,97; de 0,06 m na sondagem S2,97; de 0,03 m na sondagem S5,97; e de 0,02 m na sondagem S3B,97. Após a bombagem, registou-se o período de recuperação do nível de água nas sondagens S3,97 e S3A,97, de 127 min. O tratamento dos resultados, assumindo como válidas as leis fundamentais da hidráulica em meios porosos, conduziu a um valor de permeabilidade de $5,5 \times 10^{-6}$ m/s. Este resultado é encarado com

reservas, uma vez que o maciço em causa se encontra fracturado, logo não respeitando as hipóteses admitidas no cálculo da permeabilidade.

3.3. CONSIDERAÇÕES GEOLÓGICO-GEOTÉCNICAS

Tendo em consideração os resultados dos trabalhos de prospecção geológico-geotécnica atrás descritos, tecem-se, de seguida, algumas considerações geotécnicas relativas às formações em causa. Os cortes geológico-geotécnicos ao longo dos quatro alinhamentos da parede moldada auto-endurecedora são apresentados nos Desenhos 2 a 5.

- Formação actual

C1 - Superficialmente ocorrem depósitos de aterros antigos, arenosos a argilosos, com pedras e fragmentos de cerâmica, castanhos a amarelados, por vezes com intercalação de lodo cinzento, com espessura variável entre 1 a 10 m. Esta formação é caracterizada por resistência variável, tendo-se obtido valores de 2 a 20 pancadas nos ensaios *SPT*, sendo mais frequentemente, inferiores a 10. Em termos de permeabilidade, nos ensaios *Lefranc* obtiveram-se valores variáveis de $1,2 \times 10^{-4}$ m/s a 3×10^{-6} m/s, existindo um caso de absorção nula. Os materiais de aterro são bastante heterogéneos, com percentagens de finos muito variáveis, de 20% a 83%. No que se refere à plasticidade, obtiveram-se valores entre 23% e 43% para o limite de liquidez (w_L) e entre 5 e 17% para o índice de plasticidade (*IP*). A classificação unificada destes materiais denota a sua heterogeneidade, variando de *CL*, *ML*, *SM* a *SC-SM*.

- Formações do Quaternário

C2A - Na zona mais próxima do rio, interessando parte do Alinhamento Norte da parede e a extremidade Norte do Alinhamento Nascente, atingindo uma espessura máxima de 6 m que diminui progressivamente em direcção a Poente, ocorrem lodos siltosos a arenosos cinzentos escuros. Os ensaios *SPT* efectuados nesta formação, conduziram a valores entre 0 e 9, sendo em média de 5 pancadas, revelando a reduzida resistência dos materiais. No que se refere à permeabilidade, o único ensaio *Lefranc* efectuado nesta formação, conduziu a um valor de $2,6 \times 10^{-6}$ m/s. Os solos constituintes da camada são essencialmente do tipo *ML* e *CL*, com percentagens passadas no peneiro n.º 200 (*ASTM*) muito elevadas, entre 80 e 95%, mas com baixa plasticidade – limite de liquidez entre não plástico e 33% e índice de plasticidade entre não plástico e 9%.

C2B - Nesta formação ocorrem areias médias a grosseiras, mais ou menos argilosas, por vezes com seixos, medianamente a muito compactas, terminando em bisel no canto Norte-Poente. Trata-se de uma camada com espessura variável, atingindo um máximo de 9 m no Alinhamento Poente da parede moldada. Os materiais são caracterizados por resistência variável, apresentando predomínio de valores de N_{SPT} inferiores a 20 pancadas, até aos 5 m de profundidade e, inferiormente, valores de N_{SPT} entre 30 e 60 pancadas, sendo que os valores mais elevados se verificam frequentemente no contacto com a camada inferior de cascalheiras. Quanto à permeabilidade deste nível, os resultados dos ensaios *Lefranc* revelaram valores da ordem de 2×10^{-5} m/s a $1,3 \times 10^{-6}$ m/s. Os solos desta camada apresentam uma percentagem de finos (passados no peneiro n.º 200 da série *ASTM*) compreendida entre 11 e 27% e plasticidade baixa, conforme se comprova pelos valores do w_L , de 21% a 30%, e do *IP*, de 4% a 10%. A classificação unificada destes materiais traduz a sua natureza granular, tratando-se, no essencial, de solos do tipo *SM*, *GW-GC* e *SC*.

C2C - Subjacente à camada de areias ocorrem depósitos grosseiros constituídos por areias e cascalheiras, mais ou menos argilosas, geralmente muito compactas, em camada extensa e contínua, interessando a zona inferior da parede moldada. Esta camada apresenta uma espessura

que atinge os 14 m, nos Alinhamentos Poente e Nascente, sendo da ordem de 6 a 10 m nos restantes dois alinhamentos. Trata-se de uma formação muito resistente, com predomínio de valores de N_{SPT} de 60 pancadas e quase sempre superior a 30 (salvo raras excepções). No que se refere à permeabilidade, os ensaios *Lefranc* conduziram a um intervalo de valores bastante alargado, desde $1,9 \times 10^{-4}$ m/s a $1,2 \times 10^{-6}$ m/s. Os solos desta formação apresentam percentagens passadas no peneiro n.º 200 (ASTM) variáveis entre 9% e 12% para limites de liquidez entre não plástico e 22% e *IP* entre não plástico e 5%, tendo sido classificados como SW-SM, GW-GC, GW-GM e GC-GM.

- Formações do Jurássico

C3A - Nesta camada, de desenvolvimento descontínuo, com espessura média de 2 m, localizada na transição para o maciço margo-calcário, ocorrem argilas amarelas a cinzentas escuras, folhetadas, ligeiramente margosas, por vezes moles a muito moles, como atestam alguns valores de N_{SPT} obtidos, da ordem de 8 a 12 pancadas. Esta camada não foi abrangida por ensaios de permeabilidade, nem foi caracterizada do ponto de vista da granulometria e da plasticidade.

C3B - Ao longo da fundação da parede ocorrem margas amareladas a acastanhadas com intercalações de calcários margosos pulverulentos, por vezes dolomíticas, apresentando-se como um nível contínuo, com espessura variável entre 2 e 10 m. Apresenta uma intercalação de argilas moles na parte Norte do Alinhamento Nascente da parede, assumindo nesta zona e ao longo do Alinhamento Sul, a sua menor espessura. Em termos de resistência, foram registados valores de N_{SPT} elevados, da ordem de 40 a 60 pancadas. No que se refere à permeabilidade, a partir dos resultados dos ensaios *Lugeon* obtêm-se valores de coeficiente de permeabilidade da ordem de $6,1 \times 10^{-6}$ m/s a $2,6 \times 10^{-6}$ m/s, traduzindo a significativa densidade da sua fracturação, que permite a comunicação hidráulica franca entre as aluviões e o maciço calcário do Jurássico.

C3C - No seio das margas do complexo C3B, ocorre, por vezes, uma camada individualizada de argilas moles, cinzenta escura, com superfícies espelhadas. Este nível apresenta espessura média de 3 m e muito baixa resistência, cerca de 0 a 5 pancadas para N_{SPT} . A reduzida expressão desta camada justifica a inexistência de resultados de ensaios de permeabilidade e de ensaios de laboratório sobre amostras representativas da mesma.

C3D - A maior profundidade, ocorrem calcários margosos, cinzentos a amarelados, por vezes pulverulentos a detriticos, muito fracturados e carsificados, tendo mesmo sido intersectada uma caverna, com 1 m de altura, na sondagem S3,97. Os valores de *RQD* registados nas sondagens são, geralmente, muito baixos, inferiores a 20%, enquanto que os ensaios *Lugeon* apontam para valores da ordem dos 50 a 70 *Lugeon*, com dois casos de absorções mais baixas, de 21 e 13 *Lugeon*. Os valores obtidos nestes ensaios correspondem a coeficientes de permeabilidade entre $6,4 \times 10^{-6}$ m/s a $1,2 \times 10^{-6}$ m/s.

A significativa permeabilidade do maciço margo-calcário foi ainda confirmada através da análise do comportamento dos piezómetros após esgotamento dos furos. Efectivamente, e conforme se constata pela análise do Quadro 13, sempre que foi possível esgotar a água, o nível no interior do furo recuperou para valores próximos dos iniciais. Nos casos em que não foi possível realizar o esgotamento dos furos, concluiu-se que o maciço deveria apresentar fracturas abertas, ou que teriam sido interceptadas diversas fracturas produtivas.

No que diz respeito à posição dos níveis freáticos na zona, os dados disponíveis (leituras de piézómetros instalados nas diversas sondagens, ensaios de bombagem e ensaios de variação do nível da albufeira do Açude-Ponte de Coimbra) permitiram concluir que existiria coincidência aparente entre a posição dos níveis de água das aluviões e do maciço margo-calcário, confirmando a comunicação hidráulica entre as duas formações, situando-se estes níveis entre as cotas 14,0 m e 16,0 m.

Tendo em consideração que o nível mínimo de exploração (Nme) da albufeira do Açude-Ponte de Coimbra é 17,3 m e que nos piezómetros foram registados valores inferiores a este nível, em cerca de 2 a 3 m, conclui-se que a influência da bombagem se estende até uma distância muito significativa dos poços.

É de referir que as diferenças de cotas detectadas nos diversos piezómetros instalados na campanha de 1997 foram atribuídas à maior ou menor influência, em cada furo, das bombagens permanentes no local.

4. CONSTRUÇÃO

4.1. ENSAIOS EFECTUADOS PARA DEFINIÇÃO DA COMPOSIÇÃO DA CALDA. DESCRIÇÃO E RESULTADOS

A definição da composição da calda baseou-se num extenso programa de ensaios de laboratório efectuados sobre amostras com diversas composições e em condições de ensaio distintas, conforme se depreende da leitura do Quadro 14.

As amostras foram preparadas no “*Laboratório de Betões*” da empresa *TEIXEIRA DUARTE, S.A.* com diferentes tipos de cimento, fazendo variar as quantidades dos constituintes. Duas das amostras foram contaminadas com solo (que não proveio do local da obra) e em outras duas amostras, optou-se por deixar repousar a suspensão bentonítica durante uma hora previamente à adição de cimento. Foram também ensaiadas amostras com incorporação de um tipo específico de aditivo. Para além dos parâmetros referidos no Quadro 14, foi ainda objecto de estudo a influência do tipo de molde, a influência do ambiente de cura e a influência das dimensões da amostra sobre as respectivas características mecânicas e hidráulicas. No que se refere a este último aspecto, é de referir que o diâmetro das amostras variou entre 66 e 76 mm e a altura entre 119 e 148 mm, traduzindo-se por uma relação altura / diâmetro de 1,3 a 2,4.

De acordo com as informações fornecidas por técnicos da *TEIXEIRA DUARTE S.A.*, a calda foi preparada num ambiente não controlado. Na mistura dos diversos constituintes foi utilizado um instrumento mecânico, fabricado no próprio laboratório, cuja velocidade de rotação se desconhece. Também se desconhece o tempo que foi gasto na mistura dos materiais. Aparentemente, a suspensão bentonítica não terá sido mantida em repouso após o fabrico, a menos das situações identificadas no Quadro 14.

Sobre as amostras identificadas no Quadro 14 foram efectuados os seguintes ensaios:

- i) de determinação da massa volúmica através da balança de lamas;
- ii) de determinação da viscosidade através do cone Marsh;
- iii) de determinação do pH;
- iv) de determinação da perda de água por filtração;
- v) de determinação da espessura do “cake”;
- vi) de determinação da percentagem de exsudação;
- vii) de compressão simples;
- viii) de corte em compressão triaxial (CU);
- ix) de determinação do coeficiente de permeabilidade.

4.1.1. Descrição e análise dos ensaios de caracterização das caldas

No Quadro 15 apresentam-se os resultados dos ensaios de laboratório de caracterização a que foi sujeita a suspensão bentonítica e no Quadro 16 os resultados dos ensaios de caracterização da calda “auto-endurecedora”. Em ambos os casos, os ensaios foram realizados no “*Laboratório de Betões*” da *TEIXEIRA DUARTE, S.A.*

Quadro 14 – Características das amostras ensaiadas para definição da composição da calda.

DESIGNAÇÃO DA AMOSTRA	DATA DE FABRICO	COMPOSIÇÃO DA CALDA							OUTROS PARÂMETROS	
		ÁGUA (m³)	CIMENTO		BENTONITE		ADITIVO		REPOUSO CALDA (*)	CONTAMIN. C/ SOLO (kg)
			TIPO	QUANT. (kg)	TIPO	QUANT. (kg)	TIPO	QUANT. (kg)		
C1-0	2001-10-16	1	CEM II-32.5N	150	CLARSOL FTP2S	30	-	-	-	-
C1-1	2001-10-16			150		40	-	-	-	-
C1-2	2001-10-16			168		56	-	-	-	-
C2-1	2001-10-16			180		40	-	-	-	-
C2-2	2001-10-16			180		50	-	-	-	-
C3-1	2001-10-16			200		40	-	-	-	-
C3-2	2001-10-16			200		50	-	-	-	-
C4-1	2001-10-16			200		40	-	-	-	10
C4-2	2001-10-16			200		50	-	-	-	10
C1	2001-10-30			168		37	-	-	-	-
C2	2001-10-30			185		37	-	-	-	-
C3	2001-10-31			114		38	-	-	-	-
C4	2001-11-07	142	38	-	-	-	-			
C5	2001-11-07	142	38	-	-	1 hora	-			
C6	2001-11-07	142	38	AQUABETON	0,69	-	-			
C7	2001-11-13	142	38	-	-	-	-			
C8	2001-11-13	142	38	-	-	1 hora	-			
C9	2001-11-13	142	38	AQUABETON	0,47	-	-			
C10	2001-11-14	168	37	-	-	-	-			
C11	2001-12-21	200	31	-	-	-	-			
C12	2002-01-03	200	25	-	-	-	-			

(*) Repouso da suspensão bentonítica após o fabrico.

Quadro 15 – Definição da composição da calda. Resultados dos ensaios efectuados sobre amostras da calda bentonítica.

AMOSTRA	MASSA VOLÚMICA (kg/m ³)	VISCOSIDADE MARSH (s)		pH	PERDA POR FILTRAÇÃO (ml)	CAKE (mm)
		t = 0	t = 24 h			
C1-0	1020	30	-	9,5	22	0,60
C1-1	1020	32	-	9,5	24	1,01
C1-2	1020	35	-	10,0	11	1,10
C2-1	1020	32	-	9,5	24	1,01
C2-2	1020	33	-	10,0	11	1,10
C3-1	1020	32	-	9,5	24	1,01
C3-2	1020	33	-	10,0	11	1,10
C4-1	1020	32	-	9,5	24	1,01
C4-2	1020	33	-	10,0	11	1,10
C1	1032	32	33	-	-	-
C2	1032	32	33	-	-	-
C3	-	32	-	-	-	-
C4	-	32	33	-	-	-
C5	-	32	33	-	-	-
C6	-	32	33	-	-	-
C7	1030	34	38	-	-	-
C8	1030	34	38	-	-	-
C9	1030	34	38	-	-	-
C10	-	37	37	-	-	-
C11 (*)	-	32	33	-	-	-
C12 (*)	-	30	32	-	-	-

(*) Temperatura da calda entre 11,3°C e 13,7°C.

Quadro 16 – Definição da composição da calda. Massa volúmica, viscosidade, pH e exsudação da calda de bentonite-cimento.

AMOSTRA	MASSA VOLÚMICA (kg/m ³)	VISCOSIDADE MARSH (s)		pH	EXSUDAÇÃO ÀS 24 H (%)	
		t = 0	t = 60 min		colheita em t = 0	colheita em t = 60 min
C1-0	1120	32	-	14	-	-
C1-1	1120	37	-	13	-	-
C1-2	1350	44	-	14	-	-
C2-1	1130	31	-	14	-	-
C2-2	1130	34	-	14	-	-
C3-1	1130	32	-	14	-	-
C3-2	1115	35	-	14	-	-
C4-1	1130	32	-	14	-	-
C4-2	1115	35	-	14	-	-
C1	-	49	-	-	-	-
C2	1122	44	-	-	-	-
C3	-	44	-	-	-	-
C4	-	46	46	-	6	7
C5	-	46	46	-	6	7
C6	-	77	67	-	4	0
C7	1100	50	48	-	9	7
C8	1100	50	48	-	9	7
C9 (*)	1110	52	-	-	9	7
C10 (*)	-	45	-	-	10	2
C11	-	38	-	-	23(C) / 37(A)	-
C12	-	34	-	-	33(C) / 25(A)	-

C – conservação da amostra na câmara; A – conservação da amostra ao ar. (*) Os ensaios da calda auto-endurecedora das amostras C9 e C10 foram efectuados a uma temperatura ambiente de 10°C.

Da análise dos resultados apresentados no Quadro 15, conclui-se o seguinte:

- A massa volúmica das amostras de calda bentonítica praticamente não varia com a variação da quantidade de bentonite. O instrumento utilizado na determinação deste parâmetro – balança de lamas² – não tem precisão suficiente para identificar pequenas variações do mesmo. Aliás, é interessante notar que o valor só se altera quando há alteração da data de fabrico das amostras. De facto, todas as amostras confeccionadas a 16 de Outubro de 2001 têm uma massa volúmica de 1020 kg/m³, enquanto que as amostras fabricadas a 30 de Outubro são caracterizadas por uma massa volúmica de 1032 kg/m³ e as amostras de 13 de Novembro apresentam um valor de 1030 kg/m³.

Numa parede moldada tradicional é necessário garantir que a calda bentonítica tenha um peso volúmico mínimo para assegurar a estabilidade da vala, mas suficientemente baixo para que o constituinte definitivo da parede (por exemplo, betão) a consiga substituir na sua totalidade. No caso de paredes moldadas auto-endurecedoras, a adição de cimento à calda bentonítica tem como efeito um aumento do peso volúmico que é, em princípio, suficiente para garantir a estabilidade da vala. Uma vez que não ocorrerá substituição da calda, não é necessário limitar o máximo valor do seu peso volúmico. Neste contexto, a determinação deste parâmetro terá como único objectivo controlar a qualidade da calda, permitindo identificar erros grosseiros da composição ou eventuais alterações das características da bentonite.

- Nas amostras C1-0 a C4-2, foi feita a medição do pH, tendo-se registado valores da ordem de 9,5 a 10, valores usuais para caldas bentoníticas. As fitas de papel para medição do pH têm uma precisão de 0,5 a 1,0. Daqui resulta que a variação de 0,5 no valor do pH não significa, obrigatoriamente, uma alteração das características da bentonite.
- Conforme expectável, constata-se que, de uma forma geral, a viscosidade aumenta com o aumento da quantidade de bentonite, registando-se valores variáveis entre 30 e 35 s, para 30 a 56 kg de bentonite por metro cúbico de água, nas amostras C1-0 a C4-2.

Nas amostras C1 a C10, todas com a mesma quantidade de bentonite (37 a 38 kg/m³), registam-se diferentes comportamentos em termos de viscosidade. Assim, as amostras C1 a C6 são caracterizadas por uma viscosidade de 32 s, que regista um muito ligeiro aumento para 33 s após 24 horas de hidratação. Já nas amostras C7 a C9, a viscosidade Marsh é superior, e da ordem de 34 s para t=0, aumentando para 38 s após 24 horas, revelando que o tempo dispendido na hidratação da bentonite deverá ser aumentado. Considera-se que a bentonite está hidratada quando não há alteração da viscosidade com o tempo (segundo a *Portland Cement Association*). Já a amostra C10 apresenta, para t=0, uma viscosidade Marsh de 37 s que se mantém após 24 horas.

É de realçar a diferença de valores de viscosidade entre as amostras fabricadas a 16 de Outubro (C1-0 a C4-2) e as amostras fabricadas a 13 de Novembro (C7 a C9), que fazem suspeitar de alterações no lote de bentonite ou nas condições de fabricação das amostras, designadamente, na temperatura ambiente.

Os resultados dos ensaios de determinação da viscosidade das amostras C11 e C12 são da mesma ordem de grandeza dos obtidos para as amostras C1-0 a C4-2, apesar da menor quantidade de bentonite dos primeiros (25 e 31 kg/m³). Tal facto poderá estar relacionado com a menor temperatura a que terão sido ensaiadas as amostras C11 e C12, variando entre 11,3°C e 13,7°C. As restantes amostras foram ensaiadas em Outubro, pelo que se admite como provável uma temperatura ambiente superior.

Ainda no que se refere à viscosidade, é de assinalar que se desconhecem as características do cone utilizado na sua determinação, facto que impede a comparação dos valores obtidos com aqueles que são relatados na bibliografia da especialidade.

² De acordo com Jefferis as balanças de lama não são adequadas para determinar/aferir o conteúdo das caldas de cimento-bentonite, mas podem ser úteis na identificação de situações indesejáveis de contaminação excessiva da calda.

- Relativamente à perda por filtração e à espessura do “cake”, é de realçar que se tratam de aspectos pouco relevantes para a definição da composição da calda, já que a adição de cimento irá alterar o comportamento da calda bentonítica, logo a sua capacidade de filtração e de formação do “cake”. Não obstante, conclui-se que as amostras apresentam um comportamento normal, associando-se a maior perda por filtração às amostras com menor quantidade de bentonite e portanto menor viscosidade (sendo excepção a amostra C1-0) e a maior espessura do “cake” às amostras com maior quantidade de bentonite.

A adição de cimento à suspensão bentonítica altera o seu comportamento, conforme se pode constatar através da comparação dos resultados apresentados no Quadro 15 e no Quadro 16. Estas alterações reflectem-se na massa volúmica e na viscosidade, ambos os parâmetros sofrendo aumentos relativamente à “calda-mãe”, e ainda no pH que também sofre um aumento, tal como seria expectável face à presença de carbonato de cálcio.

Sobre os resultados dos ensaios da calda auto-endurecedora tecem-se de seguida alguns comentários:

- Analisando os valores de massa volúmica das diferentes amostras, conclui-se que não existe uma relação evidente entre aqueles e a quantidade de cimento adicionada à “calda-mãe”. De facto, para a mesma quantidade de cimento e de bentonite, obtêm-se valores distintos de massa volúmica, situação que se poderá atribuir à reduzida precisão do aparelho utilizado na sua medição – balança de lamas. A influência da incorporação de material da escavação da vala sobre a massa volúmica da calda, simulada através das amostras C4-1 e C4-2, não revela qualquer alteração do seu valor. Também neste caso se admite que a precisão do instrumento não é suficiente para detectar esta alteração. Acresce que a quantidade de solo incorporada na calda foi reduzida (apenas 5% do peso da calda (?)).

Admite-se que deve existir um lapso no valor de massa volúmica atribuído à amostra C1-2 (1350 kg/m³, muito superior aos restantes).

- A medição do pH das amostras C1-0 a C4-2, revelou a sua maior alcalinidade face à calda bentonítica. Obtiveram-se valores de 14 e um valor de 13, um pouco acima da média relatada na bibliografia da especialidade, de 12 a 13. É de assinalar que a determinação do pH só é relevante no caso de utilização de aditivos, ou sempre que existam no meio envolvente sais solúveis que possam interferir sobre o comportamento da calda.
- As caldas auto-endurecedoras são sujeitas a fenómenos de gelificação, pelo que a precisão dos resultados dos ensaios de determinação da viscosidade dependem da rapidez com que são feitos e da consistência dos procedimentos com eles relacionados.

No primeiro grupo de ensaios, efectuados sobre as amostras C1-0 a C4-2, obtiveram-se valores de viscosidade Marsh de 31 a 37 s e um valor de 44 s associado à amostra com maior quantidade de bentonite, (56 kg/m³). Na generalidade, constata-se que, para amostras com a mesma quantidade de cimento, quanto maior é a quantidade de bentonite, maior é a viscosidade, tal como seria expectável.

Já para as amostras C1 a C3, com quantidades de bentonite dentro do intervalo de valores das amostras anteriores, obtiveram-se valores de viscosidade superiores, de 44 a 49 s. A explicação para este comportamento poderá residir no diferente tipo de cimento (CEM I – 32.5R) utilizado na fabricação destas amostras, que é caracterizado por um desenvolvimento muito rápido da resistência mecânica até aos 2 dias de cura.

Também nas amostras C7 a C9, admite-se que o cimento utilizado (CEM I – 42.5R), caracterizado por uma presa mais rápida e por maior resistência, poderá ter influenciado os resultados da viscosidade, que se situaram entre 48 e 52 s, valores superiores aos restantes. A amostra C9 terá sido ensaiada com uma temperatura ambiente reduzida, justificando-se assim o maior valor da viscosidade.

Os valores mais elevados de viscosidade estão associados às amostras com incorporação do aditivo *AQUABETON*. Trata-se de um composto que tem como função reduzir a segregação e lavagem das betonagens submersas, admitindo-se que estes objectivos sejam alcançados através de um crescimento rápido da viscosidade. A influência deste aditivo é perfeitamente evidente, constatando-se que quanto maior é a quantidade adicionada, maior é a viscosidade (amostras C6 e C9).

Os valores da viscosidade das amostras C1 e C10, com a mesma composição, são diferentes, sendo menor o da amostra C10 (45 s). Infelizmente, desconhece-se a temperatura a que terá sido realizado o ensaio da amostra C1, para a qual se obteve um valor de 49 s. Porém, e admitindo que terá sido superior à registada durante o ensaio da amostra C10, de 10°C, os valores obtidos não respeitam a teoria de aumento da viscosidade com a redução da temperatura do meio ambiente.

De acordo com Boyes, (1975), o efeito da temperatura sobre caldas constituídas por bentonites cálcicas activadas por troca de iões (como é o caso da bentonite utilizada na obra), é contrário ao que é prática habitual. Este autor constatou que ocorria uma redução da viscosidade com a redução da temperatura, facto que atribuiu ao atraso no processo de hidratação da bentonite para baixas temperaturas. Já no que se refere às caldas constituídas por bentonites sódicas naturais, a redução da temperatura não afecta a viscosidade no mesmo grau. Segundo o autor, tal facto deve-se à maior rapidez de hidratação deste tipo de bentonites. Na realidade, uma bentonite totalmente hidratada não exhibirá este comportamento e o seu arrefecimento traduzir-se-á num pequeno aumento da viscosidade.

É de assinalar que o valor da viscosidade da amostra C1 (49 s) difere dos valores obtidos para as amostras C2 e C3 (44 s para ambas) que, supostamente, terão sido preparadas com a mesma quantidade de bentonite e nas mesmas condições, mas com quantidades de cimento respectivamente maior e menor.

É ainda interessante constatar que, na amostra C6, ocorre uma redução da viscosidade com o tempo. Admite-se que esta redução de viscosidade possa estar associada ao fenómeno designado por “break-over” ou pico de gelificação que se traduz por um aumento significativo da viscosidade das caldas bentoníticas quando em contacto com carbonato de cálcio (presente no cimento) a que se segue um retorno à normalidade (isto é, de redução da viscosidade para valores praticamente constantes) com o aumento da quantidade de cal. É a lentidão da dissolução do cimento que obriga a misturar as caldas de bentonite e cimento pelo menos durante 3 minutos, de maneira a que haja tempo suficiente para que ocorra a passagem do pico de gelificação antes da utilização da calda. Com alguns cimentos de hidratação lenta, esta passagem do pico pode ocorrer diversas horas após a mistura. Para além do fenómeno de gelificação, também a incorporação de um aditivo na amostra C6 poderá ter contribuído para a redução da viscosidade com o tempo.

Finalmente, é de referir que a viscosidade de algumas amostras ensaiadas ultrapassa o intervalo de valores definido no projecto, de 30 a 40 s. Porém, na bibliografia da especialidade, são frequentemente referidos valores de 40 e 50 s, ou seja, da mesma ordem de grandeza dos obtidos (artigo da *Portland Cement Association*, de data desconhecida). Contudo, é de assinalar uma vez mais, que se desconhecem as características do cone utilizado na realização deste ensaio.

- Relativamente aos ensaios de determinação da exsudação, da análise dos resultados conclui-se que a redução da relação bentonite-cimento se traduz pelo aumento da exsudação, tal como seria expectável. Efectivamente, para as amostras C4 a C10, com uma relação bentonite-cimento de 1:3,7, os valores de exsudação, após 24 horas, variaram entre 4 e 10%. Já para as amostras C11 e C12, obtiveram-se valores de 23 a 37%, sendo a relação bentonite-cimento de 1:6,25 a 1:8. É de referir que a ocorrência de exsudação excessiva sugere instabilidade da calda.

Os diferentes valores de exsudação obtidos nos ensaios das amostras C4 a C10, todas com a mesma quantidade de cimento e bentonite, parecem estar relacionados com o tipo de cimento utilizado. A utilização de cimento do tipo CEM I – 42.5R conduz a um aumento da exsudação que não é minimizado com a incorporação de 0,47 kg de aditivo AQUABETON. Pelo contrário, a incorporação deste aditivo na amostra C6, numa quantidade superior, de 0,69 kg, revela-se eficaz na redução da exsudação da calda fabricada com cimento CEM II – 32.5N.

Os resultados dos ensaios efectuados sobre as amostras C11 e C12, não permitiram estabelecer uma relação entre a exsudação e o tipo de cura da amostra. Efectivamente, enquanto que numa amostra a exsudação aumentou quando a cura foi efectuada na câmara, na outra amostra ocorre o inverso.

Analisando os resultados da exsudação em termos da viscosidade das amostras, parâmetro responsável pela maior ou menor sedimentação da calda, constata-se que, de facto, quanto maior é a viscosidade menor é a exsudação – a amostra C6 é a que tem maior viscosidade (77 s) e a menor exsudação (4%) –, acontecendo o contrário com a redução da viscosidade – as amostras C11 e C12 com a menor viscosidade (34 a 38 s) apresentam a maior exsudação, 23 a 37%.

É de sublinhar que o significado de colheita para t=60 minutos não é conhecido. Porém, admitindo que a calda terá repousado durante 1 hora previamente ao início do ensaio, seria normal observar-se uma redução da exsudação às 24 horas, já que este processo é interrompido pela cura da calda.

4.1.2. Descrição e análise dos ensaios de compressão simples

Os resultados dos ensaios de compressão simples, realizados pela empresa GEOTEST, seguindo a norma para o ensaio CBR, com uma velocidade de corte de 1 mm/min, apresentam-se no Quadro 17.

Quadro 17 – Definição da composição da calda. Resistência à compressão simples.

AMOSTRA	TIPO DE CURA	TIPO DE MOLDE	DESIG. PROVETE	TEMPO DE CURA (dias)	H/D	MASSA VOLÚMICA (kg/m ³)	TENSÃO DE ROTURA (kPa)
C1-0	ao ar	PVC	1	18	1,7	1140	20
			2	18	1,8	1150	30
			3	28	2,2	1150	48
C1-1	ao ar	PVC	1	18	2,1	1110	8
			2	18	2,1	1110	7
			3	28	2,2	1110	22
			4	28	1,9	1090	19
C1-2	ao ar	PVC	1	18	2,1	1150	15
			2	18	2,0	1100	17
			3	28	2,2	1140	34
C2-1	ao ar	PVC	1	18	1,3	1250	108
			2	18	1,4	1180	58
			3	28	2,1	1230	152
C2-2	ao ar	PVC	1	18	1,6	1170	24
			2	18	1,7	1170	33
			3	28	2,2	1190	47
C3-1	ao ar	PVC	1	18	2,2	1240	106
			2	28	2,3	1240	220
C3-2	ao ar	PVC	1	18	1,5	1200	24
			2	18	1,9	1180	28
			3	28	2,4	1210	118
C4-2	ao ar	PVC	1	18	1,4	1180	35
			2	18	1,6	1190	35

H/D – Relação entre a altura (H) e o diâmetro (D) do provete.

Quadro 17 – Definição da composição da calda. Resistência à compressão simples. (cont.)

AMOSTRA	TIPO DE CURA	TIPO DE MOLDE	DESIG. PROVETE	TEMPO DE CURA (dias)	H/D	MASSA VOLÚMICA (kg/m ³)	TENSÃO DE ROTURA (kPa)			
C1	ao ar	PVC	C1-3	9	2,0	1200	44			
				9	2,1	1260	33			
			C1-4	9	2,2	1170	46			
				9	2,0	1250	51			
			C1-5	9	2,0	1300	54			
				9	2,0	1220	38			
			C1-6	14	2,0	1140	67			
			C1-7	14	1,9	1200	61			
			C1-8	15	1,8	1180	42			
			C1-9	28	2,0	1090	134			
				28	2,1	1060	150			
C2	ao ar	PVC	C2-3	9	2,0	1230	70			
				9	2,0	1190	76			
			C2-4	9	2,0	1290	72			
				9	2,0	1210	60			
			C2-5	9	2,0	1200	63			
				9	2,0	1230	66			
			C2-6	14	2,1	1160	53			
			C2-7	14	1,9	1190	74			
				14	2,0	1150	54			
			C2-8	14	1,8	1170	51			
				14	1,9	1180	82			
C3	ao ar	PVC	C3-2	14	2,0	1130	15			
				14	2,0	1160	14			
			C3-3	28	2,0	1120	45			
				28	2,1	1120	45			
			C4	ao ar	PVC	C4-1	12	2,1	1160	10
							12	1,9	1120	12
						C4-2	14	2,0	1230	11
							14	2,1	1150	10
					C4-3	28	2,1	1130	36	
				28	2,0	1170	35			
			Shelby	C4-Shelby	28	1,8	1150	11		
C5	ao ar	PVC	C5-1	12	1,9	1110	14			
				14	2,2	1140	7			
			C5-2	14	2,0	1150	10			
				28	2,0	1210	22			
		Shelby	C5-Shelby	28	1,8	1130	11			

H/D – Relação entre a altura (H) e o diâmetro (D) do provete.

Quadro 17 – Definição da composição da calda. Resistência à compressão simples. (cont.)

AMOSTRA	TIPO DE CURA	TIPO DE MOLDE	DESIG. PROVETE	TEMPO DE CURA (dias)	H/D	MASSA VOLÚMICA (kg/m ³)	TENSÃO DE ROTURA (kPa)	
C6	ao ar	PVC	C6-1	12	2,1	1140	21	
				12	2,2	1140	19	
			C6-2	14	2,0	1160	23	
				14	2,1	1120	24	
			C6-3	28	2,1	1120	38	
				28	2,0	1140	36	
	Shelby	C6-Shelby	28	1,8	1140	9		
C7	ao ar	PVC	C7-1	14	2,0	1150	21	
			C7-2	28	2,0	1140	42	
				28	2,0	1130	35	
			Shelby	C7-Shelby	28	1,6	1140	18
C8	ao ar	PVC	C8-1	28	2,0	1150	46	
				28	2,1	1160	40	
			Shelby	C8-Shelby	28	1,8	1130	18
C9	ao ar	PVC	C9-1	28	2,0	1130	37	
				28	2,1	1160	32	
	Shelby	C9-Shelby	28	1,8	1130	8		
C10	ao ar	PVC	C10-1	7	2,0	1190	20	
				7	2,0	1150	25	
			C10-2	14	2,0	1200	40	
				14	2,0	1150	40	
			C10-3	14	2,0	1170	37	
				14	2,0	1200	41	
	Shelby	C10-Shelby	28	1,8	1160	18		
C11	câmara		C11-4C	14	2,0	1230	40	
				14	2,0	1220	20	
			C11-7C	28	2,1	1170	30	
				28	2,0	1220	49	
			?	90	2,0	-	180	
				90	2,0	-	317	
				90	2,0	-	314	
				90	2,0	-	189	
			PVC	C11-8C	28	1,9	1200	24
					90	2,0	-	151
			Metálico	C11-9C	28	1,8	1200	28
					28	1,2	1220	50
			ao ar	Cartão	C11-4S	14	1,8	1160
	28	2,1			1120	78		
PVC	C11-8S	28		2,0	1220	49		
		90		2,0	-	212		
Metálico	C11-9S	28		2,0	1190	27		
		90		2,0	-	152		

H/D – Relação entre a altura (H) e o diâmetro (D) do provete.

Quadro 17 – Definição da composição da calda. Resistência à compressão simples. (cont.)

AMOSTRA	TIPO DE CURA	TIPO DE MOLDE	DESIG. PROVETE	TEMPO DE CURA (dias)	H/D	MASSA VOLÚMICA (kg/m ³)	TENSÃO DE ROTURA (kPa)
C12	câmara	Cartão	C12-4C	14	2,0	1260	75
				14	2,0	1270	57
			C12-7C	28	2,0	1230	144
			?	90	2,0	-	538
		PVC		90	2,0	-	325
			C12-5C	14	2,0	1340	29
				14	2,0	1240	38
			C12-8C	28	2,0	1290	100
			?	90	2,0	-	420
				90	2,0	-	420
	Metálico	C12-6C	15	2,0	1220	22	
		C12-9C	28	2,0	1260	86	
	ao ar	Cartão	C12-4S	14	2,1	1260	34
				14	2,1	1250	59
				28	2,0	-	170
			?	90	2,0	-	234
		PVC		90	2,0	-	490
				90	2,0	-	860
			C12-5S	14	2,0	1200	22
				14	2,0	1260	60
C12-8S			28	2,0	1260	110	
?			90	2,0	-	634	
Metálico		C12-6S	15	2,0	1250	34	
		C12-9S	28	2,0	1240	61	
		?	90	2,0	-	290	

Na Fig. 5 representa-se a variação da tensão de compressão com a extensão axial, obtida nos ensaios de compressão simples efectuados sobre as amostras C1-0 a C4-2, após 18 dias de cura. As tabelas dos restantes ensaios, cujos resultados são apresentados no Quadro 17, não foram disponibilizadas, motivo pelo qual não foi possível apresentar os referidos gráficos.

Os valores obtidos nos ensaios de resistência à compressão simples, são da mesma ordem de grandeza dos relatados na bibliografia da especialidade. Como exemplo, é de referir que no artigo de *Portier* (1984), é indicado um valor de 60 kPa para uma calda com 35 kg de bentonite e 170 kg de cimento do tipo Portland, e de 100 kPa para idêntica quantidade de bentonite e 200 kg de cimento.

No que se refere à evolução da tensão de compressão, constata-se que o seu máximo valor é atingido para 1 a 2% de extensão axial, a que se segue uma quebra bastante acentuada, na maioria dos casos analisados.

Da observação dos gráficos, conclui-se que os provetes de uma mesma amostra poderão ser caracterizados por comportamentos distintos, sendo este o caso da amostra C1-1, cujos provetes apresentam a mesma tensão de rotura mas deformabilidade inicial distinta, e o caso das amostras C1-0 e C2-1, com tensões de rotura de diferente magnitude. No que se refere à amostra C2-1, a diferença poderá ser explicada pelo diferente valor de massa volúmica húmida de cada um dos provetes, correspondendo o valor mais elevado de tensão de rotura ao provete com a maior massa volúmica – 1250 kg/m³. Este valor é, aliás, superior à massa volúmica média das restantes amostras ensaiadas, e poderá ter resultado de uma composição mais rica em cimento do que o preconizado ou da alteração das condições de cura. Efectivamente, a cura da maioria dos provetes foi efectuada ao ar, em condições não controladas de temperatura e humidade.

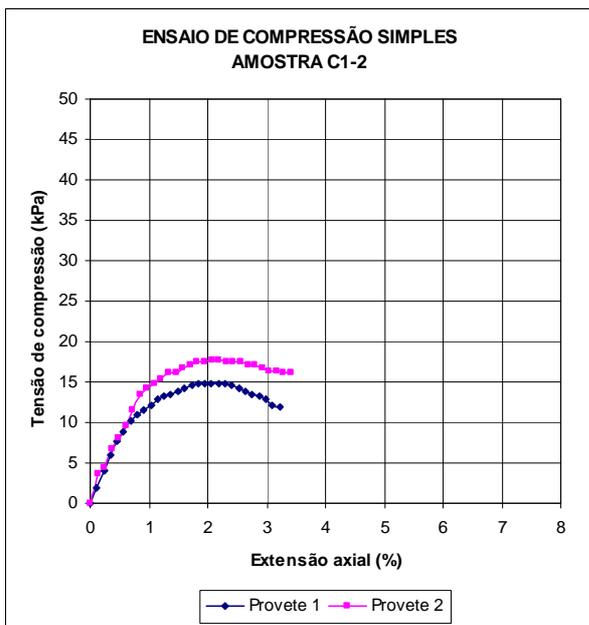
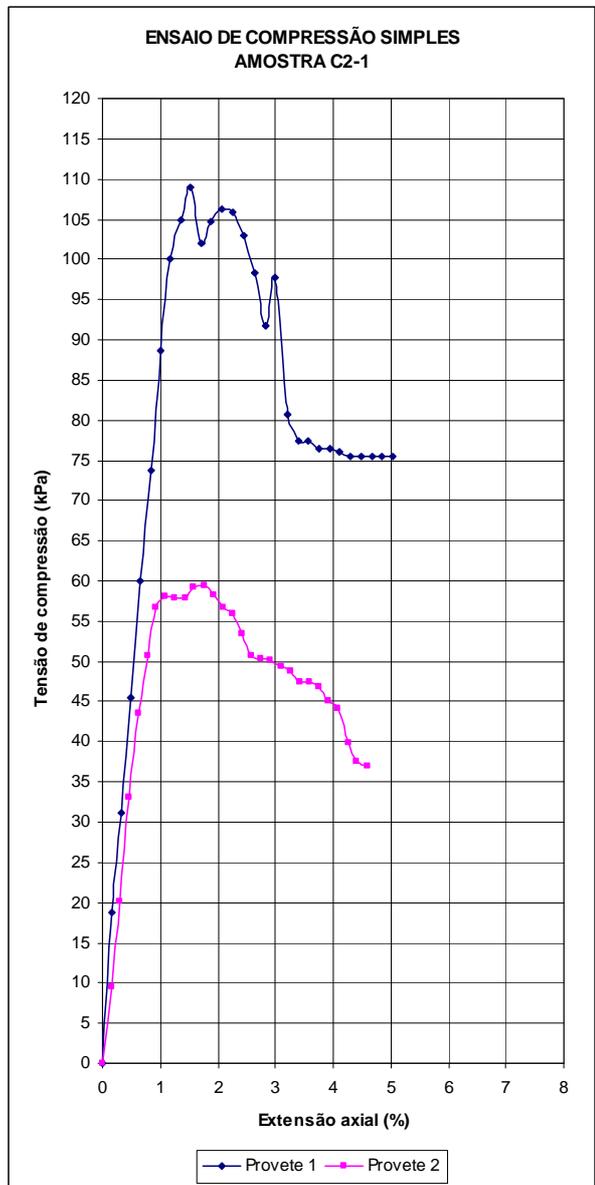
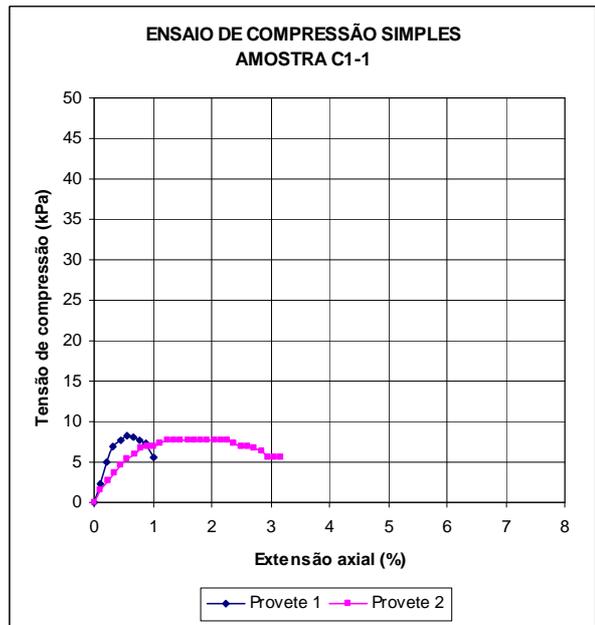
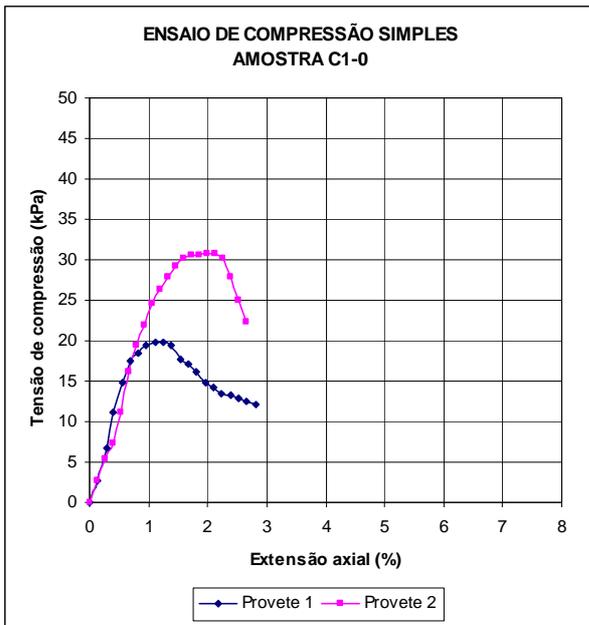


Fig. 5 – Determinação da composição da calda. Ensaio de compressão simples.

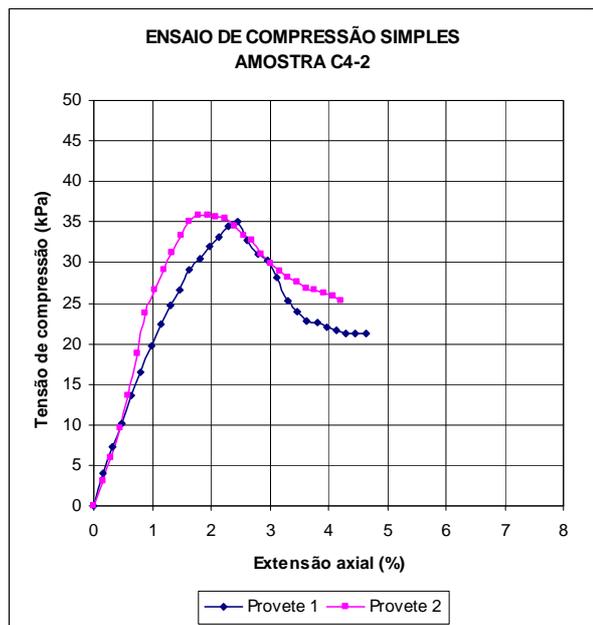
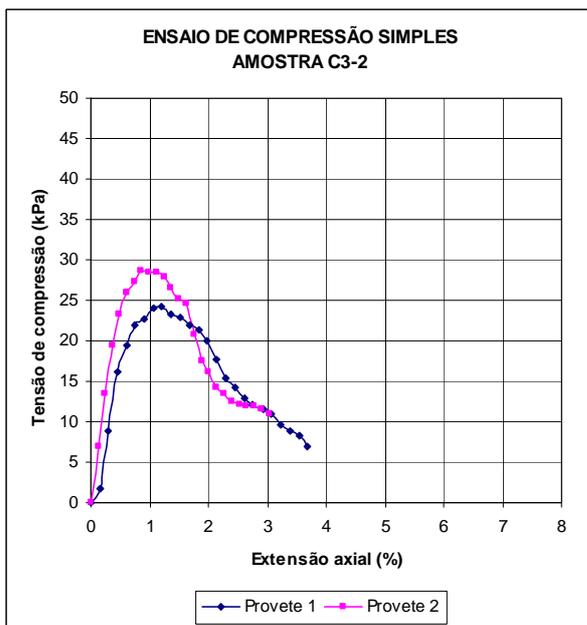
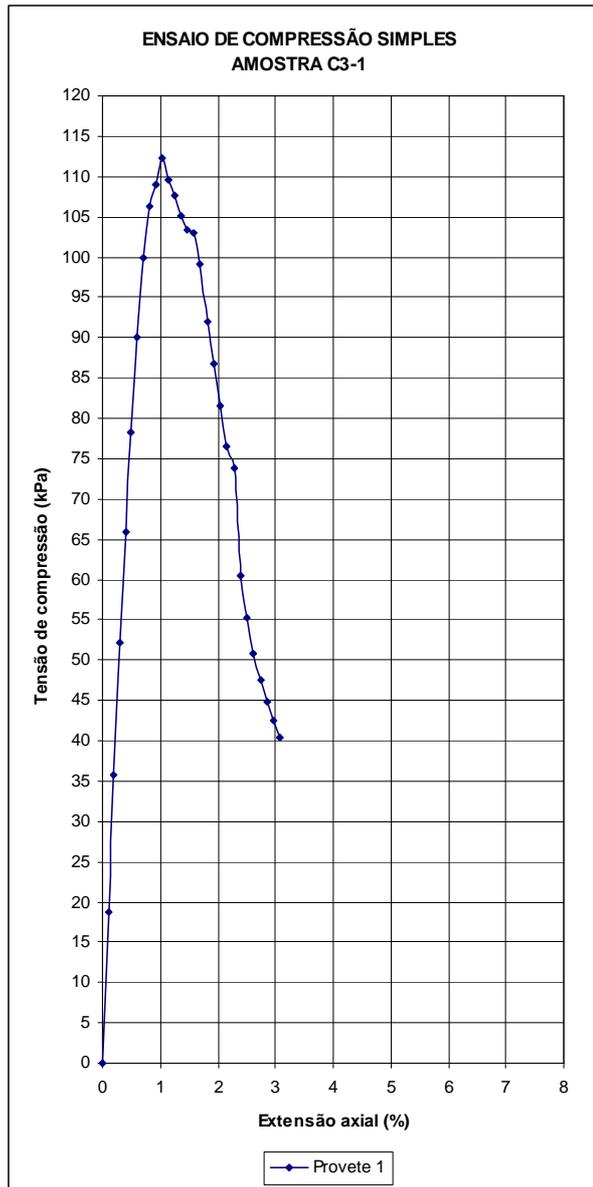
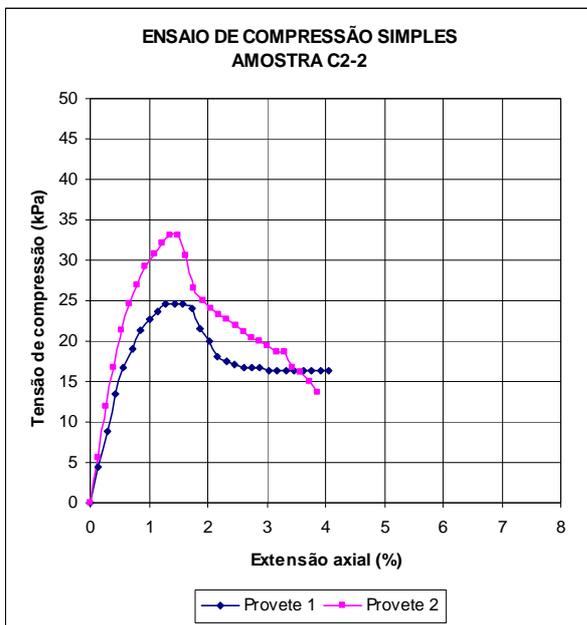


Fig. 5 – Determinação da composição da calda. Ensaios de compressão simples (cont.).

O grande número de ensaios efectuados permitiu identificar a influência de diversos parâmetros sobre a resistência à compressão simples da calda auto-endurecedora. Foram assim objecto de análise a composição da calda, o processo de fabricação das amostras, a geometria das amostras e a incorporação de solo na calda. Por último, avalia-se a forma como a resistência da calda evolui com o tempo de cura.

Nesta análise, foram desprezados todos os ensaios de amostras com relação altura / diâmetro igual ou inferior a 1,7 e igual ou superior a 2,2, de forma a eliminar a influência da geometria da amostra sobre o seu comportamento.

É de sublinhar que, à excepção das amostras *C11* e *C12*, todas as restantes foram fabricadas em molde de *PVC* e curadas ao ar, pelo que as análises a seguir apresentadas, dizem respeito a amostras nestas condições, salvo quando referido em contrário.

Nos parágrafos seguintes descrevem-se as principais conclusões que se retiram da análise comparativa dos resultados.

i) Influência da composição da calda

Neste item foram analisadas, de forma individualizada, a influência da quantidade de cimento, da quantidade de bentonite, do tipo de cimento e ainda dos aditivos, sobre a resistência da calda. As caldas ensaiadas foram fabricadas, na sua totalidade, com o mesmo tipo de bentonite, motivo pelo qual a sua influência sobre a resistência não foi analisada.

Na Fig. 6 e na Fig. 7 apresenta-se a evolução da resistência da calda com o aumento da quantidade de cimento, respectivamente, para cimento do tipo *CEM II-32,5N* e para cimento do tipo *CEM I-32.5R*. Nas amostras confeccionadas com cimento do tipo *CEM I-42.5R* foram mantidas as quantidades dos constituintes, o que inviabilizou o estudo da sua influência sobre a resistência.

Em todas as situações estudadas existe uma relação evidente entre o aumento da quantidade de cimento e o aumento da resistência, em conformidade com o referido nos artigos da especialidade. Como exemplo, é de referir que *Garvin e Hayles* (1999) constataram que aumentando o conteúdo em cimento de 100 para 350 kg, a resistência aumentava em cerca de 4 a 5 vezes, embora a calda se tornasse mais frágil. Outros autores, como *Caron* (1973) e *Opdyke e Evans* (2005), também confirmaram esta influência da quantidade de cimento sobre a resistência da calda auto-endurecedora.

A excepção a este comportamento, verifica-se para o ensaio aos 28 dias de cura de amostras fabricadas com cimento do tipo *CEM I-32.5R*. Neste caso, a amostra *C1*, é caracterizada por resistência superior à da amostra *C10*, apesar de ambas as amostras terem a mesma composição. Mas a amostra *C1* também tem resistência superior à amostra *C2*, que foi fabricada com uma quantidade de cimento superior. É interessante notar que a calda auto-endurecedora da amostra *C1* apresentou uma viscosidade superior à das amostras *C2* e *C10*.

Sobre este assunto, *Caron* (1973) constatou que amostras com diferentes dosagens de bentonite, mas idêntica viscosidade³ apresentavam idêntica resistência. Concluiu assim, que existia uma relação entre a viscosidade e a resistência à compressão simples das caldas auto-endurecedoras. De facto, nas amostras com menor viscosidade, e portanto mais susceptíveis ao fenómeno de sedimentação, *Caron* constatou que ocorria uma maior concentração de sólidos na parte inferior do provete e a consequente subdosagem na parte superior. Este facto condicionava a localização da superfície de rotura, que ocorria sempre no topo do provete, ou seja na zona de menor resistência. De acordo com esta hipótese, a caldas

³ Viscosidades idênticas para amostras com diferentes quantidades de bentonite, embora do mesmo tipo, resultaram da alteração do tempo de hidratação da bentonite e da alteração da ordem de introdução dos constituintes na mistura.

com reduzida viscosidade estariam associadas resistências médias mais reduzidas e a maior dispersão dos valores. A uma variação de 1 s na viscosidade, corresponderia uma alteração da resistência média da calda de 10%.

É de referir que o número de ensaios efectuados não é suficiente para determinar o tipo de relação entre o aumento da resistência e o aumento da quantidade de cimento. Não obstante, da análise das figuras, poderá concluir-se que a influência da quantidade de cimento sobre a resistência da calda parece ser superior no caso do cimento *CEM II-32.5N*.

No que se refere à influência do tipo de cimento, a comparação dos resultados dos ensaios efectuados sobre as amostras *C4* e *C7*, nas quais se fez apenas variar o tipo de cimento, respectivamente *CEM II-32.5N* e *CEM I-42.5R*, permite concluir que a segunda é caracterizada por uma resistência média superior, sobretudo nos primeiros dias de cura, esbatendo-se a diferença com o aumento do período de cura. É de notar que o cimento *CEM I-42.5R* apresenta uma resistência à compressão aos 28 dias de cura, superior a 42,5 MPa e inferior a 62,5 MPa (ensaio efectuado de acordo com a Norma *NP EN 1961-1*), sendo caracterizado por uma evolução muito rápida da resistência, apresentando logo aos 21 dias de cura um valor de 20 MPa. O cimento *CEM II-32.5N* apresenta menor resistência à compressão – superior a 32,5 MPa e inferior a 52,5 MPa, aos 28 dias – e uma evolução mais lenta, caracterizando-se por um valor superior a 16 MPa, aos 7 dias de cura. Estas diferentes características dos cimentos são perfeitamente identificadas no comportamento das caldas.

Da comparação das amostras *C2-1* e *C2*, com composições bastante semelhantes, mas cimento de tipo diferente, respectivamente, *CEM II-32.5N* e *CEM I-32.5R*, constata-se que a resistência da primeira, aos 28 dias de cura (apenas um resultado), é um pouco superior à resistência da segunda, nas mesmas condições (cinco resultados). De acordo com as fichas técnicas dos cimentos em causa, fornecidas pela empresa *TEIXEIRA DUARTE S.A.*, a sua resistência aos 28 dias é idêntica. Para além do cimento utilizado no fabrico das duas amostras, foi identificada outra diferença entre ambas. A massa volúmica da amostra *C2-1* (1230 kg/m³) é superior à da amostra *C2* (1060 kg/m³ a 1130 kg/m³) e à da generalidade das restantes amostras, pelo que o resultado do ensaio efectuado sobre a amostra *C2-1* não pode ser considerado representativo.

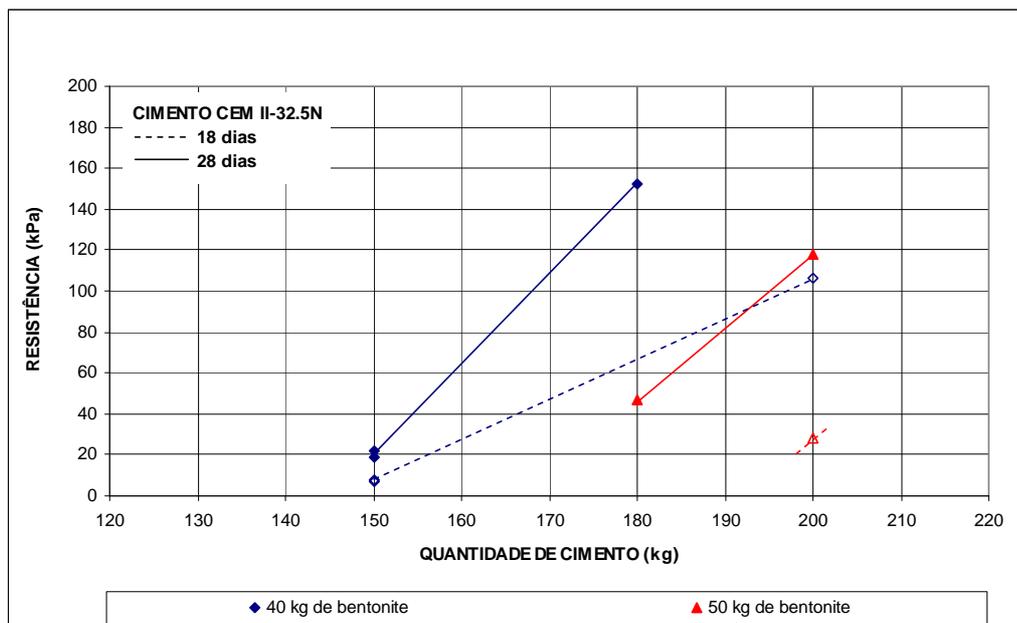


Fig. 6 – Influência da quantidade de cimento *CEM II-32.5N* sobre a resistência à compressão simples.

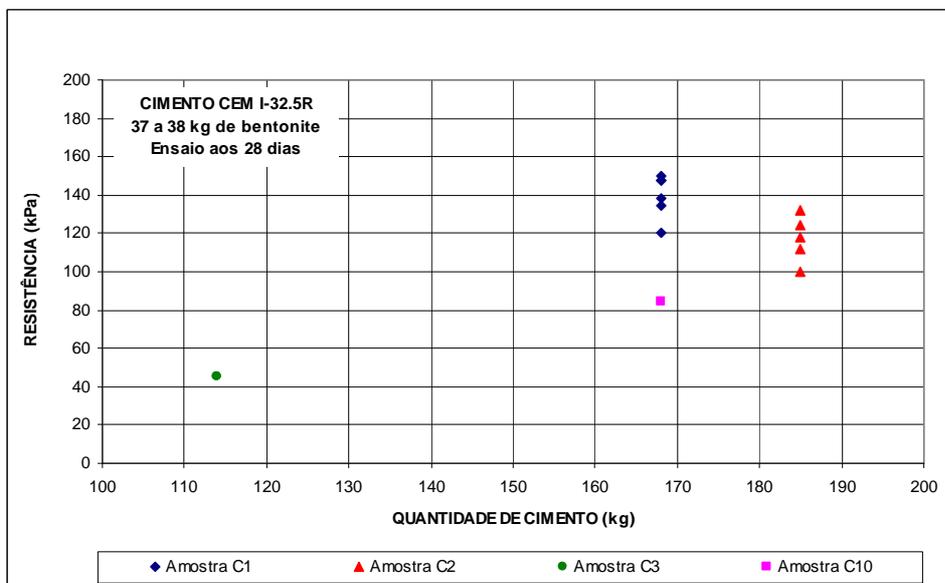
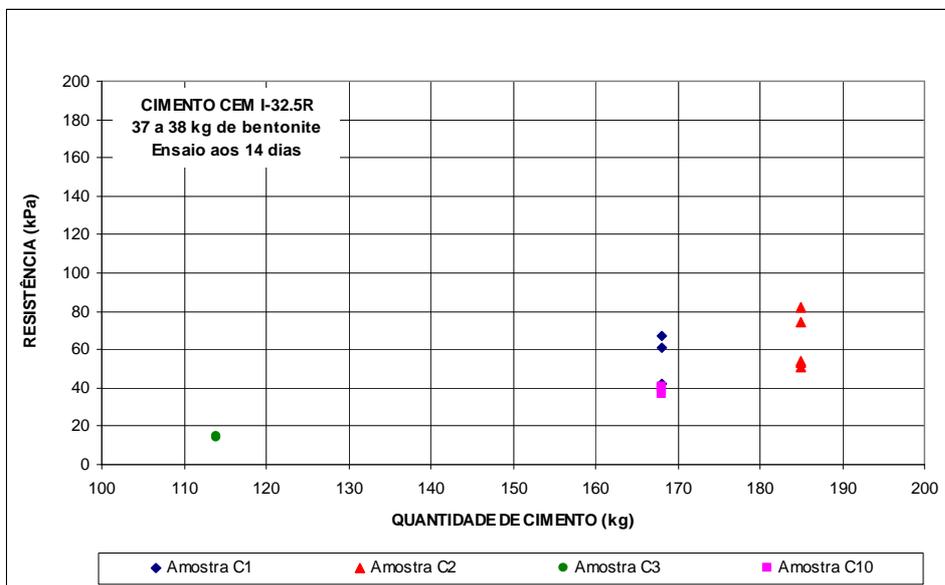
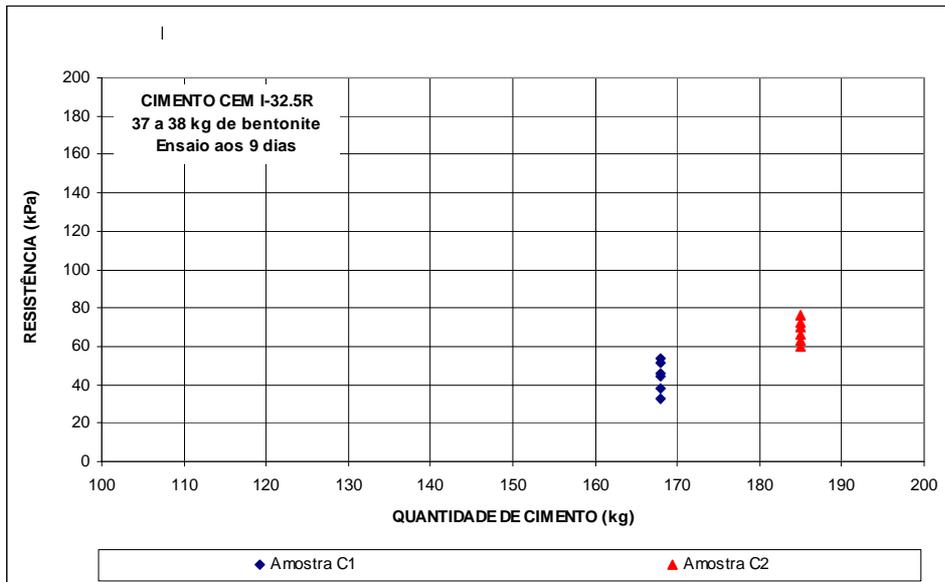


Fig. 7 – Influência da quantidade de cimento *CEM I-32.5R* sobre a resistência à compressão simples.

Relativamente à influência da quantidade de bentonite, apresenta-se na Fig. 8 a variação da resistência para diferentes quantidades de cimento *CEM II-32.5N* e dois períodos de cura. Nas amostras confeccionadas com os restantes tipos de cimento, a quantidade de bentonite foi mantida constante.

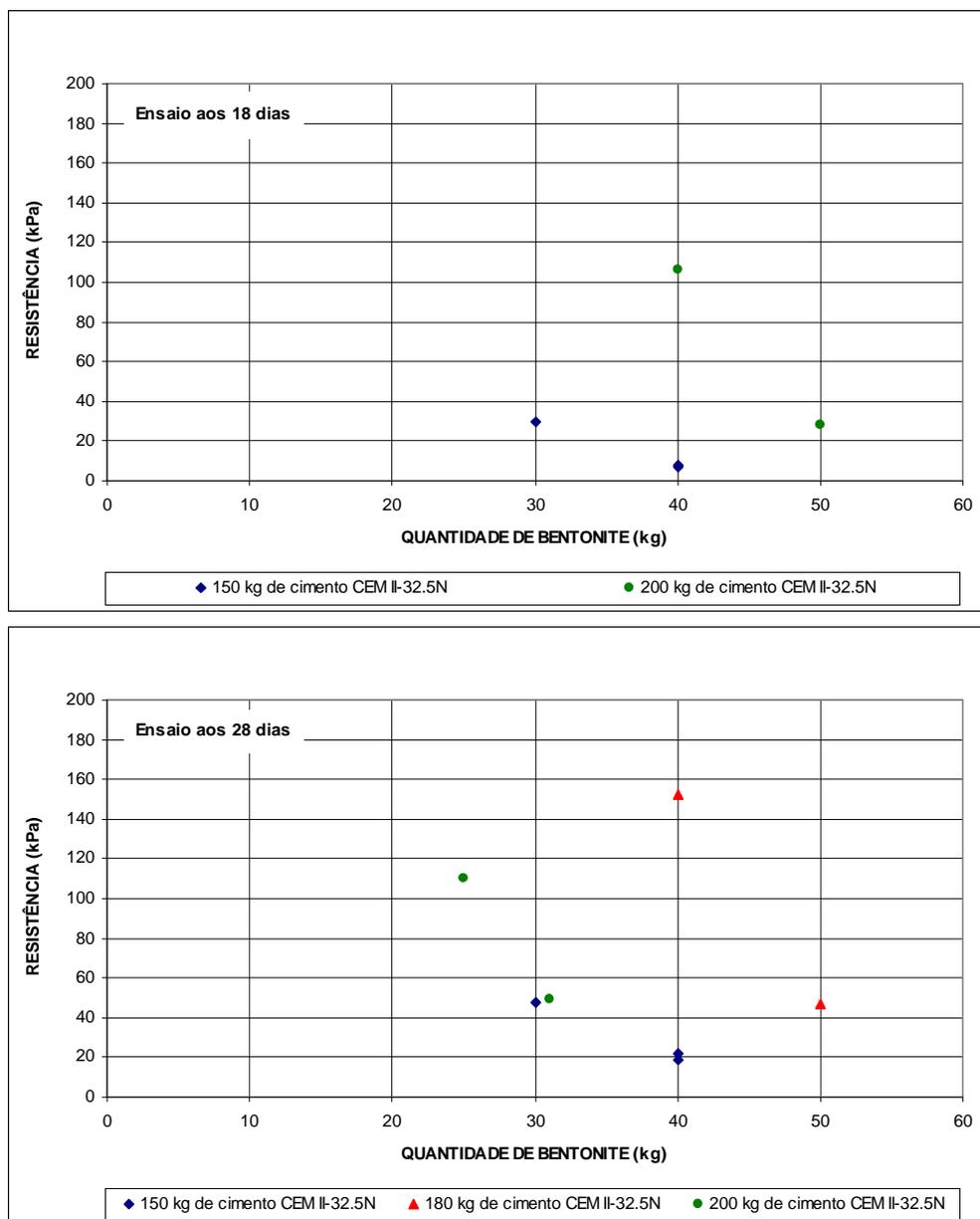


Fig. 8 – Influência da quantidade de bentonite sobre a resistência à compressão simples da calda.

Da análise da Fig. 8, é notória a redução da resistência da calda com o aumento da quantidade de bentonite, parecendo mesmo que a influência deste parâmetro se acentua com o aumento da quantidade de cimento presente na amostra. Face ao número limitado de ensaios, esta conclusão deve ser encarada com reservas.

O último aspecto analisado, no que se refere à composição da calda, diz respeito à influência do aditivo *AQUABETON* incorporado nas amostras *C6* e *C9*, a primeira fabricada com cimento do tipo *CEM II-32.5N* e a segunda com cimento *CEM I-42.5R*. Na Fig. 9 apresenta-se a variação da resistência para diferentes períodos de cura das duas referidas amostras e das amostras *C4* e *C7*, com composição idêntica mas sem aditivo. À semelhança do que foi referido noutras situações, os dados são escassos e não permitem tirar conclusões inquestionáveis. Aparentemente, a incorporação de aditivo na composição das amostras não parece ter influência sobre a sua resistência aos 28 dias de cura. Poderá

eventualmente influenciar a evolução desta resistência, acelerando o seu crescimento, facto que deve ser confirmado.

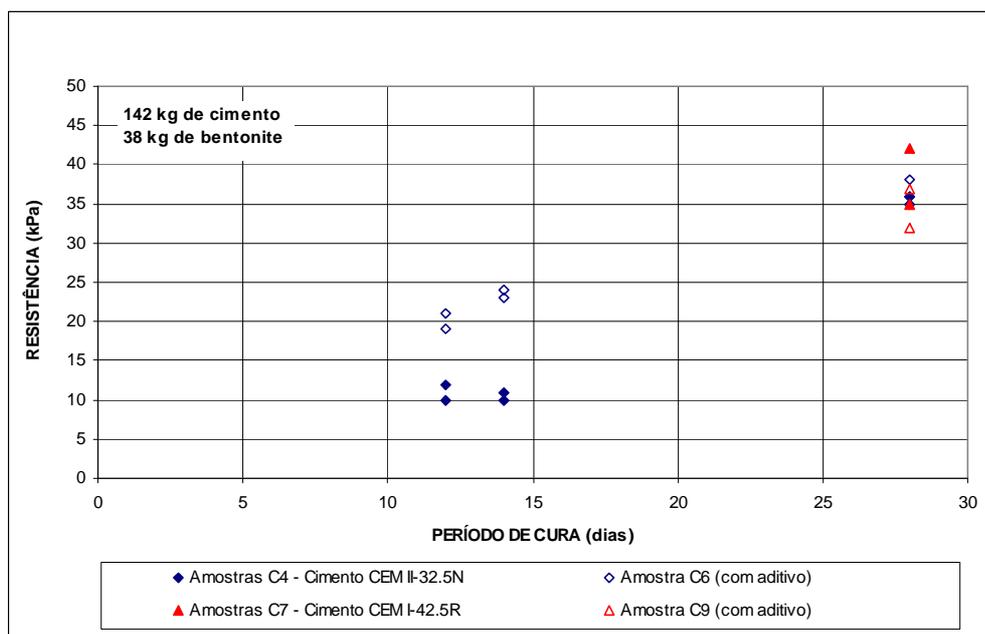


Fig. 9 – Influência do aditivo AQUABETON sobre a resistência à compressão simples da calda.

ii) Influência do processo de fabricação da amostra e do meio de cura

Neste item são analisados os aspectos relacionados com o processo de fabricação da calda, mas também com o tipo de molde utilizado e com o meio em que se processa a cura da amostra.

No que se refere ao repouso da calda bentonítica após o seu fabrico, o gráfico da Fig. 10 apresenta resultados contraditórios da sua influência na resistência à compressão simples da calda. No entanto, tratando-se de valores da mesma ordem de grandeza, admite-se como provável que a hidratação de apenas 1 hora da calda bentonítica, não altera as características mecânicas da calda auto-endurecedora.

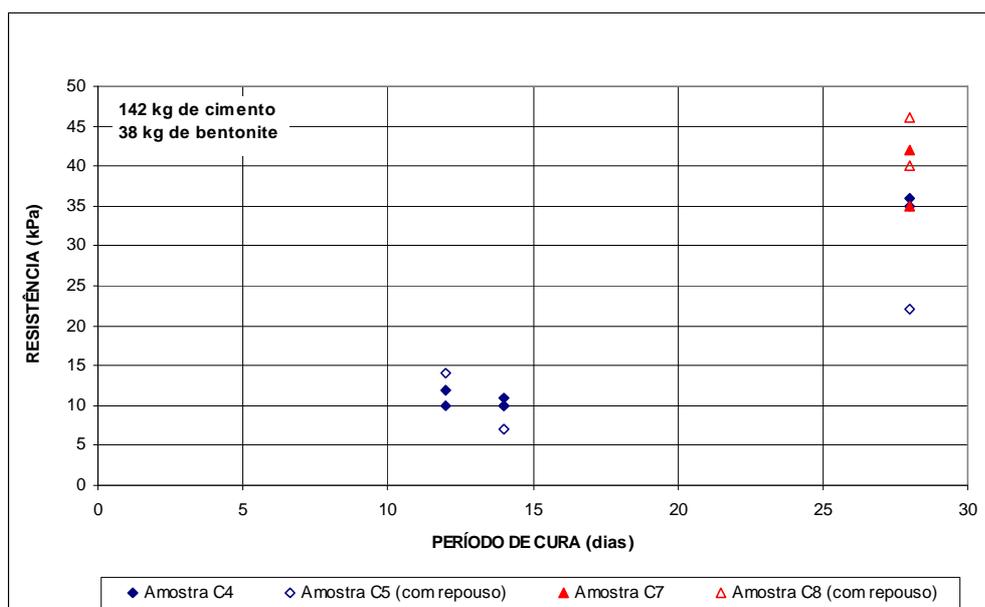


Fig. 10 – Influência do repouso da calda bentonítica sobre a resistência à compressão simples da calda auto-endurecedora.

Já no que concerne ao tipo de molde utilizado na fabricação das amostras, foi identificada a sua clara influência sobre os resultados dos ensaios de resistência à compressão simples. Assim, e no que respeita ao amostrador do tipo *Shelby*, obtiveram-se, na totalidade dos casos analisados, valores de resistência bastante inferiores aos obtidos com amostrador de *PVC*. Nas amostras *C4*, *C5*, *C6* e *C9*, a resistência aos 28 dias, com amostrador *Shelby*, não ultrapassou os 10 kPa, variando entre 22 a 38 kPa em amostrador de *PVC*. Para as amostras *C8* e *C10*, as resistências foram da ordem de 20 kPa com amostrador *Shelby* e variaram entre 40 a 84 kPa com amostrador de *PVC*.

É conhecido que a elevada alcalinidade das amostras de cimento-bentonite provoca uma reacção com o alumínio, que se traduz pela libertação de hidrogénio, impedindo a cura das amostras. No entanto, os amostradores *Shelby* seriam de aço inoxidável, pelo que esta não é a explicação para o facto anterior. Tanto numa situação como noutra (*Shelby* e *PVC*) as amostras foram retiradas dos moldes através da aplicação de pressão num dos topos. Se houver alguma imperfeição nas paredes dos moldes, designadamente ferrugem, a sua extracção poderá introduzir perturbações na amostra constituída por material sensível, justificando assim os menores valores de resistência à compressão simples.

No caso particular das amostras *C11* e *C12*, foi estudada a influência de três tipos de molde – *PVC*, cartão e metálico (desconhece-se de que tipo) – sobre a resistência da calda. Na Fig. 11, representa-se a evolução deste parâmetro com o período de cura, em duas situações distintas – cura ao ar e cura em câmara.

Os resultados da amostra *C11* são de difícil interpretação. Os reduzidos valores de resistência à compressão simples desta amostra e a normal dispersão dos resultados dos ensaios, inviabilizam eventuais conclusões sobre a influência dos diferentes tipos de molde.

Já no que se refere à amostra *C12*, constata-se que às amostras fabricadas em molde de cartão se associam resistências superiores, independentemente da cura ser feita na câmara ou ao ar. Pelo contrário, as amostras fabricadas com molde metálico (tipo de metal desconhecido) são caracterizadas por resistência mais baixa, à semelhança do que foi constatado com o amostrador *Shelby*.

De acordo com as informações fornecidas pelos técnicos da *TEIXEIRA DUARTE S.A.*, os moldes de cartão foram parafinados antes da introdução da mistura, para impedir eventuais perdas de água. A utilização de um molde descartável, como era o caso, tem como vantagem minimizar as perturbações provocadas pela extracção da amostra. Pelo contrário, as amostras em moldes de *PVC* foram extraídas por aplicação de pressão num dos topos, o que, em caldas de fraca resistência mecânica pode causar algumas perturbações, justificando assim os menores valores de resistência à compressão simples.

No que se refere à influência do ambiente de cura, apresenta-se na Fig. 12 a evolução da resistência à compressão simples das amostras *C11* e *C12* em duas situações distintas. Num caso, a cura foi feita ao ar e no outro na câmara, ou seja em ambiente controlado (a temperatura e a humidade na câmara não são identificadas). Os valores apresentados dizem respeito unicamente a amostras preparadas em molde de *PVC*.

Nas condições atrás referidas, parece evidente que a cura na câmara se traduz por um atraso na evolução da resistência à compressão simples da calda. Efectivamente, nos primeiros dias de cura, as resistências são praticamente idênticas, independentemente do ambiente em que é feita a cura da amostra. Há medida que o período de cura aumenta, aumenta também a diferença na resistência das amostras, sendo inferior para as amostras com cura em ambiente controlado. É de assinalar que a parede moldada se encontra, na sua quase totalidade, abaixo do nível freático, pelo que a cura na câmara simula, de forma mais aproximada, as condições reais.

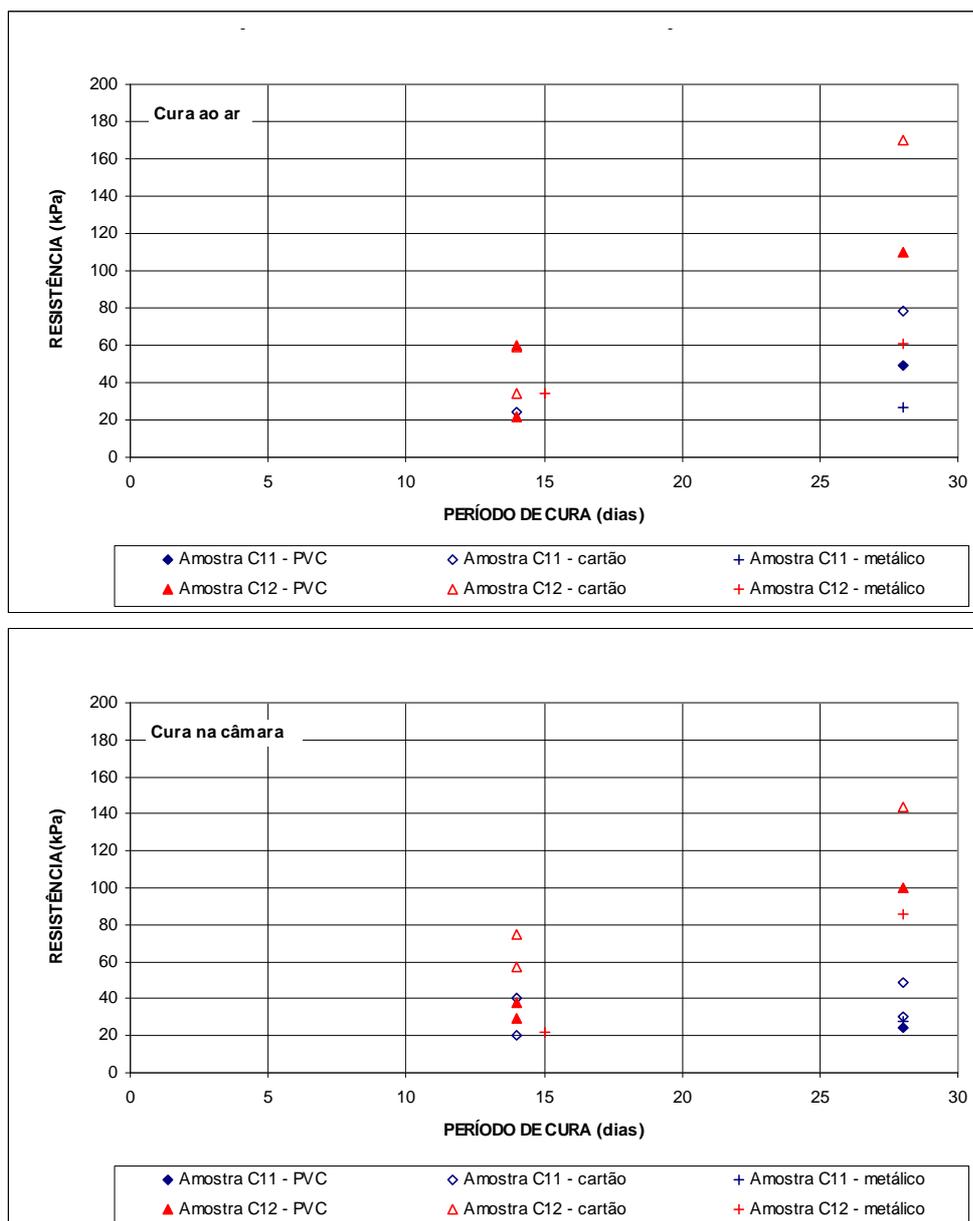


Fig. 11 – Influência do tipo de molde sobre a resistência à compressão simples da calda.

iii) Influência da geometria da amostra

Apesar de terem sido confeccionadas amostras com diferentes relações altura-diâmetro, os resultados disponíveis não são suficientes para determinar a influência deste parâmetro sobre a resistência da amostra. De acordo com a norma ASTM D1633-00 (2007) “Standard Test Method for Compressive Strength of Molded Soil-Cement Cylinders”, a resistência à compressão simples de amostras de solo-cimento com uma relação altura-diâmetro de 1,15 é cerca de 1,10 vezes o valor obtido em provetes com H/D de 2,0.

Sobre este assunto, encontrou-se ainda uma referência relativa a caldas de caulinite. De acordo com os autores – Anandarajah e Zhao (2000) –, a altura e o diâmetro do provete deveriam ser praticamente idênticos, de forma a prevenir o corte localizado da amostra.

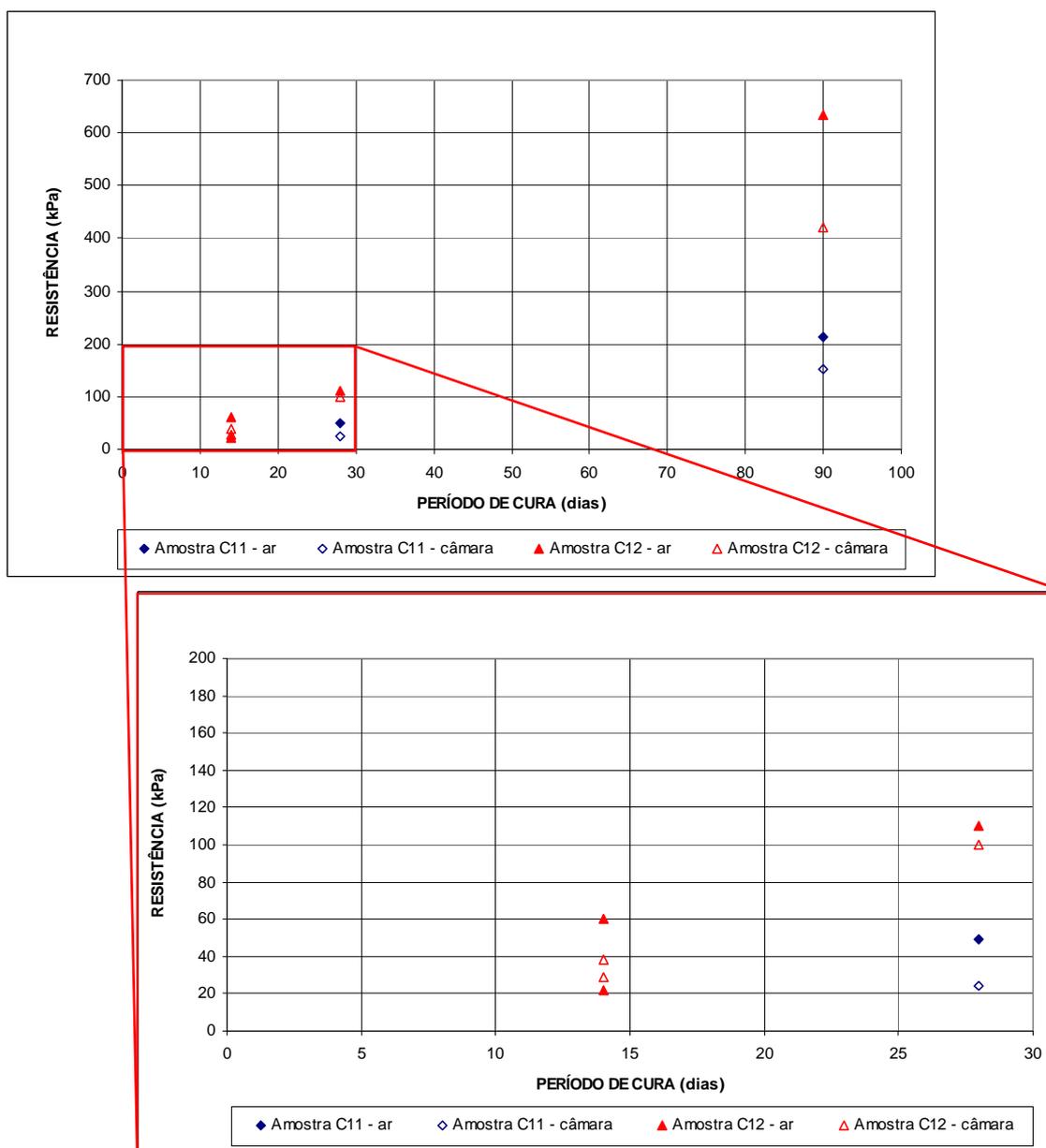


Fig. 12 – Influência do tipo de cura da amostra sobre a resistência à compressão simples da calda. Amostras confeccionadas em molde de PVC.

iv) Influência do período de cura

Na Fig. 13 apresenta-se a evolução da resistência à compressão simples para amostras fabricadas com diferentes composições, com molde *PVC* e cura ao ar. O período de cura máximo foi de 90 dias.

Conforme se constata da análise da Fig. 13, independentemente da composição da amostra, a resistência à compressão simples aumenta com o período de cura, em conformidade com o processo normal de presa dos ligantes hidráulicos. Aparentemente, a taxa a que se processa esta evolução também sofre alterações, conforme constatado por *Caron* em 1973. Este autor concluiu que o aumento da resistência das caldas auto-endurecedoras é proporcional ao logaritmo do tempo. No presente caso é de sublinhar que apenas existem dois resultados para os 90 dias de cura, com valores muito distintos.

A influência do período de cura na resistência à compressão simples mantém-se, mesmo que se admitam outras condições de fabrico das amostras, designadamente cura na câmara, molde metálico ou molde de cartão.

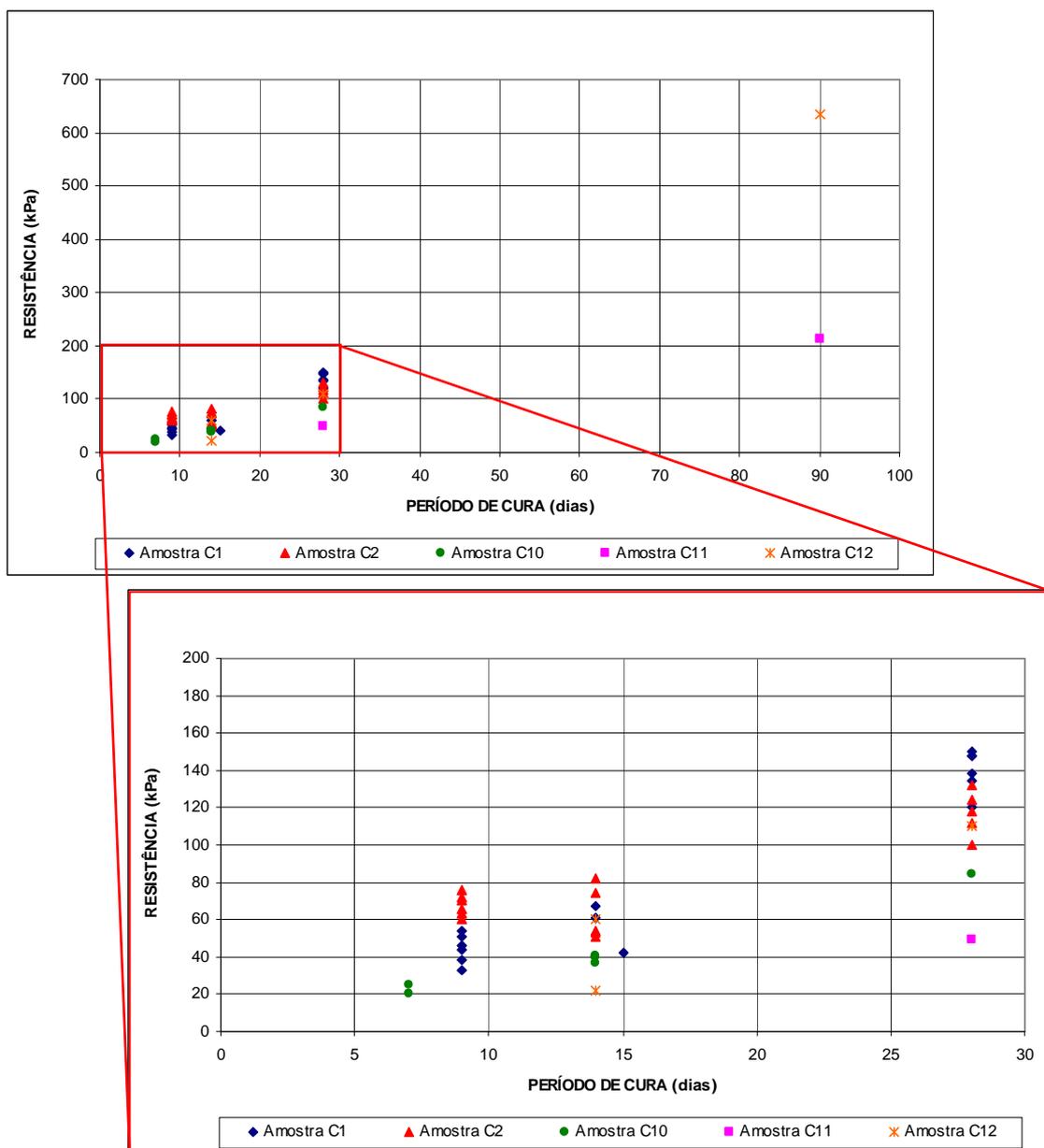


Fig. 13 – Influência do período de cura da amostra sobre a resistência à compressão simples da calda.

v) Influência do processo de execução da parede moldada

Neste item foi apenas analisada a alteração da resistência da calda com a expectável integração de solo fino resultante do processo de escavação e de preenchimento da vala. Para o efeito, foram ensaiadas amostras com 5% de solo fino, cujas características se desconhecem, e comparados os resultados com os obtidos para amostras de idêntica composição, mas sem incorporação de solo.

É de referir que, apesar de terem sido fabricadas duas amostras com contaminação de solo fino (C4-1 e C4-2), apenas foram fornecidos os resultados da amostra C4-2. Aos 18 dias de cura, esta amostra é caracterizada por uma resistência de 35 kPa, superior à que se obteve nas mesmas condições para a amostra C3-2, de idêntica composição e geometria – 24 kPa. Obviamente que a quantidade de ensaios realizados é insuficiente para se retirar qualquer conclusão fiável sobre a influência deste factor.

No que se refere à deformabilidade das amostras, apresentam-se no Quadro 18 os valores obtidos com base nos gráficos constantes da Fig. 5.

Quadro 18 – Definição da composição da calda. Ensaio de compressão simples. Módulos de deformabilidade aos 18 dias de cura.

AMOSTRA	MÓDULOS DE DEFORMABILIDADE (MPa)			
	INICIAL		$(\sigma'_1 - \sigma'_3)_{max}$	
	Provette 1	Provette 2	Provette 1	Provette 2
C1-0	2,7	2,1	1,8	1,5
C1-1	2,3	1,3	1,5	0,6
C1-2	1,8	1,9	0,8	0,9
C2-1	11,7	7,2	7,1	3,4
C2-2	3,2	4,3	1,9	2,4
C3-1	18,8	-	10,9	-
C3-2	3,6	5,8	2,0	3,3
C4-2	2,5	2,7	1,4	2,0

Os valores constantes do Quadro 18 revelam que a calda auto-endurecedora, quando não confinada, é significativamente deformável nos primeiros dias de cura.

A quantidade de bentonite influencia a deformabilidade da calda, sendo esta tanto maior quanto maior é aquela.

Aparentemente, e conforme expectável, quanto maior é a quantidade de cimento, menor é a deformabilidade, sendo excepção as amostras C2-1 e C3-1 com valores anormalmente elevados (quando comparados com os restantes resultados). Estas são também as amostras com maior massa volúmica húmida, variando entre 1180 e 1250 kg/m³, apesar de não existir qualquer explicação objectiva para este facto. O maior conteúdo de partículas sólidas destas amostras traduz-se, obviamente, por uma menor deformabilidade.

4.1.3. Descrição e análise dos ensaios de corte em compressão triaxial

A campanha de ensaios de laboratório para definição da composição da calda integrou a realização de ensaios de corte em compressão triaxial, consolidados não drenados com medição de pressões intersticiais. Os ensaios foram realizados no *INSTITUTO DA CONSTRUÇÃO da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto*.

Sobre estes ensaios, é de sublinhar que se desconhece o tipo de molde utilizado na confecção de cada uma das amostras. A única informação relativa a este assunto refere que foram entregues amostras em moldes de PVC e outras em moldes de cartão, mas sem a respectiva identificação.

Também se desconhece qual o período de cura a que foram submetidas a maioria das amostras, sendo excepção as amostras C1-1 e C2-1. Das restantes, é apenas conhecida a data de entrega dos resultados ao Cliente que, supostamente, terá sido sempre na sequência imediata da conclusão dos referidos ensaios. Assim, apenas como referência, apresenta-se o período que decorreu entre a fabricação das amostras e o envio dos resultados.

No Quadro 19 apresentam-se algumas características dos provetes relevantes para a análise dos resultados dos ensaios triaxiais.

Da análise do Quadro 19 conclui-se que a hidratação do cimento terá conduzido a uma redução bastante acentuada no teor em água da calda, sendo excepção a amostra C3-1 (2ª série) que apresenta um valor bastante semelhante ao inicial (determinado com base nas quantidades de água, de cimento e de bentonite estabelecidas para a composição de cada amostra e desprezando o teor em água dos materiais em pó). A inexistência de informações sobre o tipo de molde e sobre as condições de cura de cada uma das amostras dificulta a análise da influência destes aspectos sobre a evolução do teor em água. Em futuras campanhas de ensaios, será conveniente determinar o teor em água real das amostras imediatamente após a sua confecção, o que permitirá identificar eventuais alterações na composição das mesmas relativamente à teórica.

Quadro 19 – Definição da composição da calda. Ensaios de corte em compressão triaxial, consolidados não drenados. Características das amostras ensaiadas.

AMOSTRA	COMPOSIÇÃO		TEMPO DE CURA (dias)	TEOR EM ÁGUA (*) NO FABRICO %	TEOR EM ÁGUA ANTES DA SATURAÇÃO (%)			
	Cimento (kg)	Bentonite (kg)			Provete 1	Provete 2	Provete 3	Provete 4
C1-1 (2ª série)	150	40	8	526	299	299	310	307
C2-1 (1ª série)	180	40	20	454	265	231	269	251
C2-1 (2ª série)			91		299	305	304	-
C2-2 (2ª série)	180	50	129	435	318	303	311	-
C3-1 (1ª série)	200	40	141	417	247	239	244	238
C3-1 (2ª série)			91		423	418	420	-
C3-2 (1ª série)	200	50	?	400	246	240	241	249

(*) Valor teórico, calculado com base na composição das amostras e desprezando o teor em água da bentonite e do cimento em pó.

Previamente à análise dos resultados dos ensaios propriamente ditos, é de assinalar a ocorrência de duas anomalias, uma no ensaio do provete 1 da amostra C2-2 (2ª série) e outra no ensaio do provete 2 da amostra C3-1 (2ª série), ambos consolidados sob uma tensão de 400 kPa. Esta anomalia consiste no registo do volume dos provetes, após consolidação (medido em laboratório), inferior ao volume de água presente no mesmo provete também após consolidação (e que se obtém pela subtração, ao peso do provete, do seu peso após secagem, com ambos os valores determinados em laboratório, e tendo em consideração que o peso volúmico da água é de 9,8 kN/m³).

Na Fig. 14 à Fig. 20 apresentam-se, para a fase de corte, os gráficos de variação da tensão deviatória e do excesso de pressão intersticial com a extensão axial, e os gráficos $p'-q$ de todos os provetes ensaiados. A velocidade de aplicação da carga foi de 0,02 mm/min.

A análise dos referidos gráficos permite retirar as seguintes conclusões:

- i) todas as amostras apresentam um comportamento semelhante em termos de tensão deviatória - extensão axial, que se caracteriza por um aumento acentuado da tensão deviatória na fase inicial do corte, atingindo valores máximos para extensões da ordem de 0,8 a 4%, a que se segue uma redução da tensão com o aumento da extensão axial, tanto mais acentuada quanto maior é a tensão de consolidação a que foi submetido o provete; para extensões axiais elevadas, a tensão deviatória mantém-se constante;
- ii) na generalidade dos casos, quanto maior é a tensão de consolidação a que o provete foi sujeito, maior é a extensão axial a que ocorre o pico de tensão deviatória;
- iii) as pressões intersticiais geradas na fase de corte são positivas, atingindo o seu máximo valor sensivelmente com a rotura do provete, e mantendo-se com um valor constante a partir daí; o valor máximo de pressão intersticial gerado no corte é ligeiramente inferior à tensão de consolidação a que o provete foi sujeito, em todos os casos analisados, comportamento que deve ser objecto de análise;
- iv) as curvas $p'-q$ dos provetes apresentam o mesmo andamento, sendo excepção, na quase totalidade dos ensaios, a curva relativa ao provete consolidado com a menor tensão efectiva (50 kPa);
- v) há coincidência entre o pico da tensão deviatória e a rotura do provete, conforme se constata pela observação dos gráficos $p'-q$; com efeito, após a rotura, os pontos mantêm-se sobre uma linha que passa pela origem do gráfico $p'-q$, que se designa por linha de estado crítico;

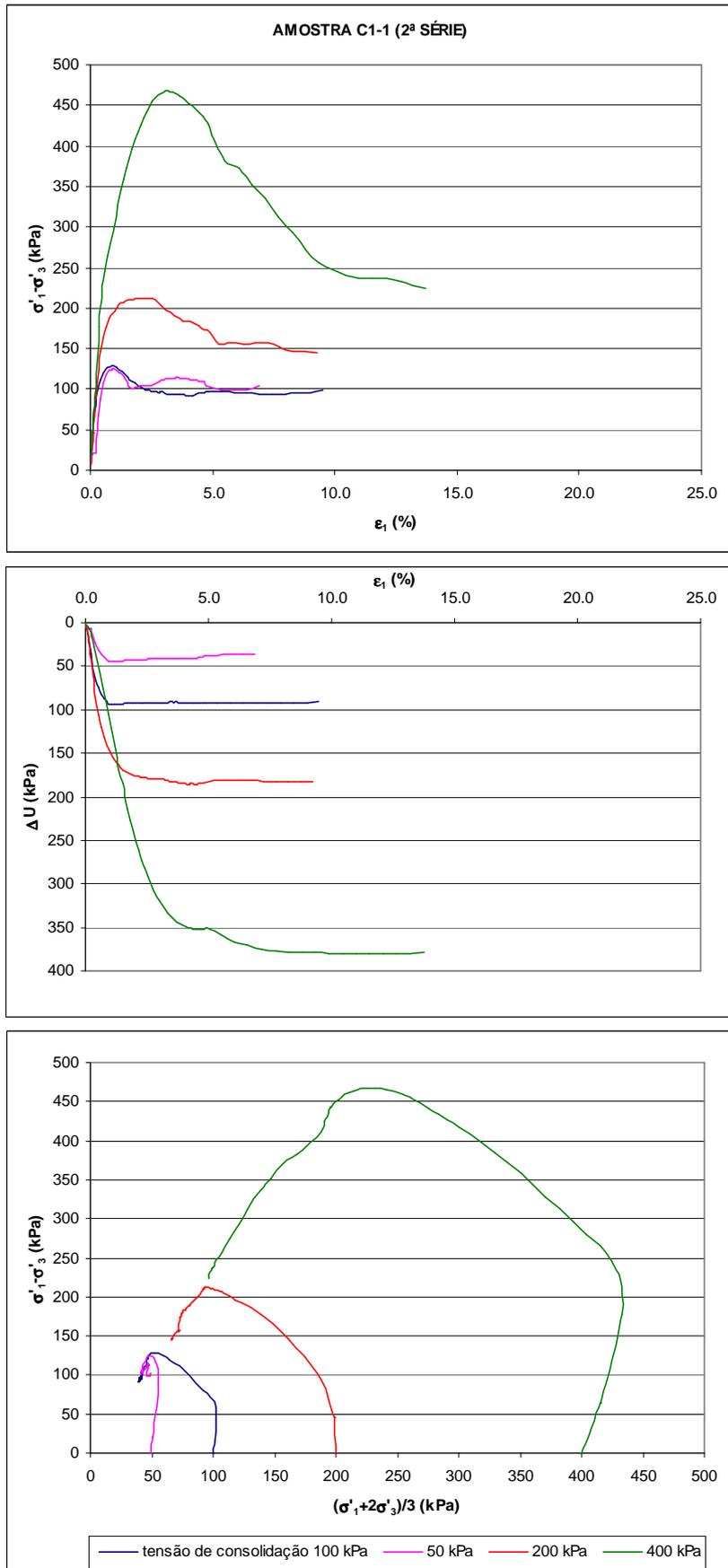


Fig. 14 – Determinação da composição da calda. Ensaio de corte em compressão triaxial. Amostra C1-1 (2ª série).

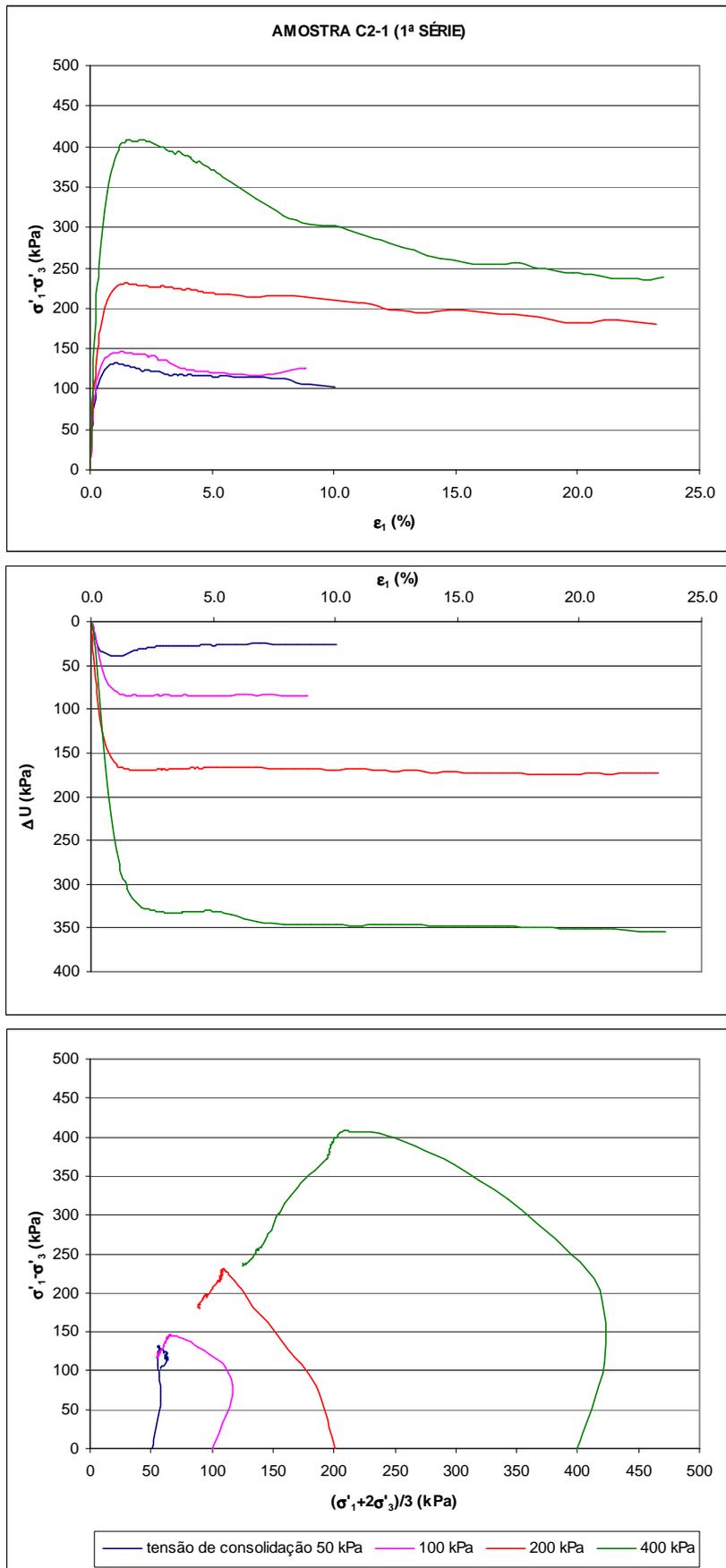


Fig. 15 – Determinação da composição da calda. Ensaio de corte em compressão triaxial. Amostra C2-1 (1ª série).

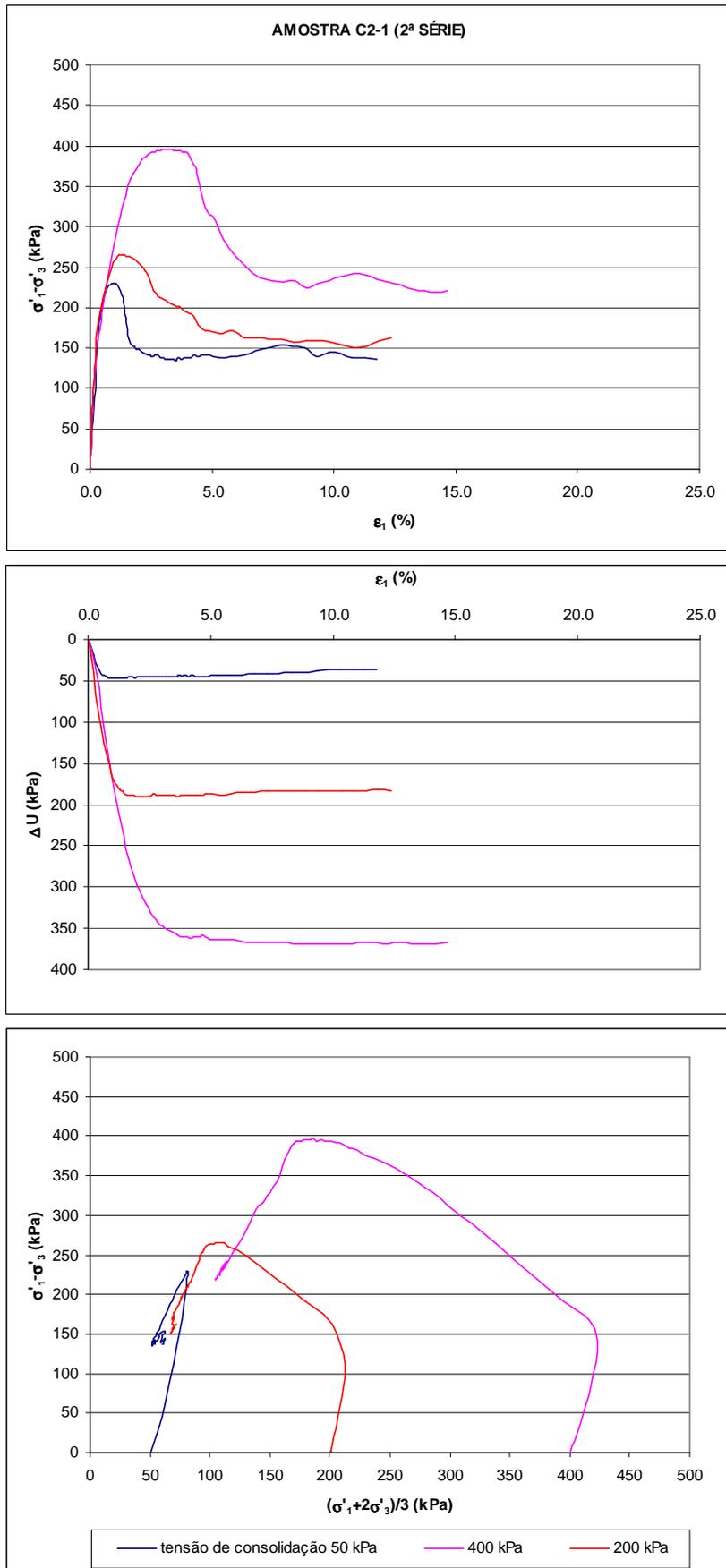


Fig. 16 – Determinação da composição da calda. Ensaio de corte em compressão triaxial. Amostra C2-1 (2ª série).

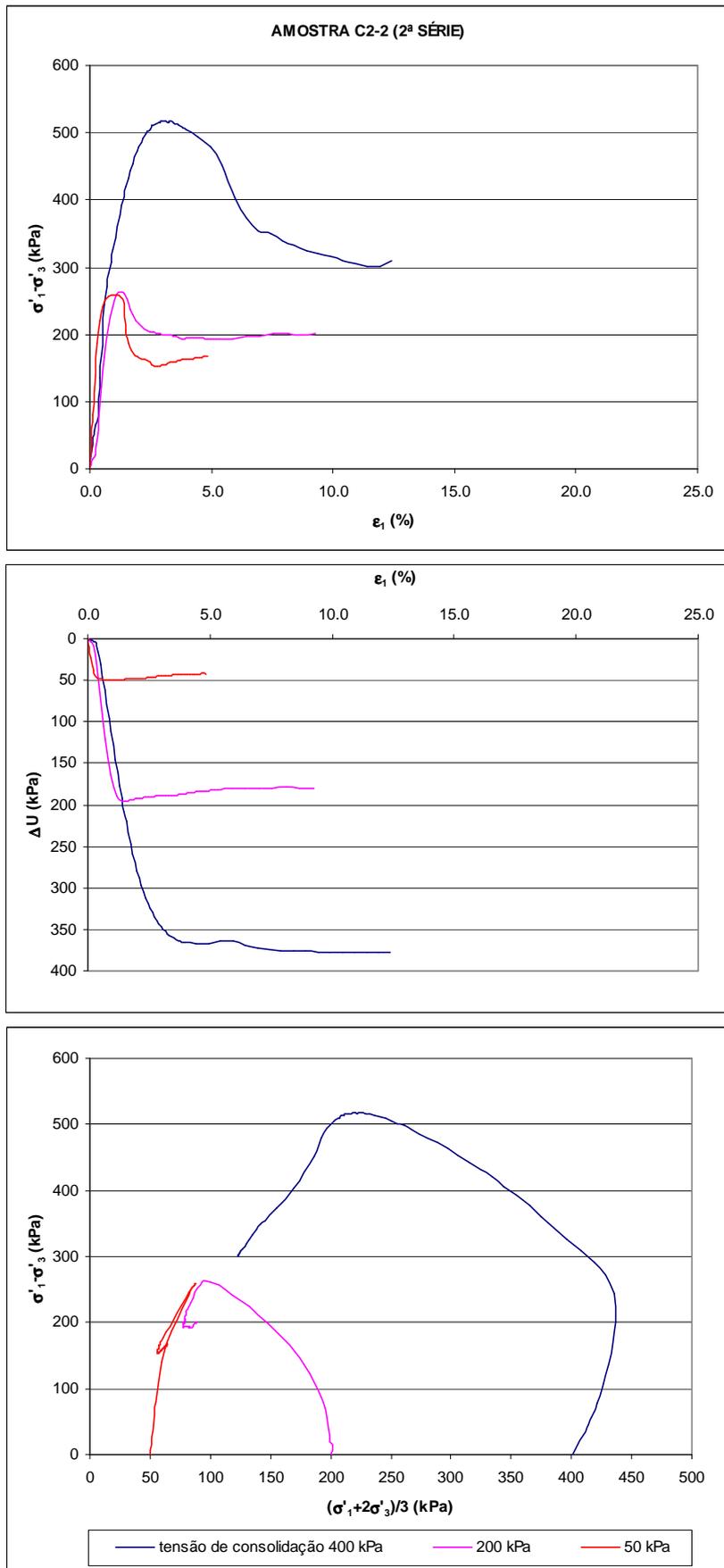


Fig. 17 – Determinação da composição da calda. Ensaio de corte em compressão triaxial. Amostra C2-2 (2ª série).

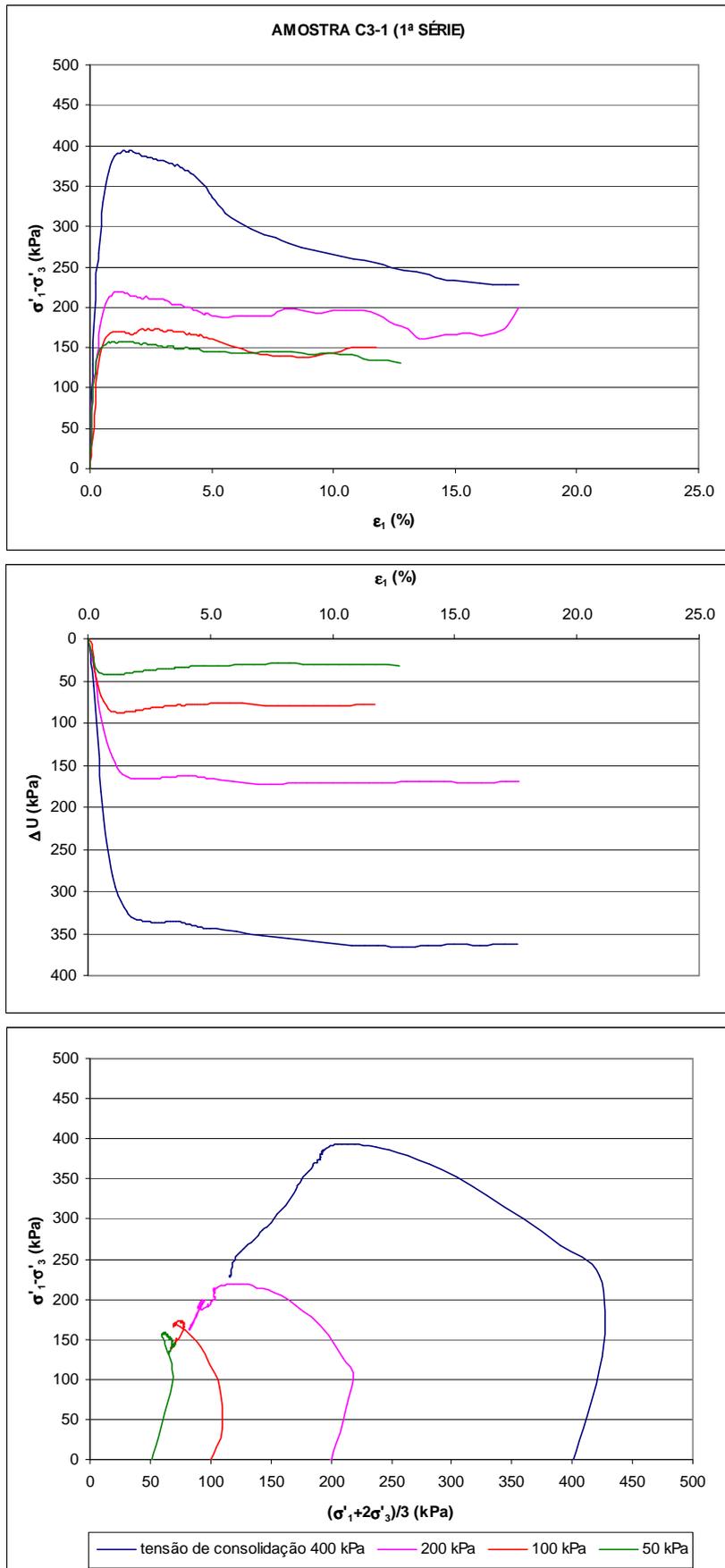


Fig. 18 – Determinação da composição da calda. Ensaio de corte em compressão triaxial. Amostra C3-1 (1ª série).

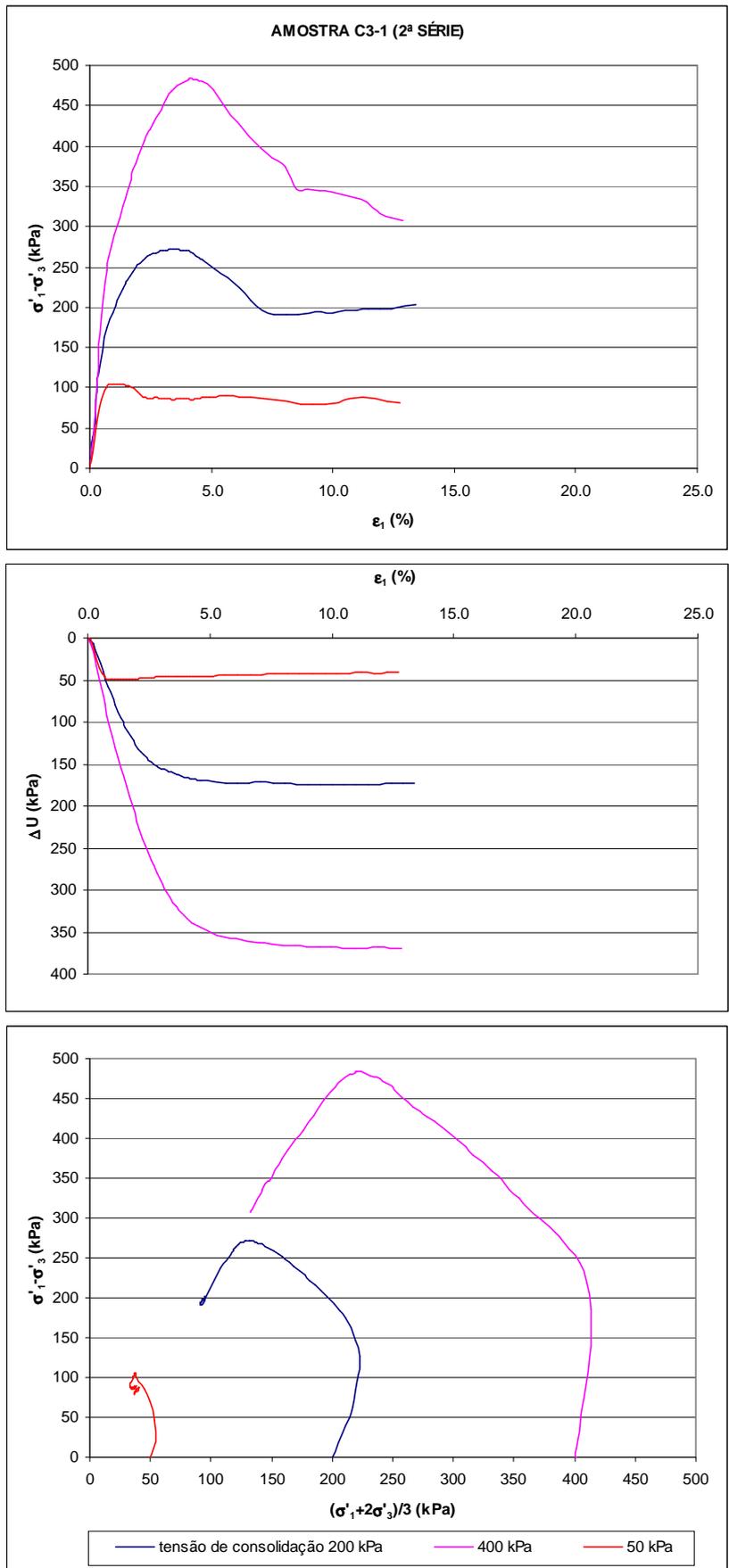


Fig. 19 – Determinação da composição da calda. Ensaio de corte em compressão triaxial. Amostra C3-1 (2ª série).

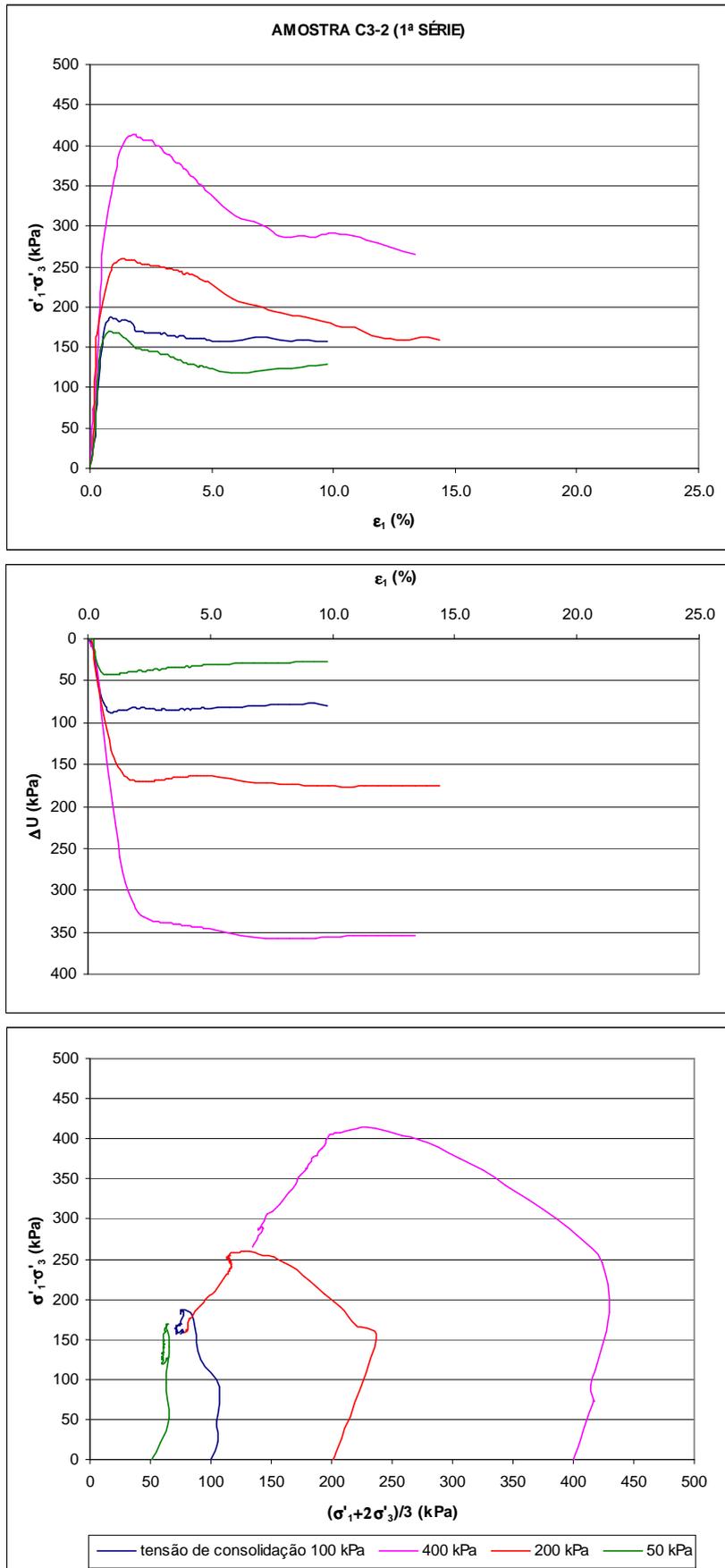


Fig. 20 – Determinação da composição da calda. Ensaio de corte em compressão triaxial. Amostra C3-2 (1ª série).

Tendo em consideração o exposto nas alíneas anteriores, admite-se que as amostras de calda auto-endurecedora têm um comportamento idêntico ao dos solos normalmente consolidados, em termos de tensão-extensão⁴.

No que se refere à constatação expressa na alínea iii), admite-se que o comportamento manifestado é a consequência de uma ineficiente consolidação. Efectivamente, só assim se justifica que, após o fecho das linhas de drenagem, a pressão intersticial dos provetes tenha aumentado para valores próximos da pressão na câmara. Na realidade, durante a etapa de consolidação a pressão actua sobre a fase líquida do provete, promovendo a sua expulsão, mas sem que a este comportamento se associe uma transferência de carga para a parte sólida. De facto, o esqueleto sólido não tem capacidade para suportar o acréscimo de carga, não respeitando a teoria da consolidação proposta por Terzaghi. De acordo com alguns autores, a alteração de comportamento de liquido viscoso para o de um material sólido só ocorre a partir de um determinado valor de massa volúmica, usualmente da ordem de 1,3 g/cm³. Ora, no final da consolidação, todos os provetes exibiam valores inferiores a 1,25 g/cm³.

É de referir, ainda, que os gráficos de variação da tensão deviatórica com a extensão axial apresentam uma configuração semelhante à observada nos ensaios de compressão simples.

No Quadro 20 apresenta-se a tensão deviatórica na rotura e a respectiva extensão axial.

Quadro 20 – Definição da composição da calda. Ensaios de compressão triaxial. Tensão deviatórica e extensão na rotura.

AMOSTRA	$\sigma'_c = 50 \text{ kPa}$		$\sigma'_c = 100 \text{ kPa}$		$\sigma'_c = 200 \text{ kPa}$		$\sigma'_c = 400 \text{ kPa}$	
	ϵ_1 (%)	$\sigma'_1 - \sigma'_3$ (kPa)	ϵ_1 (%)	$\sigma'_1 - \sigma'_3$ (kPa)	ϵ_1 (%)	$\sigma'_1 - \sigma'_3$ (kPa)	ϵ_1 (%)	$\sigma'_1 - \sigma'_3$ (kPa)
C1-1 (2ª série)	0,97	125	0,87	128	1,99	213	3,11	467
C2-1 (1ª série)	1,07	132	1,29	146	1,49	231	2,08	408
C2-1 (2ª série)	0,96	230	-	-	1,29	265	3,01	396
C2-2 (2ª série)	0,96	260	-	-	1,30	264	2,98	517
C3-1 (1ª série)	1,17	158	0,96	170	1,31	220	1,68	394
C3-1 (2ª série)	0,94	105	-	-	3,43	272	4,16	484
C3-2 (1ª série)	0,85	169	0,85	187	1,29	259	1,76	414

Como seria expectável, e de uma forma geral, as extensões na rotura aumentam com o aumento da tensão de confinamento a que estão submetidos os provetes, sendo da ordem de 0,85% a 1,17% para uma tensão de consolidação de 50 kPa e de 1,68 a 4,16% para tensões de 400 kPa. Segundo Caron (1973), o domínio plástico de deformação das caldas pode ser aumentado com o aumento da tensão de confinamento lateral e com a redução da velocidade de aplicação da carga. Outra conclusão importante, relatada por este autor, diz respeito à inexistência de fissuração dos provetes após se atingir o pico de tensão deviatórica, facto que habilita as caldas auto-endurecedoras a sofrerem grandes deformações, sem perderem a sua função impermeabilizante.

É interessante constatar que existe uma relação directa entre o teor em água das amostras, previamente à sua saturação (ou seja, após cura), e o valor da extensão na rotura, para uma tensão de consolidação de 400 kPa. Efectivamente, quanto maior é o teor em água, maior é a extensão axial a que ocorre a rotura. Assim, à amostra C3-1 (2ª série) caracterizada pelo maior valor de teor em água, 420%, corresponde o maior valor de extensão axial, 4,16%. Pelo contrário, às amostras C2-1 (1ª série), C3-1 (2ª série) e C3-2 (1ª série), caracterizadas por valores de teor em água de 242 a 254%, correspondem valores de extensão axial, na rotura, da ordem de 1,7 a 2,1%. Para as restantes amostras, com valores de teor em água intermédios, a rotura ocorreu para extensões axiais também intermédias.

⁴ Os solos normalmente consolidados são caracterizados por coesão aparente, em termos de tensão efectiva, nula, o que não é o caso, conforme se constata pela análise do Quadro 21.

A relação entre o teor em água após a suposta consolidação e o comportamento das amostras em termos de extensão na rotura parece ser inexistente. Admite-se assim, que o comportamento da calda auto-endurecedora (para tensões de consolidação elevadas) é condicionado pela relação entre o peso das partículas sólidas e o peso da água da amostra no início do ensaio (isto é, antes da saturação) que, por sua vez, depende da sua composição inicial e do processo de cura, responsável pela redução do conteúdo em água da calda. Esta aparente relação deve ser objecto de investigação futura.

Os parâmetros de resistência ao corte, em termos de tensões efectivas, são apresentados no Quadro 21.

Quadro 21 – Definição da composição da calda. Ensaio de corte em compressão triaxial. Parâmetros de resistência ao corte de pico.

AMOSTRA	TEMPO DE CURA (dias)	CRITÉRIO DE ROTURA					
		$(\sigma'_1 - \sigma'_3)_{\max}$			$(\sigma'_1 / \sigma'_3)_{\max}$		
		c' (kPa)	ϕ' (°)	R ²	c' (kPa)	ϕ' (°)	R ²
C1-1 (2ª série)	8	18	46	0,9999	9	57	0,9989
C2-1 (1ª série)	20	16	44	0,9996	15	45	0,9999
C2-1 (2ª série)	91	50	39	0,9991	45	44	1,0
C2-2 (2ª série)	129	48	46	0,9990	38	53	0,9990
C3-1 (1ª série)	141	24	41	0,9916	24	42	0,9964
C3-1 (2ª série)	91	11	50	0,9967	9	54	0,9940
C3-2 (1ª série)	(*)	35	37	0,9984	29	43	0,9998

(*) A data de entrega dos resultados destes ensaios é desconhecida.

Independentemente do critério de rotura considerado, constata-se que a calda auto-endurecedora é caracterizada por valores elevados de ângulo de atrito (entre 37° e 50° para o critério $(\sigma'_1 - \sigma'_3)_{\max}$ e entre 42° e 57°, se se considerar o critério $(\sigma'_1 / \sigma'_3)_{\max}$, ambos com correlações elevadas). A coesão aparente, em termos de tensões efectivas, é reduzida a moderada, nunca ultrapassando os 50 kPa.

Também no que se refere aos parâmetros de resistência ao corte, a amostra C3-1 (2ª série), com o maior teor em água inicial, parece distinguir-se das restantes amostras, sendo caracterizada pelo maior valor de ângulo de atrito e o menor valor de coesão.

A incerteza sobre o período de cura das amostras inviabiliza a análise da evolução da resistência com aquele parâmetro.

Tendo por base a envolvente de Mohr-Coulomb, determinou-se a resistência ao corte no estado de compressão simples, isto é, para a tensão lateral nula ($\sigma'_2 = \sigma'_3 = 0$). Os valores obtidos são apresentados no Quadro 22.

Quadro 22 – Definição da composição da calda. Ensaio de corte em compressão triaxial. Resistência ao corte para $\sigma'_3 = 0$.

AMOSTRA	TEMPO DE CURA (dias)	COMPOSIÇÃO (1 m ³ de água)		RESISTÊNCIA PARA $\sigma'_3 = 0$. (kPa)
		CIMENTO (kg)	BENTONITE (kg)	
C1-1 (2ª série)	8	150	40	37,0
C2-1 (1ª série)	20	180	40	35,7
C2-1 (2ª série)	91			93,0
C2-2 (2ª série)	129	180	50	81,6
C3-1 (1ª série)	141	200	40	49,9
C3-1 (2ª série)	91			23,7
C3-2 (1ª série)	?	200	50	60,6

Da comparação dos valores constantes no Quadro 22 com os resultantes dos ensaios de compressão simples, constata-se que existem diferenças significativas. No caso da amostra C1-1, o valor resultante do ensaio de

o corte em compressão triaxial é superior ao obtido com o ensaio de compressão simples para os 18 e 28 dias de cura, respectivamente de 7,5 kPa e de 20,5 kPa. Pelo contrário, no caso das amostras C2-1 e C3-1, os valores que se obtêm do ensaio de corte em compressão triaxial são inferiores aos do ensaio de compressão simples. De acordo com XX, a relação entre a resistência à compressão simples e o valor retirado do ensaio de corte em compressão triaxial, em condições não drenadas, para $\sigma'_3 = 0$, é da ordem de 1,2.

É de salientar que esta análise comparativa é condicionada pelo desconhecimento das condições de fabrico e cura das amostras sujeitas a ensaios triaxiais.

No Quadro 23 apresentam-se os módulos de deformabilidade das amostras para as seguintes situações:

- i) inicial (tangente à curva extensão axial - tensão deviatórica);
- ii) correspondente a metade da tensão de rotura (secante);
- iii) na rotura (secante);
- iv) para uma extensão axial de 1% (secante);
- v) para uma extensão axial de 2% (secante).

Quadro 23 – Definição da composição da calda. Ensaio de corte em compressão triaxial. Módulos de deformabilidade.

AMOSTRA	σ'_c (kPa)	MÓDULO DE DEFORMABILIDADE (MPa)				
		INICIAL	$(\sigma'_1 - \sigma'_3)_{\text{máx}}/2$	$(\sigma'_1 - \sigma'_3)_{\text{máx}}$	$\epsilon = 1\%$	$\epsilon = 2\%$
C1-1 (2ª série)	50	27,5	27,5	14,6	14,6	5,4
	100	53,4	46,6	14,8	13,2	5,0
	200	42,4	40,0	10,7	19,9	10,7
	400	52,1	47,7	15,0	30,1	21,3
C2-1 (1ª série)	50	52,4	50,1	12,3	13,7	6,2
	100	57,8	55,7	11,3	13,7	7,2
	200	73,4	58,0	15,5	21,7	11,7
	400	90,9	88,7	19,6	37,4	20,7
C2-1 (2ª série)	50	55,3	54,7	23,9	23,9	7,3
	200	87,4	72,7	20,5	26,4	12,4
	400	73,8	37,3	13,2	28,1	18,7
C2-2 (2ª série)	50	73,1	67,5	27,0	27,0	8,1
	200	45,4	35,1	22,3	29,2	11,4
	400	67,3	56,4	18,6	42,3	26,4
C3-1 (1ª série)	50	84,2	84,2	13,5	16,4	7,7
	100	50,9	42,5	17,7	17,7	8,5
	200	90,4	71,8	16,8	22,1	10,8
	400	117,0	107,0	23,4	38,3	19,3
C3-1 (2ª série)	50	20,3	20,0	11,2	10,3	4,5
	200	38,6	29,2	7,9	19,4	12,8
	400	41,4	36,2	11,6	28,3	19,2
C3-2 (1ª série)	50	30,0	29,1	19,9	17,5	7,3
	100	28,2	28,3	22,0	19,3	8,4
	200	71,9	67,2	20,1	26,0	12,5
	400	82,4	54,2	23,5	36,4	20,8

A evolução da tensão deviatórica com a extensão axial é retratada pelos valores de módulo de deformabilidade apresentados no Quadro 23. Para pequenas extensões, a tensão cresce rapidamente de forma praticamente linear, correspondendo-lhe valores de módulo de deformabilidade em geral superiores a 30 MPa e inferiores a 80 MPa. Com a aproximação do pico de tensão deviatórica, o módulo de deformabilidade sofre reduções graduais, pondo em evidência a plastificação do material.

Da análise do quadro conclui-se ainda que o material mais deformável corresponde ao da amostra C3-1 (2ª série) e o menos deformável ao da amostra C3-1 (1ª série). Também neste caso, parece existir uma relação entre o valor do teor em água inicial e as características de deformabilidade das amostras. De facto, é à amostra C3-1 (2ª série) que corresponde o maior valor de teor em água inicial (420%) e é à amostra C3-1 (1ª série) que corresponde o menor valor (242%). Este mesmo comportamento já havia sido constatado no item 4.2.2. relativo aos ensaios de compressão simples.

Os valores de módulo de deformabilidade obtidos em condições não confinadas, nos ensaios de compressão simples, são significativamente inferiores aos obtidos nos ensaios de corte em compressão triaxial. Estes resultados devem ser aferidos para diferentes períodos de cura.

A medição do volume das amostras e do peso respectivo antes da saturação e após a consolidação, permitiu avaliar a compressibilidade da calda auto-endurecedora. No Quadro 24 apresenta-se a variação do índice de vazios das amostras após a fase de consolidação, e na Fig. 21 as respectivas curvas de variação com a tensão de compressão (excluíram-se as amostras C2-2 (2ª série) e C3-1 (2ª série) para as quais existem apenas dois resultados válidos).

**Quadro 24 – Definição da composição da calda. Ensaios de corte em compressão triaxial.
Compressibilidade das amostras.**

AMOSTRA	σ'_c (kPa)	γ seco (kN/m ³)	$e_{inicial}$	e_{final}	Δe
C1-1 (2ª série)	50	31,1	9,88	9,56	0,32
	100	38,2	12,70	12,24	0,45
	200	24,3	7,68	6,78	0,90
	400	32,3	10,33	7,82	2,52
C2-1 (1ª série)	50	23,4	6,09	5,88	0,21
	100	36,5	9,17	8,80	0,37
	200	29,4	8,16	6,91	1,25
	400	27,2	7,15	5,19	1,96
C2-1 (2ª série)	50	38,6	12,18	12,01	0,16
	200	44,1	14,33	13,84	0,49
	400	43,1	14,06	11,98	2,08
C2-2 (2ª série)	50	33,8	10,87	10,86	0,007
	200	33,3	10,53	10,49	0,036
	400	Volume final da amostra inferior ao respectivo volume de água (*)			
C3-1 (1ª série)	50	30,9	7,56	7,53	0,04
	100	37,8	9,73	9,66	0,067
	200	35,7	9,01	8,31	0,70
	400	30,1	7,66	6,34	1,32
C3-1 (2ª série)	50	34,7	15,09	15,00	0,09
	200	50,4	22,27	15,73	6,54
	400	Volume final da amostra inferior ao respectivo volume de água (*)			
C3-2 (1ª série)	50	36,4	9,55	9,54	0,01
	100	40,8	10,66	10,58	0,074
	200	36,1	9,07	8,75	0,32
	400	27,7	6,77	6,15	0,61

(*) Aparentemente existirá um erro ou falta de precisão na medição do volume final da amostra ou na determinação dos pesos húmido e/ou seco, ou ainda uma significativa perda de água adsorvida, durante a secagem do material.

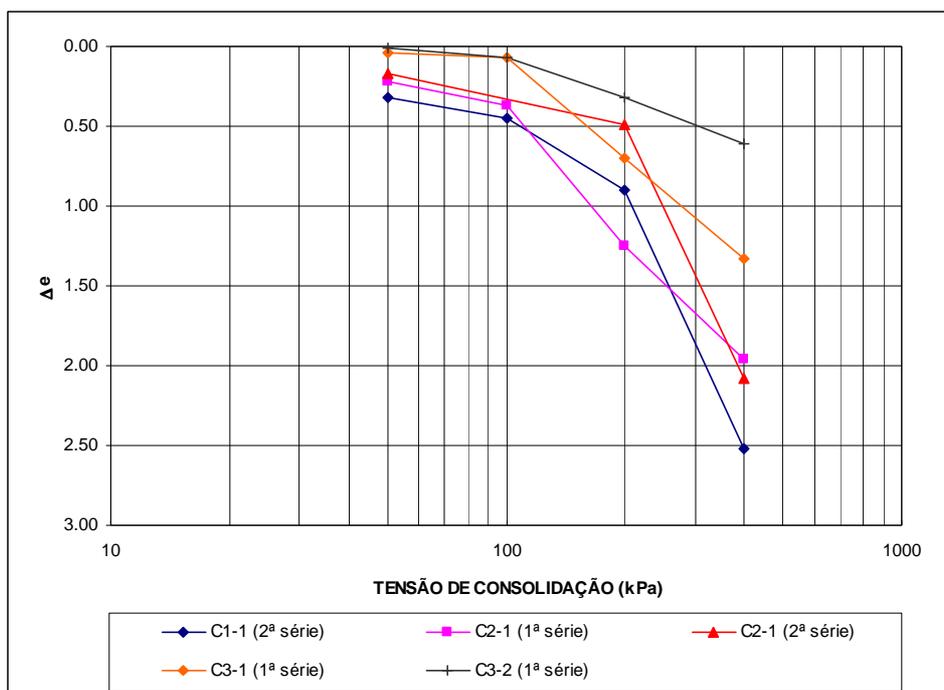


Fig. 21 – Determinação da composição da calda. Variação do índice de vazios das amostras na fase de consolidação.

Conforme se constata pela análise do quadro e da figura, o comportamento das amostras *C1-1 (2ª série)* e *C2-1 (2ª série)*, distingue-se do comportamento do restante grupo de amostras. Estas amostras apresentam compressibilidade superior à das restantes amostras para tensões de compressão superiores a 200 kPa. O segundo grupo de amostras apresenta menor compressibilidade, observando-se que a alteração da inclinação da curva ocorre logo a partir dos 100 kPa de tensão de compressão. As amostras deste grupo apresentavam valores semelhantes de teor em água inicial, entre 242% e 254%, valores estes um pouco inferiores aos do primeiro grupo, que são da ordem de 300%.

Esta aparente relação entre o teor em água das amostras após a cura e o respectivo comportamento em termos de resistência e de deformabilidade deve ser investigada em campanhas futuras de ensaios de laboratório.

Nos ensaios edométricos efectuados por *Opdyke e Evans (2005)* sobre amostras de escória-de-alto-forno, cimento e bentonite, caracterizadas por índices de vazios superiores a 10, foram medidas tensões de pré-consolidação da ordem de 100 a 200 kPa. Verifica-se assim uma semelhança de comportamento entre as amostras ensaiadas por estes autores e as amostras analisadas no presente documento. De acordo com aqueles autores, as amostras revelaram um comportamento idêntico ao de solos sobre-consolidados, em termos de carga-deformação – apesar de não terem sido submetidos previamente a tensões superiores às que foram implementadas durante o ensaio – e valores de compressibilidade da mesma ordem de grandeza dos obtidos em solos com elevado teor em água, designadamente argilas sensíveis e lodos.

4.1.4. Descrição e análise dos ensaios de determinação da permeabilidade

No Quadro 25 apresentam-se os resultados dos ensaios em câmara triaxial efectuados para determinação do coeficiente de permeabilidade de algumas amostras. Os referidos ensaios foram efectuados no *INSTITUTO DE CONSTRUÇÃO, na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto* (amostras *C1* e *C2-1*) e no *LNEC* (amostras *C1*, *C2* e *C4*). No *LNEC*, os ensaios para determinação da permeabilidade foram efectuados em câmara triaxial, a carga constante, com uma coluna de água de 3 m, ou seja com um gradiente hidráulico de 20 a 25.

Nos ensaios de corte em compressão triaxial efectuados no *INSTITUTO DE CONSTRUÇÃO, na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto* foi determinada a permeabilidade dos provetes, na fase de consolidação dos mesmos. Os resultados são apresentados no Quadro 26.

Quadro 25 – Definição da composição da calda. Resultados dos ensaios de permeabilidade.

AMOSTRA	ENTIDADE	TEMPO DE CURA (dias)	TENSÃO DE CONSOLIDAÇÃO (kPa)	COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE (m/s)
C2-1	PORTO	28	100	$9,4 \times 10^{-7}$
C1	PORTO	7	100	$1,4 \times 10^{-7}$
		7	400	$1,1 \times 10^{-9}$
	LNEC	28	50	$1,4 \times 10^{-7}$
C2	LNEC	28	50	$1,7 \times 10^{-7}$
C4	LNEC	28	50	$1,7 \times 10^{-7}$

Quadro 26 – Definição da composição da calda. Resultados da determinação permeabilidade nos ensaios de corte em compressão triaxial.

AMOSTRA	TEMPO DE CURA (dias)	TENSÃO DE CONSOLIDAÇÃO (kPa)	GRADIENTE HIDRÁULICO	COEFICIENTE DE PERMEABIL. (m/s)
C1-1 (2ª série)	8	100	2,0	$4,3 \times 10^{-7}$
		400	10,9	$1,1 \times 10^{-9}$
C2-1 (1ª série)	20	100	2,9	$9,4 \times 10^{-7}$
C2-1 (2ª série)	91	100	6,7	$5,2 \times 10^{-8}$
		400	7,0	$2,3 \times 10^{-8}$
C2-2 (2ª série)	129	100	5,1	$1,2 \times 10^{-8}$
		400	11,0	$2,3 \times 10^{-9}$
C3-1 (1ª série)	141	100	6,7	$3,5 \times 10^{-7}$
		400	7,0	$2,6 \times 10^{-7}$
C3-1 (2ª série)	91	100	12,6	$5,6 \times 10^{-10}$
		400	28,3	$6,0 \times 10^{-10}$
C3-2 (1ª série)	?	100	6,7	$2,6 \times 10^{-7}$
		400	13,7	$2,1 \times 10^{-9}$

Conforme se constata pela análise do Quadro 25, a permeabilidade das amostras variou entre $9,4 \times 10^{-7}$ m/s e $1,1 \times 10^{-9}$ m/s, associando-se o menor valor à amostra que foi sujeita à maior tensão de consolidação, de 400 kPa. As amostras ensaiadas são caracterizadas por quantidades de bentonite semelhantes, entre 37 e 40 kg/m³, variando a quantidade de cimento e o respectivo tipo. Nas amostras ensaiadas no LNEC, apenas se fez variar a quantidade e tipo de cimento, obtendo-se uma permeabilidade da mesma ordem de grandeza.

A permeabilidade das amostras, determinada no decorrer dos ensaios de corte em compressão triaxial, variou entre $9,4 \times 10^{-7}$ m/s e $5,6 \times 10^{-10}$ m/s, sendo da mesma ordem de grandeza dos apresentados no Quadro 25. Os valores mais elevados de permeabilidade são superiores aos usualmente referidos na bibliografia da especialidade e diferem significativamente do valor considerado nos cálculos do projecto, de 1×10^{-8} m/s.

A incerteza sobre o período e condições de cura das amostras inviabiliza a análise dos parâmetros que influenciam a permeabilidade determinada nos ensaios triaxiais. De acordo com *Jefferis* (1981), a idade da calda tem um efeito substancial sobre a sua permeabilidade, em particular no que se refere a caldas fracas que consolidam significativamente. Idêntica conclusão retiraram *Opdyke e Evans* (2005) de ensaios efectuados sobre amostras de calda de escória, cimento e bentonite. *Fratalocchi e Pasqualini* (1998) atribuíram esta redução à hidratação do cimento. Outros autores, designadamente, *Philip* (2001) e *Caron* (1972) têm outra opinião, referindo nos seus artigos, que não identificaram qualquer alteração da permeabilidade da calda com o tempo.

Relativamente aos gradientes hidráulicos, a sua influência sobre a permeabilidade de caldas auto-endurecedoras foi estudada por diversos autores. Segundo *Thomas e Tallard* (data desconhecida) para cada calda há um valor de gradiente hidráulico a partir do qual não é possível fazer percolar água através da amostra. Já *Philip* (2001) concluiu que a permeabilidade de amostras indeformadas retiradas de uma parede moldada auto-endurecedora não era influenciada pelo gradiente hidráulico e *Jefferis* (1981) constatou que a aplicação de gradientes hidráulicos elevados, da ordem de 500, não se reflectia no aumento da permeabilidade com o tempo. Nos ensaios em análise no presente documento não parece ter sido seguido nenhum critério relativo ao gradiente hidráulico. Os diferentes valores empregues, dificultaram a análise dos resultados.

No que se refere à influência da tensão de consolidação a que foram sujeitas as amostras, concluiu-se que quanto maior é, menor é a permeabilidade, sendo excepção a amostra C3-1 (2ª série), com valores praticamente idênticos para tensões de 100 e 400 kPa. Nesta amostra a percolação foi feita sob gradientes hidráulicos superiores aos das restantes, observando-se que, não obstante, os valores de permeabilidade são inferiores. Mais uma vez, esta é a amostra com maior teor em água inicial. Da mesma forma, a amostra com menor teor em água inicial, C3-1 (1ª série), é aquela que apresenta a maior permeabilidade média. Note-se que o único factor que distingue estas duas amostras é, em princípio, o período de cura (desconhece-se o tipo de molde e as condições de cura).

Sobre a influência da tensão de confinamento há unanimidade de opinião. Todos os autores consultados, concluíram que a permeabilidade da calda auto-endurecedora se reduz com o aumento da tensão de confinamento. Porém, segundo *Philip* (2001) esta redução só é observada para valores superiores a 500 kPa, muito superiores à tensão média a que uma parede moldada estará sujeita. Já *Jefferis* (1981) concluiu que o aumento da tensão de 40 kPa para 200 kPa poderia traduzir-se por uma redução de 5 vezes na permeabilidade da calda.

Por último, de referir que segundo *Caron* (1972) a permeabilidade não é influenciada de forma preponderante pela natureza e dosagem de cimento e bentonite. Posteriormente, em 1998, no artigo intitulado "*Permeability over time of cement-bentonite slurry walls*", *Fratalocchi e Pasqualini* referem que o tipo e quantidade de bentonite alteram o valor da permeabilidade, enquanto que o tipo de cimento e a relação cimento-água influenciam a evolução da permeabilidade com o tempo. Quanto maior é a relação C/A, maior é a taxa de redução da permeabilidade com o tempo.

4.2. COMPOSIÇÃO DA CALDA

Na Nota Técnica NT04 intitulada "*Determinação da Composição da Calda. Análise dos Resultados dos Ensaios*" a empresa projectista COBA S.A., tendo por base os resultados dos ensaios C1-0 a C4-2, propõe para a calda a seguinte composição: 1 m³ de água, 35 kg de bentonite e 200 kg de cimento. Posteriormente, foram ensaiadas outras composições para aferição das características mecânicas e de permeabilidade da calda. Admite-se que terá sido com base nestes novos resultados que foi estabelecida nova composição para a calda, conforme consta do "Relatório Final de Obra" (pág. 6):

Calda bentonítica:

Água 1 m³

Bentonite 25 a 35 kg, a ajustar de forma a se obter uma viscosidade Marsh de 35 s

Calda auto-endurecedora:

Calda bentonítica 1 m³

Cimento 200 kg

Tendo em consideração as quantidades totais de cimento e bentonite gastas na execução da parede, admite-se que se tenha adoptado a menor relação cimento-bentonite prevista.

As principais características dos materiais empregues no fabrico da calda auto-endurecedora são apresentadas subsequentemente:

Bentonite:

Designação: *CLARSOL FTP 2S*

Origem: jazigos na Grécia e na Sardenha

Constituintes: Silicato de alumínio hidratado de estrutura folheada, activada por troca de iões.

Características:

- Aspectopó
- Granulometriafracção retida no peneiro 80 µm
- Viscosidade:
 - 1) Fann a 7,5% (água destilada)
 - Viscosidade aparente..... 50 cPo
 - Viscosidade plástica..... > 6 cPo
 - Valor de rotura (yield value) > 90 cPo
 - Resistência inicial do gel.....> 80
 - Resistência do gel para 10'> 150
 - 2) Marsh (com água canalizada)
 - Concentração para um tempo de escoamento de 40" 35 a 40 g/l
- pH.....superior a 9
- Filtrado (OCMA⁵)..... inferior a 15 ml
- Humidade.....inferior a 15%
- Exsudaçãoinferior a 4%
- Toxicidade.....nula

Aplicações: utilizado na fabricação de todos os tipos de suspensões como produto de base. Os valores de viscosidade Marsh fazem desta bentonite um produto de qualidade, empregue frequentemente na construção de paredes moldadas clássicas e plásticas.

Cimento

Designação: cimento Portland de calcário CEM II-32.5N

Fabricante: *CIMPOR*

Constituintes: entre 65 a 79% de clínquer; entre 21 a 35% de calcário e contendo sulfato de cálcio, regularizador de presa.

Características químicas:

- Sulfatos (SO₃) ≤ 3,5%
- Cloretos (Cl) ≤ 0,1%

Características físicas:

- Início de presa..... ≥ 7,5 min

⁵ Método OCMA da Especificação DFCP-4, *Drilling Fluid Materials Bentonite* publicado pela "Oil Companies Materials Association" (OCMA).

- Expansibilidade ≤ 10 mm

Características mecânicas:

- Resistência à compressão simples aos 7 dias..... 16 MPa
- Resistência à compressão simples aos 28 dias..... 32,5 MPa

Dos parâmetros especificados no projecto, apenas são conhecidas a viscosidade Marsh e a resistência à compressão simples das amostras com composição semelhante à definitiva. Destes parâmetros, verifica-se que a resistência aos 28 dias é significativamente inferior à estabelecida. Já aos 90 dias observa-se uma boa concordância. É fundamental referir que, para que fossem respeitados os referidos valores, foi sugerido no projecto uma composição mais rica em bentonite, diferente da que veio a ser adoptada.

4.3. EQUIPAMENTOS UTILIZADOS. CARACTERÍSTICAS E RENDIMENTOS

No fabrico da calda auto-endurecedora foram empregues os seguintes equipamentos, representados na Foto 2:

- 3 silos de 31 m³ para armazenamento da calda de bentonite (1);
- 1 bomba centrífuga Toyo VHJ (2A);
- 2 tanques de cerca de 60 m³ para a calda de bentonite (3);
- 2 silos de 25 m³ para armazenamento de cimento (4);
- 2 centrais de fabrico de calda auto-endurecedora (5);
- 2 depósitos com misturadores *BRC* (6);
- bomba Bauer (7).

Na escavação dos painéis foram utilizados os seguintes equipamentos, alguns dos quais se apresentam na Foto 3:

- 1 grua *Link Belt LS 280* de 75 toneladas (utilizada apenas na primeira fase dos trabalhos);
- 1 grua *Link Belt LS 180* de 55 toneladas (utilizada na segunda fase dos trabalhos);
- 1 grua *Casagrande C50* de 50 toneladas;
- 1 grua automóvel para apoio à colocação dos tubos metálicos utilizados como negativos para a injeção;
- 1 *Benne Hidráulica BH15* (utilizada apenas na primeira fase dos trabalhos);
- 1 *Benne Hidráulica BH7* (utilizada na segunda fase dos trabalhos);
- 1 *Benne Hidráulica K3000*;
- 1 escavadora giratória;
- 1 retroescavadora.

A capacidade de produção da central de fabrico foi estabelecida de forma a ser, no mínimo, igual ao rendimento previsto para os equipamentos de escavação. Inicialmente, a central tinha capacidade para fabricar 20 m³/hora de calda, valor que foi reforçado, duas semanas após o início da construção da parede, em cerca de 10 m³/hora, para garantir o fornecimento de calda às duas frentes de escavação, cuja capacidade total era de 280 m³ em 10 horas de trabalho. Posteriormente, substituiu-se o equipamento utilizado numa das frentes de escavação por outro de maior rendimento. Num período de 8 dias, e até à troca definitiva do equipamento, mantiveram-se três frentes de trabalho.

No que se refere aos rendimentos, apresentam-se no Quadro 27 e no Quadro 28 os valores relativos a cada equipamento de escavação utilizado, conforme indicados no “Relatório Final de Obra” elaborado pela empresa *TEIXEIRA DUARTE, S.A.*. No cálculo dos rendimentos não foram consideradas nem as mudanças de equipamento entre frentes de trabalho, nem as paralisações por falta de calda ou por avaria dos equipamentos.



Foto 2 – Estaleiro de fabrico da calda auto-endurecedora.



Foto 3 – Equipamento utilizado na escavação dos painéis.

Quadro 27 – Áreas totais de escavação por equipamento e respectivos rendimentos. Painéis primários.

EQUIPAMENTO	NASCENTE		SUL		POENTE		NORTE	
	ÁREA (m ²)	REND. (m ² /hora)	ÁREA (m ²)	REND. (m ² /hora)	ÁREA (m ²)	REND. (m ² /hora)	ÁREA (m ²)	REND. (m ² /hora)
Grua LS180 e benne BH7	1 177	13,1	170	8,7	-	-	-	-
Grua C50 e benne K3000	1 447	11,2	347	11,7	-	-	71	13,5
Grua LS280 e benne BH15	-	-	408	13,1	741	14,9	767	14,3

Quadro 28 – Áreas totais de escavação por equipamento e respectivos rendimentos. Painéis secundários.

EQUIPAMENTO	NASCENTE		SUL		POENTE		NORTE	
	ÁREA (m ²)	REND. (m ² /hora)	ÁREA (m ²)	REND. (m ² /hora)	ÁREA (m ²)	REND. (m ² /hora)	ÁREA (m ²)	REND. (m ² /hora)
Grua LS180 e benne BH7	-	-	-	-	-	-	-	-
Grua C50 e benne K3000	1062	17,7	-	-	-	-	462	23,1
Grua LS280 e benne BH15	450	15,9	509	16,5	333	17,3	-	-

Na escavação dos painéis primários, o rendimento variou entre 8,7 m²/hora e 14,9 m²/hora, tendo os maiores valores sido alcançados pelo conjunto formado pela grua *LS280* e pela *benne BH15*.

Da análise do Quadro 27 e do Quadro 28 conclui-se que não se registaram variações muito significativas do rendimento dos equipamentos, de alinhamento para alinhamento. A exceção verifica-se no Alinhamento Sul, onde o tempo dispendido na escavação de 1 m² de painel foi superior. Ao contrário do que ocorreu a Nascente e a Norte, neste alinhamento não se registaram situações anómalas que implicassem a posterior reescavação dos painéis. Por outro lado, foi neste alinhamento que se construíram os painéis de menor altura, sendo de assinalar que, em termos de espessura da camada de cascalheiras atravessada ou ainda no que se refere à profundidade de penetração na formação margo-calcária, este não era o alinhamento mais desfavorável. Porém, numa análise atenta ao perfil geológico-geotécnico, constata-se que numa parte significativa deste trecho da parede moldada, as formações ocorrentes são caracterizadas por resistências elevadas, logo a partir dos 2,5 m de profundidade, facto que o distingue dos alinhamentos Norte e Nascente. Para além dos condicionamentos geológico-geotécnicos, o menor rendimento é também justificado pela menor potência do equipamento utilizado.

Outro facto interessante consiste no maior rendimento obtido na escavação dos painéis secundários relativamente aos primários que, nos alinhamentos Norte e Nascente, atinge um acréscimo de 70 e de 60%, respectivamente. Nos alinhamentos Poente e Sul, o aumento do rendimento não ultrapassa 26%. Analisando os perfis geológico-geotécnicos, assim como as partes diárias da escavação dos painéis, nas quais é feita uma descrição visual dos materiais escavados, constata-se que nos alinhamentos Norte e Nascente ocorre uma camada espessa de lodos ou de areias finas argilosas com valores reduzidos de N_{SPT} . Ao contrário, nos alinhamentos Poente e Sul, as formações ocorrentes exibem resistências superiores, na quase totalidade da altura dos painéis. Neste contexto, admite-se como provável que a escavação dos painéis primários tenha conduzido à descompressão e amolecimento do terreno, tanto maior quanto menor era a sua resistência.

Outra conclusão que se pode retirar da comparação dos quadros de rendimentos, consiste na reduzida oposição à entrada do utensílio de escavação por parte da calda constituinte dos painéis primários, facto que se explica pela sua reduzida resistência, conforme se concluirá mais adiante, no Capítulo 5.

4.4. DESCRIÇÃO DOS PROCEDIMENTOS DE FABRICO DA CALDA

A suspensão bentonítica foi fabricada com o auxílio de uma bomba centrifugadora, designada por Toyo VHJ (2A). Trata-se de um dispositivo que possui um sistema especial para aspirar a bentonite em pó e misturar com a água. Concluída a mistura, uma outra bomba (2) fazia circular a suspensão entre os silos (1) e o depósito (3), em

circuito fechado. Desta forma, sempre que era necessária suspensão bentonítica para o fabrico da calda auto-endurecedora, esta era enviada graviticamente.

É de assinalar que nos documentos fornecidos não é mencionado o tempo de hidratação a que foi sujeita suspensão bentonítica.

Na etapa seguinte, procedia-se à mistura da suspensão bentonítica com o cimento. Esta mistura era realizada na central (5), que se encontrava equipada com um sistema electrónico de comando e pesagem. Para o efeito era aberta a válvula entre a central e os silos que continham a suspensão bentonítica, e só após finalizado o enchimento até ao valor pré-estabelecido, se fazia a entrada do cimento proveniente do silo (4) através de um sem-fim. A mistura do cimento com a suspensão bentonítica era então realizada com uma bomba (8). Esta mesma bomba seria responsável por enviar a calda fabricada para o depósito (6), dotado de um misturador de eixo horizontal (BRC), que mantinha a calda em agitação até ser necessária para a execução da parede.

À saída deste depósito, uma bomba (7) seria responsável por enviar a calda para a frente de trabalho, com uma pressão correspondente a uma carga hidráulica de 5 m. Desta forma, assegurava-se o fornecimento de calda apenas por simples abertura de uma válvula na conduta.

Na Fig. 22 apresenta-se o esquema de fabrico da calda descrito.

4.5. CARACTERÍSTICAS DOS PAINÉIS

4.5.1. Geometria e sequência construtiva dos painéis

No Des. 6 apresenta-se a localização em planta dos painéis, cujas principais características, designadamente, as datas de início e de fim de construção, a geometria e a sequência construtiva, são apresentadas no Quadro 29 ao Quadro 32. A construção foi iniciada a 12 de Dezembro de 2001, no Alinhamento Nascente (painel *PE6*) e concluída a 27 de Fevereiro de 2002 no mesmo alinhamento (painel *PE1A*).

Na Foto 4 apresenta-se a escavação de um painel no Alinhamento Nascente, em Janeiro de 2002. É visível a penetração da “benne” no terreno, com remoção de solo e o preenchimento constante com calda através de uma tubagem munida de uma válvula.

Na construção dos painéis foi respeitada a sequência definida na fase de projecto, isto é, escavação dos painéis primários com uma largura de 7,0 m, sendo de 2,0 m o trecho não escavado entre dois trechos primários, que daria posteriormente lugar a um painel secundário, de 3,0 m de largura. Garantiu-se, portanto, uma penetração nos painéis primários de 0,5 m, através da escavação dos mesmos.

A profundidade atingida pelos painéis variou entre 16,5 m e 24,5 m, no Alinhamento Nascente, entre 16 e 18,5 m a Sul, entre 16 e 20,8 m, a Poente, e entre 19,5 e 24,5 m, a Norte. O volume total de escavação foi de 6 862 m³, dos quais, 750 m³ corresponderam à sobreposição de painéis secundários e primários e 508 m³ à repetição de painéis.

De referir que sempre que não foi possível realizar os painéis num prazo máximo de 24 horas, a largura do painel foi reduzida para 3 m, equivalente a um único passe do equipamento de escavação (*benne*). O período necessário à escavação nunca deveria ultrapassar as 24 horas. As situações em que esta premissa não foi cumprida corresponderam a interrupções para fim-de-semana ou a avarias nos equipamentos.

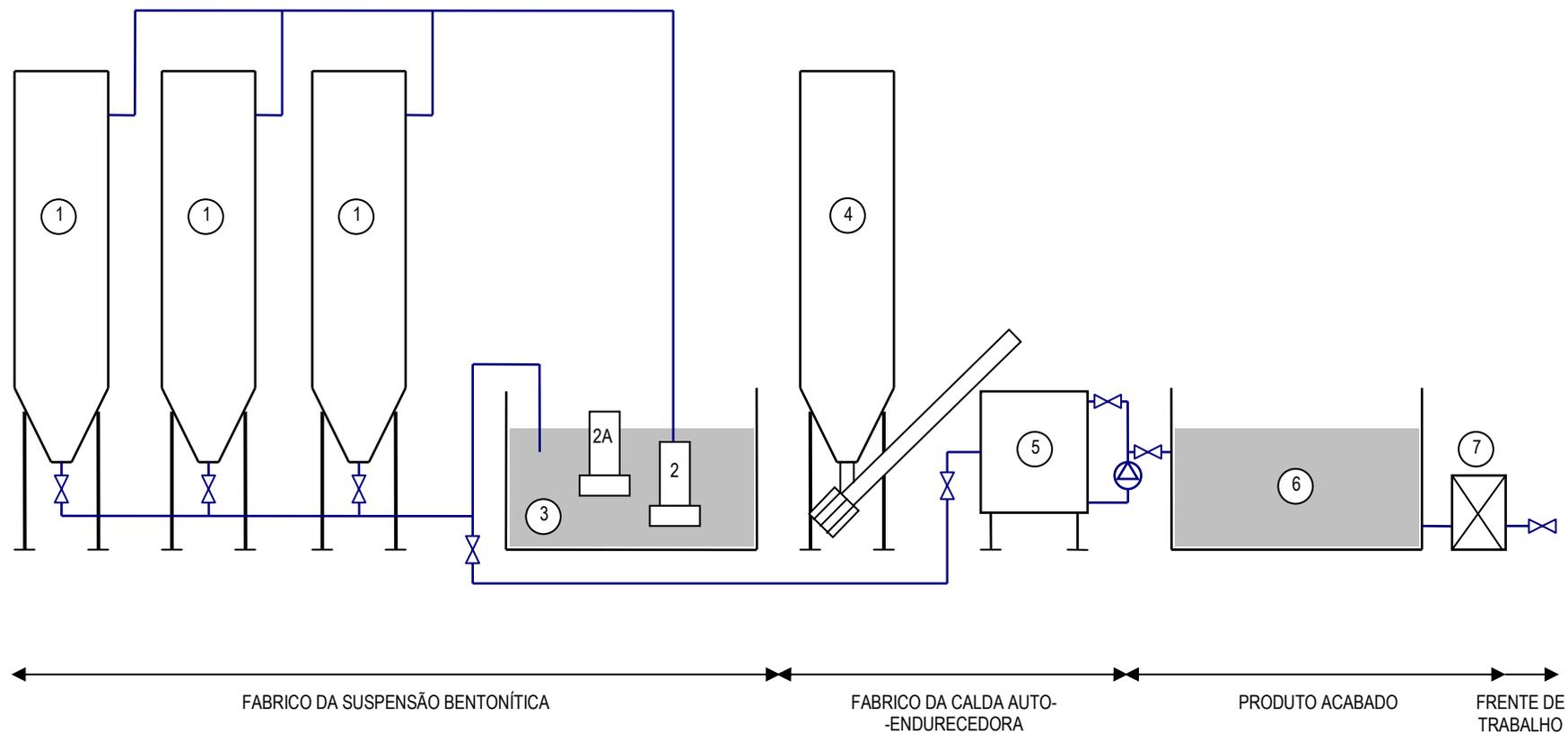


Fig. 22 – Esquema de fabrico da calda auto-endurecedora (adaptado de um documento fornecido pela *TEIXEIRA DUARTE S.A.*).

Quadro 29 – Características dos painéis do Alinhamento Nascente.

DESIGNAÇÃO	ORDEM	DATAS DE EXECUÇÃO		COTA DO TOPO (m)	LARGURA (m)		COMPRIM. (m)
		INÍCIO	FIM		INICIAL	FINAL	
PE1	S	2002-02-20	2002-02-20	18,50	3,00	3,00	24,50
PE1A	S	2002-02-27	2002-02-27	18,50	3,00	3,00	24,80
PE2	P	2002-01-25	2002-01-25	18,50	3,00	2,25	23,50
PE3	S	2002-02-20	2002-02-20	?	3,00	3,00	23,50
PE4A	P	2002-01-28	2002-01-28	18,50	3,00	2,50	22,20
PE4B	S	2002-02-13	2002-02-13	18,50	3,00	3,00	22,80
PE4	P	2001-12-21	2001-21-12	18,50	3,00	2,25	22,30
PE5	S	2002-02-09	2002-02-09	18,50	3,00	3,00	22,30
PE6	P	2001-12-12	2001-12-13	18,50	7,00	6,00	21,00
PE7	S	2002-02-08	2002-02-08	18,50	3,00	3,00	21,40
PE8	P	2001-12-13	2001-12-14	18,50	7,00	6,00	21/21,3/21,4
PE9	S	2002-02-08	2002-02-08	18,50	3,00	3,00	21,80
PE10	P	2001-12-17	2001-12-18	18,50	7,00	6,00	21,7/21,8/21,8
PE11	S	2002-02-07	2002-02-07	18,50	3,00	3,00	23,60
PE12	P	2001-12-19	2001-12-20	18,50	7,00	6,00	23,3/23,6/23,6
PE13	S	2002-02-06	2002-02-06	18,50	3,00	3,00	24,40
PE14	P	2001-12-26	2001-12-27	18,50	7,00	6,00	24,40
PE15	S	2002-02-05	2002-02-05	18,50	3,00	3,00	24,50
PE16	P	2001-12-28	2001-12-29	18,50	7,00	6,00	24,30
PE16A	P	2002-01-18	2002-01-18	18,50	3,00	3,00	24,00
PE17	S	2002-02-21	2002-02-21	18,50	3,00	3,00	24,50
PE18	P	2001-12-13	2001-12-13	18,50	3,00	2,00	23,50
PE19	S	2002-01-31	2002-01-31	18,50	3,00	3,00	24,50
PE20	P	2001-12-19	2001-12-20	18,50	7,00	3,00	24,00
PE20A	P	2001-02-02	2001-02-02	18,50	3,00	3,00	24,00
PE21	S	2002-02-04	2002-02-04	18,50	3,00	3,00	24,50
PE22	P	2001-12-21	2001-12-21	18,50	3,00	2,00	24,00
PE23	S	2002-02-22	2002-02-22	18,50	3,00	3,00	21,60
PE24	P	2001-12-26	2001-12-28	18,50	7,00	6,00	24,00
PE25	S	2002-02-05	2002-02-05	18,50	3,00	3,00	24,00
PE26	P			Parte diária em falta			
PE27	S	2002-02-25	2002-02-25	18,50	3,00	3,00	22,10
PE28	P	2002-01-30	2002-01-30	18,50	3,00	2,00	21,50
PE29	S	2002-02-21	2002-02-21	18,50	3,00	3,00	21,50
PE30	P	2002-01-30	2002-01-30	18,50	3,00	2,00	21,50
PE31	S	2002-02-20	2002-02-20	18,50	3,00	3,00	19,50
PE32	P	2001-12-29	2001-12-29	18,50	3,00	2,00	19,30
PE33	S	2002-02-19	2002-02-19	18,50	3,00	3,00	19,30
PE34	P			Parte diária em falta			
PE35	S	2002-02-20	2002-02-20	18,50	3,00	3,00	19,00
PE36	P			Parte diária em falta			
PE37	S	2002-02-19	2002-02-19	18,50	3,00	3,00	18,80
PE38	P			Parte diária em falta			
PE39	S	2002-02-19	2002-02-19	18,50	3,00	3,00	18,20
PE40	P	2002-01-09	2002-01-10	18,50	7,00	6,00	16,50
PE41	S	2002-02-18	2002-02-18	?	3,00	3,00	16,70
PE42	P	2002-01-11	2002-01-11	18,50	3,00	2,00	16,50
PE43	S	2002-02-14	2002-02-15	18,50	5,70	6,70	17,00
PSE	P	2002-01-16	2002-01-17	18,50	7,00	6,63	17,00

P – painel primário; S – painel secundário; ? – Informação não disponibilizada.

Os painéis assinalados a vermelho foram reescavados, na totalidade ou apenas parcialmente. A colocação de um A na designação do painel pretende identificar as suas características finais após reescavação e preenchimento com calda.

Quadro 30 – Características dos painéis do Alinhamento Sul.

DESIGNAÇÃO	ORDEM	DATAS DE EXECUÇÃO		COTA DO TOPO (m)	LARGURA (m)		COMPRIM. (m)
		INÍCIO	FIM		INICIAL	FINAL	
PS1	S	2002-02-07	2002-02-07	18,50	3,00	3,00	17,00
PS2	P	2002-01-21	2002-01-21	18,50	7,00	6,00	17,00
PS3	S	2002-02-07	2002-02-07	18,50	3,00	3,00	17,00
PS4	P	2002-01-14	2002-01-15	18,50	7,00	6,00	17,00
PS5	S	2002-02-05	2002-02-05	18,50	3,00	3,00	17,30
PS6	P	2002-01-09	2002-01-10	18,50	7,00	6,00	17,00
PS7	S	2002-02-05	2002-02-05	18,50	3,00	3,00	17,30
PS8	P	2002-01-11	2002-01-11	18,50	3,00	2,00	17,00
PS9	S	2002-02-08	2002-02-08	18,50	3,00	3,00	17,00
PS10	P	2002-01-18	2002-01-18	18,50	3,00	2,00	16,00
PS11	S	2002-02-02	2002-02-08	18,50	3,00	3,00	16,70
PS12	P	2002-01-21	2002-01-22	18,50	7,00	6,00	16,00
PS13	S	2002-02-09	2002-02-09	?	3,00	3,00	16,00
PS14	P	2002-01-22	2002-01-23	18,50	7,00	6,00	16,50
PS15	S	2002-02-13	2002-02-13	18,50	3,00	3,00	16,50
PS16	P	2002-01-24	2002-01-24	18,50	7,00	6,00	16,5/17,0
PS17	S	2002-02-18	2002-02-18	18,50	3,00	3,00	18,20
PS18	P	2002-02-01	2002-02-01	18,50	3,00	2,37	18,50
PS19	S	2002-02-21	2002-02-21	18,50	3,00	3,00	16,50

P – painel primário; S – painel secundário; ? – Informação não disponibilizada.

Quadro 31 – Características dos painéis do Alinhamento Norte.

DESIGNAÇÃO	ORDEM	DATAS DE EXECUÇÃO		COTA DO TOPO (m)	LARGURA (m)		COMPRIM. (m)
		INÍCIO	FIM		INICIAL	FINAL	
PNE	P	2002-01-23	2002-01-24	18,50	7,80	3,03	23,0/24,5
PN2	S	2002-02-19	2002-02-19	?	3,00	3,00	24,50
PN3	P	2002-01-02	2002-01-02	18,50	3,00	2,00	24,00
PN3A	P	2002-01-03	2002-01-03	18,50	3,00	2,00	24,00
PN4	S	2002-02-19	2002-02-19	18,50	3,00	3,00	24,00
PN5	P	?	?	?	?	2,00	22,50
PN6	S	2002-02-18	2002-02-18	18,50	3,00	3,00	22,00
PN7	P	2002-01-08	2002-01-08	18,50	7,00	6,00	21,00
PN8	S	2002-02-18	2002-02-18	18,50	3,00	3,00	21,80
PN8A	S	2002-02-26	2002-02-26	18,50	3,00	3,00	22,00
PN9	P	2002-01-09	2002-01-09	18,50	7,00	6,00	20,50
PN10	S	2002-02-15	2002-02-15	18,50	3,00	3,00	20,80
PN11	P	2002-01-10	2002-01-11	18,80	7,00	5,50	20,00
PN12	S	2002-02-14	2002-02-14	18,50	3,00	3,00	20,20
PN13	P	2002-01-14	2002-01-15	19,00	7,00	6,00	19,5/20,2
PN14	S	2002-02-13	2002-02-13	18,50	3,00	3,00	20,50
PN15	P	2002-01-16	2002-01-16	19,00	3,00	2,32	20,00

P – painel primário; S – painel secundário; ? – Informação não disponibilizada.

Os painéis assinalados a vermelho foram reescavados, na totalidade ou apenas parcialmente. A colocação de um A na designação do painel repetido pretende identificar as suas características finais após reescavação.

Quadro 32 – Características dos painéis do Alinhamento Ponte.

DESIGNAÇÃO	ORDEM	DATAS DE EXECUÇÃO		COTA DO TOPO (m)	LARGURA (m)		COMPRIM. (m)
		INÍCIO	FIM		INICIAL	FINAL	
PW1	P	2002-02-04	2002-02-04	18,50	3,00	1,69	16,00
PW2	S	2002-02-22	2002-02-22	18,50	3,00	3,00	17,00
PW3	P	2002-01-22	2002-01-22	?	7,00	6,00	17,50
PW4	S	2002-02-13	2002-02-13	18,50	3,00	3,00	18,00
PW5	P	2002-01-25	2002-01-25	18,50	3,00	2,00	18,00
PW6	S	2002-02-14	2002-02-14	18,50	3,00	3,00	18,00
PW7	P	2002-01-28	2002-01-28	18,50	7,00	6,00	18,00
PW8	S	2002-02-18	2002-02-18	18,50	3,00	3,00	18,00
PW9	P	2002-01-30	2002-01-30	18,50	7,00	6,00	18,50
PW10	S	2002-02-25	2002-02-25	18,50	3,00	3,00	19,50
PW11	P	2002-01-31	2002-01-31	18,50	6,50	5,50	19,3/19,5
PW12	S	2002-02-25	2002-02-25	18,50	3,00	3,00	20,50
PW13	P	2002-02-06	2002-02-06	18,50	6,50	6,00	20,8/20,5

P – painel primário; S – painel secundário; ? – Informação não disponibilizada.



Foto 4 – Escavação de um painel de parede moldada auto-endurecedora no Alinhamento Nascente da cortina.

O período mínimo entre a escavação dos painéis primários e a execução do painel secundário adjacente foi estabelecido em 15 dias, período que foi efectivamente respeitado conforme se pode concluir através da análise do Quadro 29 ao Quadro 32. Por outro lado, condicionou-se o início da escavação dos painéis secundários à análise dos resultados dos ensaios de compressão simples a efectuar sobre amostras de calda plástica recolhidas durante a construção dos painéis primários adjacentes. Com a imposição destas restrições à sequência construtiva, pretendia-se que o aumento da resistência da calda dos painéis primários, em consequência do processo de cura, fosse suficiente para garantir a inexistência de colapso da vala durante a escavação dos painéis secundários, já que se reduzia o comprimento de parede suportado exclusivamente pela pressão do fluido.

A sequência de construção dos painéis primários foi ainda condicionada pelos seguintes factores:

- i) no trecho central do Alinhamento Nascente e sobre o canto Sudeste, a execução dos painéis foi iniciada após o desvio dos cabos eléctricos aéreos que impediam a circulação do equipamento nesta zona;
- ii) na extremidade Sul do Alinhamento Nascente, foi detectada uma fossa séptica, cuja remoção impediu, temporariamente, a realização de um trecho de 10 m da parede auto-endurecedora;
- iii) no Alinhamento Norte, a geometria da parede moldada só foi definida após o início dos trabalhos, situação que adiou por algum tempo a execução dos painéis naquele local;
- iv) no Alinhamento Nascente procedeu-se ao desvio das condutas de restituição do caudal captado nos poços; para o efeito foi necessário construir um painel primário sobre o qual se colocaram as referidas condutas.

4.5.2. Anomalias ocorridas durante a escavação e preenchimento da vala com calda

No Quadro 33 faz-se um resumo das situações anómalas ocorridas durante a construção dos painéis.

A perda de verticalidade dos negativos (Foto 5) de alguns painéis do Alinhamento Norte, em simultâneo com a ocorrência de perda significativa de calda, foram atribuídas à bombagem em curso que produzia um desnível da superfície freática de 5 m entre o eixo de implantação da cortina e o claustro. Para resolução deste problema, as bombas 1 e 2, localizadas a 35 m e a 18 m da parede moldada, foram desligadas durante a construção dos painéis primários do Alinhamento Norte. De igual forma, durante a execução dos painéis secundários, procedeu-se à suspensão da bombagem a partir das bombas 1 e 2 e das bombas 9 e 13, localizadas a 35 e 45 m do Alinhamento Nascente.

De acordo com as fichas de informação detalhada relativas à execução dos painéis, o sistema de bombagem foi mantido em funcionamento, entre 13 de Dezembro de 2001, data do início da construção da parede moldada, e 1 de Fevereiro de 2002. A suspensão parcial da bombagem, a 4 de Fevereiro, terá conduzido a uma subida do nível de água, registando-se valores de 1,2 m acima do claustro até 6 de Fevereiro, descendo progressivamente para 1,0 m e estabilizando neste nível entre 7 e 10 de Fevereiro. A 13 de Fevereiro, o nível de água sofreu um novo rebaixamento, para 0,8 m acima do claustro, mantendo-se nesse nível até 18 de Fevereiro, data em que se registou uma subida progressiva para 1,2 m, e para 1,3 m a 19 de Fevereiro, estabilizando a 1,5 m, entre 20 e 26 de Fevereiro. A 27 de Fevereiro, data de conclusão da cortina, o nível de água encontrava-se já a 2,3 m acima do claustro. É de referir que após a conclusão da parede moldada foi suspensa a bombagem por um período de 2 meses, tendo o nível de água subido até à cota 17,6 m no interior do claustro. Esta suspensão teve como objectivo melhorar as condições de cura da calda.

Na Foto 7 apresenta-se uma perspectiva da zona do claustro durante a suspensão da bombagem, encontrando-se o nível de água à cota 16,6 m.

Para além das anomalias identificadas no Quadro 33, encontraram-se referências à ocorrência sistemática de fendilhação por retracção (Foto 8) nas semanas seguintes à construção dos painéis. Este problema foi resolvido através da adição de calda, aos painéis já executados, durante um período de cerca de duas semanas. Desconhece-se a quantidade de calda gasta nesta terceira fase de “retestamento”.

Quadro 33 – Descrição das situações anómalas detectadas durante a execução dos painéis.

PAINEL	SINGULARIDADE / ANOMALIA	SOLUÇÃO
PE1	Perda de verticalidade do negativo após a sua introdução no interior do painel.	Reescavação do painel, com substituição da calda e posterior introdução do negativo.
PE3	Perda de verticalidade do negativo após a sua introdução no interior do painel.	Reescavação do painel, com substituição da calda e posterior introdução do negativo.
PE5	Perda de verticalidade do negativo após a sua introdução no interior do painel.	Reescavação do painel, com substituição da calda e posterior introdução do negativo.
PE6	O terreno de ambos os lados do painel abateu cerca de 0,5 m, ao longo do seu desenvolvimento. Na zona central do painel, o muro guia ficou totalmente à vista (Foto 6). Esta situação foi atribuída à falta de reatestamento de calda, durante a noite.	Desconhecem-se as medidas adoptadas na sequência deste incidente.
PE16	Perda de verticalidade do negativo após a sua introdução no interior do painel.	Reescavação do painel, com substituição da calda e posterior introdução do negativo.
PE20	Durante a escavação foi encontrada uma antiga captação de água.	Removida, por arranque, durante a escavação.
	Impossibilidade de se introduzir o negativo para o tratamento de impermeabilização, no interior do painel.	Reescavação parcial do painel para remoção de parte da antiga captação de água que não havia sido totalmente removida.
PE23	A base do painel ficou localizada 2,5 m acima da base dos painéis adjacentes (PE22 e PE24).	Reescavação do painel e aumento da profundidade de encastramento do mesmo, uniformizando a cota da base, relativamente aos painéis adjacentes.
PE24	Durante a escavação, entre os 3,0 e os 8,5 m de profundidade, foi interceptado um antigo muro em alvenaria de pedra.	O muro foi removido durante a escavação.
PE35	Perda de verticalidade do negativo após a sua introdução no interior do painel.	Reescavação do painel, com substituição da calda e posterior introdução do negativo.
PNE	No vértice deste painel ocorreu o colapso do terreno (cratera) até H do muro-guia, situação que foi atribuída a uma plataforma deficiente. O terreno foi colapsando durante a escavação.	Desconhece-se qual foi a intervenção levada a cabo para resolução deste problema.
PN2	Perda de verticalidade do negativo após a sua introdução no interior do painel.	Reescavação do painel, com substituição da calda e posterior introdução do negativo.
PN3	Perda de verticalidade do negativo após a sua introdução no interior do painel, observando-se um desvio do seu topo para o interior do painel de 0,25 m.	Reescavação do painel, com substituição da calda auto-endurecedora e posterior introdução do negativo.
PN5	Perda de verticalidade do negativo após a sua introdução no interior do painel.	Reescavação do painel, com substituição da calda e posterior introdução do negativo.
PN8	Perda de verticalidade do negativo após a sua introdução no interior do painel.	Reescavação do painel, com substituição da calda e posterior introdução do negativo.
PN13	Durante a escavação, entre os 3,5 e os 8,0 m de profundidade, foi interceptado um antigo muro em alvenaria de pedra.	O muro foi removido durante a escavação.
PN15 (*)	Durante a escavação, entre os 5,0 e os 8,0 m de profundidade, foi interceptado um antigo muro em alvenaria de pedra.	Supõe-se que terá sido removido durante a escavação.

(*) Problema identificado na parte diária de execução da parede mas em contradição com o relatório elaborado pela *TEIXEIRA DUARTE S.A.*, onde a referência ao muro se restringe ao painel *PN13*.



Foto 5 – Perda de verticalidade de um negativo instalado num painel do Alinhamento Nascente (PE35), a 26 de Fevereiro de 2002.



Foto 6 – Colapso do terreno confinante com o painel PE6, após a sua escavação (18 de Dezembro de 2001).

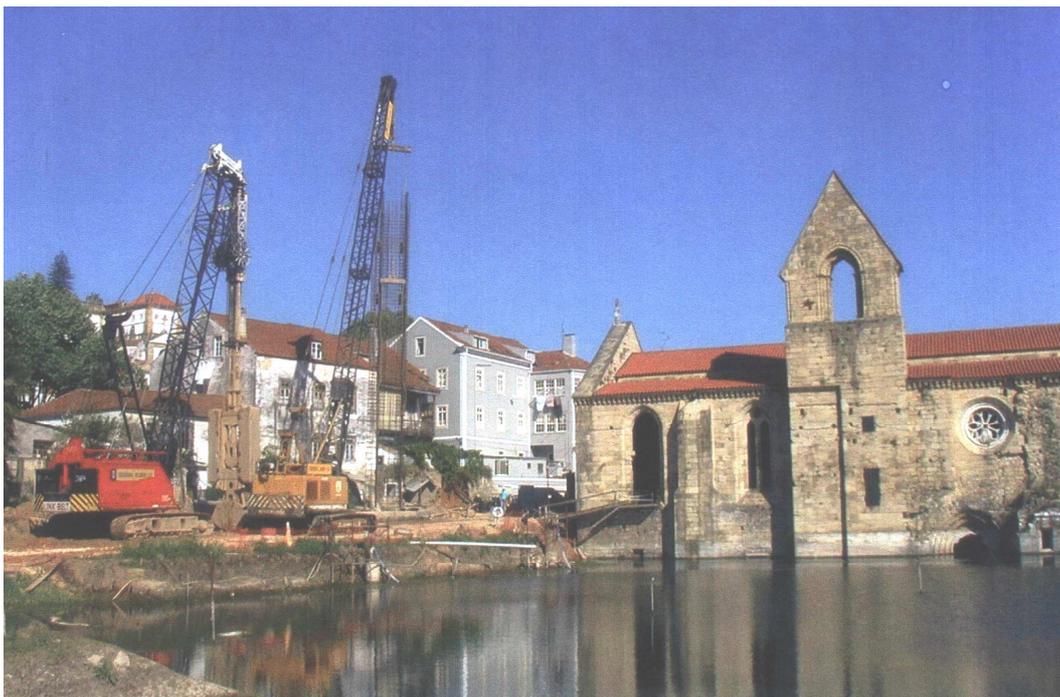


Foto 7 – Perspectiva da submersão do claustro após suspensão da bombagem (23 de Abril de 2002).



Foto 8 – Fendilhação por retracção de um painel de parede moldada auto-endurecedora. É também visível o rebaixamento da calda no interior do painel.

4.5.3. Consumo de calda e exsudação

De acordo com o “Relatório Final de Obra”, elaborado pela empresa *TEIXEIRA DUARTE S.A.*, foram gastas 323,05 toneladas de bentonite e 1 687,42 toneladas de cimento na execução da parede moldada auto-endurecedora do Mosteiro de Santa Clara-a-Velha. A relação entre cimento e bentonite gastos é um pouco superior à estabelecida, 1:5,22, ou seja, para cada 200 kg de cimento foram adicionados 38 kg de bentonite.

Em todos os painéis foi observado um rebaixamento gradual do nível de calda da ordem de 2 a 3 m nas primeiras 5 a 6 horas. Para que não ocorresse o desmoronamento das paredes da vala, na sua zona mais superficial, o Empreiteiro procedeu à adição de calda em duas fases distintas. Na primeira fase, com uma duração de 5 a 6 horas, os painéis foram reatestados em intervalos de 1 a 2 horas. Na segunda fase, correspondente ao período seguinte de 24 a 48 horas, a adição de calda foi efectuada em intervalos de 3 a 6 horas. Em média, cerca de 1/3 do volume total adicionado foi aplicado na primeira fase e os restantes 2/3 no período subsequente. Em todos os painéis foi observado o fenómeno de exsudação que se traduziu pelo aparecimento de água à superfície numa altura da ordem de 0,5 a 1,5 m.

No Anexo apresentam-se os valores de assentamento da calda medidos após a execução dos painéis, a altura de água à superfície da calda e ainda os volumes de calda adicionados, dados constantes das “partes diárias” de execução dos painéis. A evolução destas grandezas com o tempo é também apresentada em Anexo.

No Quadro 34 ao Quadro 37 faz-se a síntese dos dados apresentados em Anexo, designadamente, a percentagem de perda de calda e de exsudação para cada passe de escavação do painel. O valor real do consumo de calda é desconhecido, facto que decorre do próprio processo de execução da parede moldada, em que parte da calda introduzida na vala é removida durante a escavação, misturada com o solo escavado. Assim, as percentagens indicadas têm como referência o volume teórico do painel. É também de assinalar que existem lacunas no registo do rebaixamento e do consumo da calda e no registo da altura de água. Nalguns casos não é referida a largura de cada passe, o que inviabilizou a determinação do seu volume teórico.

No que se refere ao fenómeno de perda de calda, admite-se que o mesmo resulte de duas situações distintas. Nos casos em que os terrenos adjacentes à vala apresentam permeabilidade significativa pode ocorrer alguma penetração da calda, preenchendo os vazios do mesmo. Em terrenos menos permeáveis (mas ainda passíveis de injeção), poderá ocorrer perda de água por filtração em resultado da diferença de carga entre a calda e o nível freático exterior à vala (fenómeno também designado por exsudação sobre pressão).

Analisando os dados dos quadros, constata-se que, em termos médios, foi no Alinhamento Poente que se registou a maior perda de calda. Os valores variaram entre 19% e 32,9%, sendo em média de 22,1%. Ao longo deste alinhamento ocorrem areões com seixos, areias grosseiras, mais ou menos argilosas, e cascalheiras, numa espessura total variável entre 13 e 19,5 m. As amostras recolhidas aos 4 e 6 m de profundidade são caracterizadas por percentagens de finos reduzidas (de 8,9 e 12,5%) e uma dimensão média (D_{50}) de 4 mm. Tratam-se, portanto, de formações permeáveis susceptíveis ao fenómeno de filtração e, no limite, à penetração de calda nos seus vazios.

O segundo valor mais elevado de perda de calda ocorre no Alinhamento Sul, sendo, em média, de 20,3%, ligeiramente abaixo do registado no Alinhamento Poente. O valor mínimo foi de 8,8% (passe 1 do painel *PS6*) e o máximo de 27,6%. Neste alinhamento, os painéis atravessam, sobretudo, areias mais ou menos argilosas com seixos, areias grosseiras, areões e cascalheiras até profundidades de 11,5 a 15,5 m, em consonância com o descrito nas partes diárias de execução da parede moldada. As amostras recolhidas entre os 4 e os 8 m de profundidade são caracterizadas por percentagens de finos de 12%, sendo a dimensão média das partículas (D_{50}) de 3 mm. Conclui-se assim que também neste caso terá ocorrido perda de água por filtração e, eventualmente, alguma penetração da calda no terreno envolvente.

Quadro 34 – Percentagens de volume de calda perdida e de exsudação nos painéis do Alinhamento Nascente.

PAINEL	PASSE	VOLUME TEÓRICO (m ³)	% DE VOLUME DE CALDA PERDIDA	% DE VOLUME DE EXSUDAÇÃO
PE1	1	58,80	15,5	4,9
PE1A	1	59,52	15,3	4,8
PE2	1	56,40	16,6	4,7
PE3	1	56,40	15,7	5,5
PE4A	1	53,28	11,3	2,2
PE4B	1	54,72	16,2	5,7
PE4	1	53,52	13,4	9,0
PE5	1	53,52	14,8	7,7
PE6	1	50,40	4,8	9,5
	2	50,40	-	-
	3	117,60	4,8	4,8
PE7	1	51,36	-	-
PE8	3	50,40	-	-
PE9	1	52,32	16,5	6,4
PE10	1	52,08	-	-
	2	52,32	-	-
	3	17,44	-	-
PE11	1	56,64	15,2	5,9
PE12	1	55,92	-	-
	2	56,64	-	-
	3	18,88	-	-
PE13	1	58,56	15,2	5,3
PE14	1	58,56	-	-
	2	58,56	-	-
	3	19,52	-	-
PE15	1	58,80	9,4	2,9
PE16	1	58,32	-	-
	2	58,32	-	-
	3	19,44	-	-
PE16A	1	57,60	13,1	3,3
PE17	1	58,80	15,5	4,9
PE18	1	56,40	-	-
PE19	1	58,80	12,2	4,1
PE20	1	57,60	-	-
	2	57,60	-	-
	3	19,20	-	-
PE20A	1	57,60	12,5	4,2
PE21	1	58,80	13,3	3,3
PE22	1	57,60	12,5	8,3
PE23	1	51,84	25,5	6,9
PE24	1	57,60	-	-
	2	57,60	-	-
	3	19,20	-	-
PE25	1	57,60	13,3	3,3
PE26	Parte diária em falta.			
PE27	1	53,04	16,7	5,9
PE28	1	51,60	17,2	4,2
PE29	1	51,60	17,7	5,6
PE30	1	51,60	22,3	5,6
PE31	1	46,80	19,5	6,2
PE32	1	46,32	7,8	5,2
PE33	1	46,32	19,7	6,2
PE34	Parte diária em falta.			

Quadro 34 – Percentagens de volume de calda perdida e de exsudação nos painéis do Alinhamento Nascente (cont.)

PAINEL	PASSE	VOLUME TEÓRICO (m ³)	% DE VOLUME DE CALDA PERDIDA	% DE VOLUME DE EXSUDAÇÃO
PE35	1	45,60	19,5	6,8
PE36	Parte diária em falta			
PE37	1	45,12	20,2	6,4
PE38	Parte diária em falta			
PE39	1	43,68	20,3	7,1
PE40	1	39,60	12,1	3,0
	2	39,60	-	-
	3	92,40	15,2	3,0
PE41	1	40,08	26,3	9,6
PE42	1	39,60	-	-
PE43	1	?	-	-
PSE	1	40,80	14,7	2,9
	2	40,80	-	-
	3	95,20	14,7	2,9

Quadro 35 – Percentagens de volume de calda perdida e de exsudação nos painéis do Alinhamento Sul.

PAINEL	PASSE	VOLUME TEÓRICO (m ³)	% DE VOLUME DE CALDA PERDIDA	% DE VOLUME DE EXSUDAÇÃO
PS1	1	40,80	22,4	7,1
PS2	1	40,80	-	-
	2	13,60	-	-
	3	40,80	-	-
PS3	1	40,80	27,6	7,6
PS4	1	40,80	-	-
	2	40,80	-	-
	3	13,60	-	-
PS5	1	41,52	21,4	7,5
PS6	1	40,80	8,8	2,9
	2	40,80	-	-
	3	95,20	17,6	3,7
PS7	1	41,52	22,0	6,9
PS8	1	40,80	-	-
PS9	1	40,80	20,6	8,8
PS10	1	38,40	26,2	6,9
PS11	1	40,08	15,6	8,4
PS12	1	38,40	15,6	3,1
	2	38,40	-	-
	3	89,60	-	-
PS13	1	38,40	20,6	10,6
PS14	1	39,60	-	-
	2	39,60	-	-
	3	92,40	-	-
PS15	1	39,60	22,4	7,9
PS16	1	39,60	-	-
	2	40,80	-	-
	3	?	-	-
PS17	1	43,68	20,3	7,1
PS18	1	44,40	20,5	6,5
PS19	1	39,60	22,4	7,9

Quadro 36 – Percentagens de volume de calda perdida e de exsudação nos painéis do Alinhamento. Poente.

PAINEL	PASSE	VOLUME TEÓRICO (m ³)	% DE VOLUME DE CALDA PERDIDA	% DE VOLUME DE EXSUDAÇÃO
PW1	1	38,40	20,0	5,0
PW2	1	40,80	32,9	8,2
PW3	1	42,00	-	-
	2	42,00	-	-
	3	98,00	-	-
PW4	1	43,20	21,1	6,7
PW5	1	43,20	22,8	6,7
PW6	1	43,20	21,1	6,7
PW7	1	43,20	-	-
	2	43,20	-	-
	3	100,80	-	-
PW8	1	43,20	20,6	7,2
PW9	1	44,40	-	-
	2	44,40	-	-
	3	103,60	-	-
PW10	1	46,80	19,5	6,2
PW11	Parte diária em falta			
PW12	1	49,20	19,0	6,3
PW13	Parte diária em falta			

Quadro 37 – Percentagens de volume de calda perdida e de exsudação nos painéis do Alinhamento. Norte.

PAINEL	PASSE	VOLUME TEÓRICO (m ³)	% DE VOLUME DE CALDA PERDIDA	% DE VOLUME DE EXSUDAÇÃO
PNE	-	-	-	-
PN2	1	58,80	15,5	4,9
PN3	1	57,60	5,0	5,4
PN3A	1	57,60	2,9	1,2
PN4	1	57,60	19,2	5,8
PN5	Parte diária em falta.			
PN6	1	52,80	16,8	5,9
PN7	1	50,40	-	-
	2	50,40	-	-
	3	117,60	14,3	2,4
PN8	1	52,32	17,0	6,0
PN8A	1	52,80	17,7	5,0
PN9	1	49,20	-	-
	2	49,20	-	-
	3	114,80	-	-
PN10	1	49,92	29,8	8,6
PN11	1	48,00	-	-
	2	48,00	-	-
	3	112,00	-	-
PN12	1	48,48	18,8	5,9
PN13	1	46,80	12,8	3,5
	2	48,48	-	-
	3	111,44	10,6	2,0
PN14	1	49,20	17,6	6,8
PN15	1	48,00	12,5	2,5

No Alinhamento Norte registou-se a menor perda de calda, sendo, em média, de 15%. Em termos geológico-geotécnicos observa-se uma diferença fundamental relativamente aos Alinhamentos Poente e Sul. Com efeito, neste alinhamento, ocorre uma camada superficial de aterro a que se seguem solos lodosos até profundidades da ordem de 8,5 a 9,5 m, sendo caracterizados por percentagens de finos superiores a 63%. Subjacente a esta formação ocorrem areias, areões e cascalheiras mais ou menos argilosos, até profundidades que variam entre os 15,5 m, na extremidade Poente, e os 22 m, na extremidade Nascente do alinhamento.

Também no Alinhamento Nascente a percentagem de perda de calda média não ultrapassou os 15,3%. Ao longo deste alinhamento distinguem-se dois trechos, um entre o painel *PE1* e o painel *PE22*, e outro entre este painel e o painel *PSE*. No primeiro caso, a percentagem de volume de calda perdida foi de 13,2%, coincidindo com o trecho onde ocorrem solos lodosos até uma profundidade de 12 a 16 m. No segundo trecho, a percentagem de calda perdida foi de 17,8%, constatando-se que os solos lodosos se restringem a uma camada mais superficial, por vezes misturada com aterro, ou são praticamente inexistentes, dando lugar a burgaus e a cascalheiras, numa espessura que varia entre os 9,5 e os 15 m. Neste alinhamento, os solos lodosos são caracterizados por percentagens de finos elevadas, de 80 a 95%, enquanto que aos terrenos subjacentes se associam valores da ordem de 9,5 a 23%, com uma dimensão média das partículas que atinge os 5 mm.

Face às características geológico-geotécnicas atrás descritas, admite-se que a existência de uma camada espessa de permeabilidade reduzida, a Norte e a Nascente (solos lodosos), terá contribuído de forma significativa para a redução da percentagem de calda perdida. Pelo contrário, a ocorrência de areias, areões e cascalheiras com maior expressão a Sul e a Poente, terá potenciado esta perda de calda.

Outro factor que necessariamente influi sobre a perda de calda no atravessamento de camadas muito permeáveis, consiste na sua viscosidade. Quanto maior é a viscosidade da calda, maior a sua resistência ao escoamento e menor é a sua capacidade para preencher os vazios do terreno adjacente. A viscosidade inicial varia com a composição da calda, mas também com a contaminação por solo proveniente da escavação. Esta contaminação depende do tipo de terreno atravessado, sendo expectável que ocorra em maior percentagem no atravessamento de solos lodosos (facto a investigar no futuro). Neste contexto, este factor também poderá ter contribuído para a menor perda de calda observada nos alinhamentos Nascente e Norte.

Também o desnível hidráulico, promovido pela bombagem em curso, terá tido influência sobre a perda de calda. Porém, admite-se que a permeabilidade do terreno terá sido, neste caso particular, o factor preponderante. De facto, não foi possível estabelecer uma relação entre a perda de calda e os maiores ou menores desníveis hidráulicos registados na área da cortina.

No que se refere à exsudação, os valores registados variaram entre 2,9 e 10,6%, sendo em média de 5,4% para o Alinhamento Nascente, 6,9% para o Alinhamento Sul, 6,6% para o Alinhamento Poente e 4,7% para o Alinhamento Norte.

À semelhança do que foi referido para a perda de calda, associam-se os maiores valores de exsudação dos alinhamentos Nascente e Sul à presença, na zona mais superficial dos painéis, de solos lodosos de reduzida permeabilidade. Com efeito, admite-se que a maior permeabilidade dos solos ocorrentes nos Alinhamentos Poente e Norte, tenha facilitado o desaparecimento de parte da água de exsudação que surge à superfície da vala. Outro factor que poderá ter contribuído para as diferenças verificadas diz respeito à altura dos painéis. Tratando-se de um processo lento, a capacidade total de exsudação poderá não ser atingida em valas profundas, devido à cura da calda. É nos Alinhamentos Nascente e Norte que a parede moldada atinge a sua maior profundidade, respectivamente, de 17 a 24,8 m e de 19,5 a 24,5 m.

É de referir que, na fase de definição da composição da calda, os ensaios de exsudação efectuados conduziram a valores de 4 a 10% para as amostras *C4* a *C10* (com uma relação bentonite-cimento de 1:3,7) e de 23 a 37%

para as amostras C11 e C12, supostamente com composição semelhante à adoptada em obra, sendo a relação bentonite-cimento de 1:6,25 a 1:8. A disparidade entre os valores obtidos nos ensaios de laboratório e os valores registados em obra, deve ser averiguada. Uma das explicações poderá estar relacionada com as dimensões dos provetes.

No que se refere à evolução destes parâmetros com o tempo, constata-se que, até cerca de 15 horas após a conclusão da escavação, há uma evolução quase linear da perda de calda, enquanto que a exsudação se reduz com o tempo. Num número reduzido de casos do Alinhamento Nascente, foram efectuados registos para além das 15 horas. A maioria apresenta taxa de variação decrescente com o tempo, quer no que se refere à perda de calda, quer no que se refere à exsudação.

4.6. CONTROLO DE QUALIDADE. DESCRIÇÃO E RESULTADOS

4.6.1. Controlo da continuidade da parede moldada

A continuidade da parede moldada é um aspecto fundamental na garantia da sua funcionalidade. Para o efeito, foram implementadas as seguintes medidas:

- i) verificação da posição dos cabos de suspensão da “benne”, garantindo-se que os mesmos permaneciam a eixo do muro-guia;
- ii) confirmação da escavação de calda auto-endurecedora através da observação visual do material removido pela “benne” durante a execução dos painéis secundários.

4.6.2. Controlo do ambiente de cura

Para evitar o arrastamento da calda devido à circulação de água subterrânea, a bombagem foi suspensa de forma parcial durante a execução dos painéis e de forma total, num período subsequente.

4.6.3. Controlo das características da calda auto-endurecedora

Para controlo das características da calda durante a execução da obra, foram submetidas a ensaios de laboratório amostras recolhidas nas seguintes condições:

- i) à saída do fabrico, i.e. do agitador (amostras designadas pela letra A);
- ii) no fundo do painel, quando a escavação atingia metade da altura prevista (amostras designadas por B);
- iii) no fundo do painel, após a conclusão da escavação do mesmo (amostras designadas pela letra C).

Com o controlo das características da calda pretendia-se garantir, por um lado, o adequado comportamento da mesma durante a escavação da vala e como material definitivo e, por outro, determinar se a resistência da calda dos painéis primários seria suficiente para garantir a estabilidade da vala aquando da escavação dos painéis secundários adjacentes.

4.6.3.1. Descrição e análise dos ensaios de caracterização da calda

No Quadro 38 apresentam-se os resultados dos ensaios efectuados sobre a “calda-mãe” e no Quadro 39 os resultados dos ensaios de caracterização da calda auto-endurecedora de amostras representativas do conjunto ensaiado. Estes ensaios foram realizados no estaleiro da obra, recorrendo a um conjunto de equipamentos de ensaio denominado “kit Baroid”. De acordo com o “Relatório Final de Obra” elaborado pela empresa *TEIXEIRA DUARTE, S.A.*, os ensaios de aferição das características da suspensão bentonítica e da calda auto-endurecedora, à saída do fabrico, foram realizados diariamente, apresentando-se em anexo os resultados

inscritos nas “partes diárias” de execução do painéis. É de salientar que a partir de 23 de Janeiro de 2002 há uma aparente repetição dos resultados, sobretudo no que se refere à suspensão bentonítica.

Quadro 38 – Controlo de qualidade da calda durante a construção. Características da calda bentonítica.

PAINEL	DESIGNAÇÃO DA AMOSTRA	MASSA VOLÚMICA (kg/m ³)	VISCOSIDADE MARSH (s) t = 0	pH	PERDA POR FILTRAÇÃO (ml)	ESPESSURA DO CAKE (mm)
PE6	1A	1030	35	9,5	12	0,5
PE20	2A	1020	34	9,5	16	0,3
PE16	3A	1020	33	9,5	15	0,4
PE26	4A	1020	34	9,5	15	0,4
PN13	8A	1015	33	9,5	22	0,3
PS14	9A	1010	32	11,0	19	0,4
PE28	10A	1010	32	11,0	19	0,7
PS1	11A	1010	32	11,0	19	0,7

Quadro 39 – Controlo de qualidade da calda durante a construção. Características da calda auto-endurecedora.

PAINEL	AMOSTRA	MASSA VOLÚMICA (kg/m ³)	VISCOS. MARSH (s) t = 0	pH	PERDA FILTRAÇ. (ml)	ESPESS. CAKE (mm)	RESISTÊNCIA GEL (Pa)		% de AREIA
							t = 0	t = 10 min	
PE6	1A	1090	42	12,5	130	11	-	-	3,5
	1B	1290	50	13,0	140	14	-	-	19
	1C	1300	69	12,0	152	15	5	6	18
PE20	2A	1110	39	13,0	130	11	-	-	-
	2B	1170	48	13,0	200	19	4,3	2,9	20
	2C	1210	-	12,0	188	23	4,1	3,8	18
PE16	3A	1150	38	13,0	152	12	1,5	1,4	-
	3B	1230	48	13,0	154	15	3,8	3,0	-
	3C	1230	52	12,0	130	16	7,2	3,1	-
PE26	4A	1130	39	13,0	160	1,2	1,6	1,4	-
	4B	1170	49	13,0	210	2,2	2,1	2,0	8
	4C	1250	60	13,0	214	2,2	3,6	3,4	20
PN13	8A	1100	40	12,5	144	13	1,4	1,4	-
	8B	1130	45	12,5	144	13	1,7	1,4	-
	8C	1180	63	13,0	160	20	4,3	3,4	-
PS14	9A	1120	40	13,0	145	13	-	-	-
	9B	-	-	-	-	-	-	-	-
	9C	-	-	-	-	-	-	-	-
PE28	10A	1120	40	13,0	145	13	-	-	-
	10B	-	-	-	-	-	-	-	-
	10C	-	-	-	-	-	-	-	-
PS1	11A	1120	40	13,0	145	13	-	-	-
	11B	-	-	-	-	-	-	-	-
	11C	-	-	-	-	-	-	-	-

Na Foto 9 apresenta-se uma perspectiva das amostras recolhidas na parede moldada auto-endurecedora a diversas profundidades, durante a escavação dos painéis e colocadas em moldes de PVC. Estas amostras terão sido objecto de ensaios de compressão simples e de corte em compressão triaxial.

A execução de um ensaio para determinação da resistência do gel é apresentada na Foto 10.



Foto 9 – Aspecto das amostras recolhidas na parede moldada auto-endurecedora, durante a escavação.
(Dezembro de 2001).



Foto 10 – Aparelho para medição da resistência do gel (“shearometer”).

No que se refere à calda bentonítica, constata-se que para os parâmetros massa volúmica, perda por filtração e espessura do “cake”, os resultados apresentados se encontram dentro da gama de valores da fase de projecto relativos a caldas com composição semelhante à composição final (Quadro 15). A viscosidade variou entre 32 e 35 s, valores ligeiramente superiores aos obtidos na fase de projecto, de 30 a 32 s, o mesmo acontecendo com o pH das amostras 9A, 10A e 11A, superior ao usual em caldas bentoníticas, mas cujo desvio se encontra dentro do erro associado ao método utilizado na sua determinação (fitas de papel).

As diferenças poderão ser explicadas por diversos factores, designadamente, alterações nas características da bentonite utilizada, situação normal por se tratar de um material natural, ou alterações nas condições de execução dos ensaios, sendo de realçar a temperatura ambiente, possivelmente mais baixa à data de construção da parede (que decorreu no Inverno).

A comparação entre as características da calda auto-endurecedora à saída do agitador, e as determinadas na fase de projecto foi dificultada pelo número reduzido de resultados de ensaios efectuados sobre amostras com composição semelhante. Efectivamente, na fase de determinação da composição da calda, apenas duas amostras apresentavam características semelhantes, a C11 e a C12, tendo unicamente sido determinada a respectiva viscosidade e a percentagem de exsudação. Relativamente à viscosidade, obtiveram-se, na obra, valores variáveis entre 38 e 42 s, superiores aos de projecto (34 e 38 s, respectivamente para 25 e 31 kg de bentonite por metro cúbico de água). Situação idêntica foi observada na “calda-mãe”. A explicação para este facto poderá estar relacionada com uma diferente composição da calda. Os consumos de bentonite e de cimento fazem suspeitar que a quantidade de bentonite terá sido, na realidade, de 38 kg/m³ de água, facto que ainda está por confirmar mas que é de significativa relevância para a análise dos dados. Acresce que a geometria do cone utilizado para a execução destes ensaios, se diferente daquele utilizado na determinação da composição da calda também introduz diferenças no comportamento das caldas.

No que se refere à massa volúmica, os valores variaram entre 1090 e 1120 kg/m³ nas amostras recolhidas à saída do agitador, entre 1130 e 1290 kg/m³, nas amostras recolhidas no fundo da vala quando a escavação atingiu metade da altura do painel, e entre 1180 e 1300 kg/m³, nas amostras recolhidas no fundo da vala, após a conclusão da escavação. Tal como seria expectável, a massa volúmica é superior nas amostras B e C por comparação com as amostras A, provavelmente devido à incorporação de material proveniente da escavação.

Analisando os valores de “percentagem de areia” das amostras 1B, 1C, 2B e 2C, conclui-se que a quantidade de material incorporado na base do painel, no final da escavação é menor do que o incorporado a meia altura do painel, pelo que, para o maior valor da massa volúmica das amostras 1C e 2C, contribuirão o fenómeno de filtração e o fenómeno de exsudação, com a conseqüente sedimentação das partículas sólidas que se traduz por um aumento do peso volúmico do topo para a base. É porém de salientar que as amostras C terão sido recolhidas imediatamente após a escavação da vala, sem que a calda tivesse permanecido em repouso, pelo que o fenómeno de exsudação seria ainda incipiente.

É interessante constatar que as amostras 1B e 2B foram recolhidas na transição entre a camada de solos lodosos moles e a camada de cascalheiras subjacente, enquanto que as amostras 1C e 2C foram recolhidas no final da escavação, na zona da formação margo-calcária. Tendo em consideração que a eficiência na remoção do material escavado é inferior no atravessamento dos solos lodosos, é expectável que permaneça uma quantidade superior de material em suspensão durante a escavação destas formações (facto a confirmar). A diferença de comportamento em termos de percentagem de areia da amostra 4 relativamente às amostras 1 e 2 também pode ser explicada pelas características geológico-geotécnicas dos terrenos atravessados pelo painel PE26. De facto, a amostra 4B foi recolhida numa zona do Alinhamento Nascente onde os solos lodosos desaparecem, dando lugar a areões mais ou menos lodosos a argilosos. A amostra 4C foi recolhida a uma profundidade onde ocorrem cascalheiras argilosas e não na formação margo-calcária, como foi o caso das amostras 1C e 2C. É natural que a escavação das camadas lodosas conduza a uma contaminação superior à

que resulta do atravessamento de areões e de cascalheiras que, por sua vez, deverá ser superior à da escavação das formações margo-calcárias, caracterizadas por valores do ensaio *SPT* elevados.

No que se refere à perda de água por filtração e à espessura do “cake”, constata-se que são significativamente superiores aos da “calda-mãe”, em resultado da floculação que ocorre com a associação da bentonite e cimento.

Relativamente à viscosidade Marsh, a análise do Quadro 39 permite concluir que há um aumento deste parâmetro das amostras *A* para as *C*, sendo de 13 a 26% de *A* para *B* e de 37 a 64% de *A* para *C*. Este aumento deve-se, sobretudo, à incorporação de material na calda e ao adensamento da mesma por filtração (admite-se que a exsudação estivesse ainda numa fase incipiente).

O pH das amostras não apresenta nenhuma tendência definida de crescimento ou de redução em profundidade, tendo-se obtido valores variáveis de 12 a 13, usuais para caldas auto-endurecedoras.

Relativamente à resistência do gel, as amostras *A* são caracterizadas por uma menor dispersão dos resultados e por valores inferiores (1,4 a 1,6 Pa, para $t=0$), aos das amostras *B* (1,7 a 4,3 Pa, para $t=0$) que, por sua vez, são inferiores aos das amostras *C* (3,6 a 7,2 Pa, para $t=0$). A determinação da resistência do gel foi efectuada com um dispositivo de operação simplificada cujos resultados não são correlacionáveis com os de viscosímetros ou de reómetros usualmente utilizados em laboratório. Assim se explica que os valores obtidos sejam inferiores aos relatados na bibliografia da especialidade para caldas auto-endurecedoras, aproximando-se mais dos referidos para caldas bentoníticas. Com efeito, *Jefferis* (1981) refere valores da ordem de 15 e 18 Pa, respectivamente para $t=0$ e $t=10$ min para caldas à saída do fabrico e de 20 e 22 Pa após a escavação. Já *Portier* (1984) refere valores um pouco inferiores, da ordem de 5 a 10 Pa, sublinhando que é esta característica da calda que mantém as partículas em suspensão e que impede a decantação da calda.

Aparentemente, o maior valor da resistência ao gel das amostras *B* e *C* poderá ser atribuído à incorporação, na calda, de solo proveniente da escavação. Aliás, o caso da amostra 2, em que se registou uma redução da “percentagem de areia” de *B* para *C*, coincide com a única situação em que, para $t=0$, ocorreu uma pequena redução da resistência do gel em profundidade.

No que se refere à evolução da resistência do gel com o tempo, a sua inesperada redução, observada na totalidade das amostras, após 10 minutos de repouso, foi explicada por *Jefferis* e *Tedd* (1999), como sendo o eventual resultado de uma ligeira segregação da água e sólidos ocorrido durante a realização do ensaio.

4.6.3.2. Descrição e análise dos ensaios de compressão simples

Os ensaios de determinação da resistência à compressão simples foram efectuados no *Laboratório da Universidade de Coimbra*, utilizando, para o efeito, uma célula triaxial e uma velocidade na fase de corte de 0,4 a 0,5 mm/min. As amostras foram preparadas no estaleiro da obra, tendo constado da moldagem da calda em tubos de *PVC*, com 100 mm de diâmetro (posteriormente seccionadas em laboratório de forma a ficarem com 200 mm de altura). As amostras foram mantidas numa câmara com temperatura controlada, apresentando-se no Quadro 40 os valores do teor em água à data dos ensaios. No Quadro 41 apresentam-se os valores da tensão de rotura obtidos.

É de salientar que os ensaios da fase de obra foram efectuados por uma outra instituição e seguindo uma especificação distinta daquela que presidiu à realização dos ensaios na fase de determinação da composição da calda (ou fase de projecto).

O teor em água das amostras ensaiadas é caracterizado por uma elevada dispersão, não existindo nenhuma relação aparente entre este parâmetro e o período de cura. Provetes de uma mesma amostra e com idêntico

período de cura apresentam, nalguns casos, uma elevada variação do teor em água, facto de difícil justificação, sobretudo no que se refere às amostras recolhidas à saída do agitador (amostras A).

Apesar da elevada dispersão dos resultados, constata-se que o teor em água das amostras C é, na generalidade das situações e em média, inferior ao teor em água das amostras B.

Também não foi encontrada nenhuma relação entre o valor do teor em água e a magnitude da resistência à compressão simples. Para uma mesma amostra e idêntico período de cura, a redução do teor em água não se traduz pelo aumento da resistência e vice-versa.

A resistência à compressão simples das amostras recolhidas à saída do fabrico (amostras A), para diferentes períodos de cura, é representada na Fig. 23.

Quadro 40 – Controlo da qualidade da calda durante a construção. Ensaios de compressão simples. Teor em água dos provetes.

PAINEL	AMOSTRA	PERÍODO DE CURA (dias)	TEOR EM ÁGUA (%)		
			A – à saída do fabrico	B – a meio da escavação	C – no final da escavação
PE6	Amostra 1	21	232,8	136,6	131,8
			-	130,4	119,5
		28	42,0	63,0	99,0
			58,2	61,0	72,0
		42	-	63,0	58,0
			217,0	110,0	77,0
		212,0	85,0	53,0	
		210,0	86,0	48,0	
		82	-	101,0	-
		104	81,0	88,0	82,0
PE20	Amostra 2	14	320,0	287,9	170,5
		21	-	161,0	101,0
			-	114,0	109,0
-	-	116,0	89,0		
PE16	Amostra 3	7	260,4	176,4	185,2
		17	103,0	80,0	60,0
			30,0	86,0	62,0
		32	45,0	92,0	60,0
			82,0	111,0	111,0
		50,0	118,0	92,0	
		54,0	112,0	94,0	
67	161,0	125,0	117,0		
90	80,0	92,0	122,0		
PE26	Amostra 4	11	86,0	122,0	145,0
			64,3	125,0	91,0
			192,0	92,0	96,0
		18	212,0	121,0	98,0
			166,0	132,0	48,0
			145,0	119,0	43,0
			155,0	104,0	37,0
			182,0	98,0	129,0
		31	156,0	115,0	126,0
			20,0	-	124,0
		59	128,0	157,0	74,0
88	68,0	175,0	127,0		
	68,0	168,0	121,0		

Quadro 40 – Controlo da qualidade da calda durante a construção. Ensaio de compressão simples. Teor em água dos provetes. (cont.)

PAINEL	AMOSTRA	PERÍODO DE CURA (dias)	TEOR EM ÁGUA (%)		
			A – à saída do fabrico	B – a meio da escavação	C – no final da escavação
PN13	Amostra 8	28	221,0	165,0	141,0
			224,0	162,0	149,0
			153,0	154,0	148,0
		60	235,0	-	-
			158,0	-	-
			137,0	-	-
90	179,0	129,0	128,0		
	160,0	112,0	111,0		
PS14	Amostra 9	28	154,0	155,0	107,0
			219,0	150,0	66,0
			-	148,0	64,0
		61	193,0	147,0	177,0
			170,0	135,0	148,0
		90	167,0	142,0	138,0
PN13	Amostra 10	60	56,0	53,0	45,0
		90	-	115,0	108,0
PS14	Amostra 11	28	212,0	92,0	134,0
			66,0	143,0	152,0
		61	164,0	106,0	106,0
			180,0	128,0	89,0
		90	209,0	125,0	109,0
			209,0	127,0	99,0

Quadro 41 – Controlo da qualidade da calda durante a construção. Ensaio de compressão simples. Tensão de rotura.

PAINEL	AMOSTRA	PERÍODO DE CURA (dias)	TENSÃO DE ROTURA À COMPRESSÃO SIMPLES (kPa)		
			A - à saída do fabrico	B - a meio da escavação	C - no final da escavação
PE6	Amostra 1	21	4,0	10,5	13,1
			-	7,6	10,7
		28	5,5	12,8	19,6
			4,1	13,9	18,8
			-	9,8	13,6
			7,4	16,5	22,5
		42	6,2	14,9	14,6
			6,8	14,1	25,1
		82	-	41,5	-
			104	18,7	29,5
PE20	Amostra 2	14	16,7	2,4	6,4
		21	7,0	1,6	15,5
			4,0	6,0	8,5
			9,0	5,2	9,3
		37	6,5	12,0	16,0

**Quadro 41 – Controlo da qualidade da calda durante a construção. Ensaios de compressão simples.
Tensão de rotura. (cont.)**

PAINEL	AMOSTRA	PERÍODO DE CURA (dias)	TENSÃO DE ROTURA À COMPRESSÃO SIMPLES (kPa)		
			A - à saída do fabrico	B - a meio da escavação	C - no final da escavação
PE16	Amostra 3	7	5,5	16,7	18,3
		17	21,5	46,2	45,6
			15,7	39,0	44,5
			11,6	30,7	26,6
		32	62,8	26,9	75,2
			32,4	50,3	40,5
67	22,7	75,1	27,3		
	27,2	76,3	45,2		
90	79,9	42,6	111,7		
	118,3	67,1	109,2		
PE26	Amostra 4	11	10,3	9,4	12,9
			4,6	7,7	24,3
			7,7	8,1	10,8
		18	10,3	10,8	10,9
			12,8	4,4	9,9
		31	6,7	6,1	8,3
24,1	7,8		19,5		
59	17,4	12,5	17,7		
	19,8	-	18,8		
88	10,6	38,6	38,3		
	45,0	33,7	51,7		
40,0	29,8	29,8	58,0		
	28	4,9	4,4	9,6	
6,3		5,1	5,9		
4,7		4,9	5,3		
60	3,9	16,3	24,9		
	24,2	30,0	29,7		
90	22,8	39,0	33,9		
	28	19,9	12,5	15,6	
15,3		11,0	17,7		
16,5		20,5	20,5		
61	60,9	38,0	32,2		
	27,8	35,1	37,7		
90	15,7	29,4	36,5		
	27	20,0	13,0	18,5	
12,0		11,4	15,3		
16,0		10,5	-		
60	35,5	28,2	49,4		
	35,0	31,1	47,9		
90	45,0	-	39,7		
	28	2,5	4,2	7,2	
4,1		4,1	10,2		
9,5		23,3	33,5		
60	12,7	18,4	24,9		
	24,5	36,7	43,3		
90	32,7	31,7	43,8		

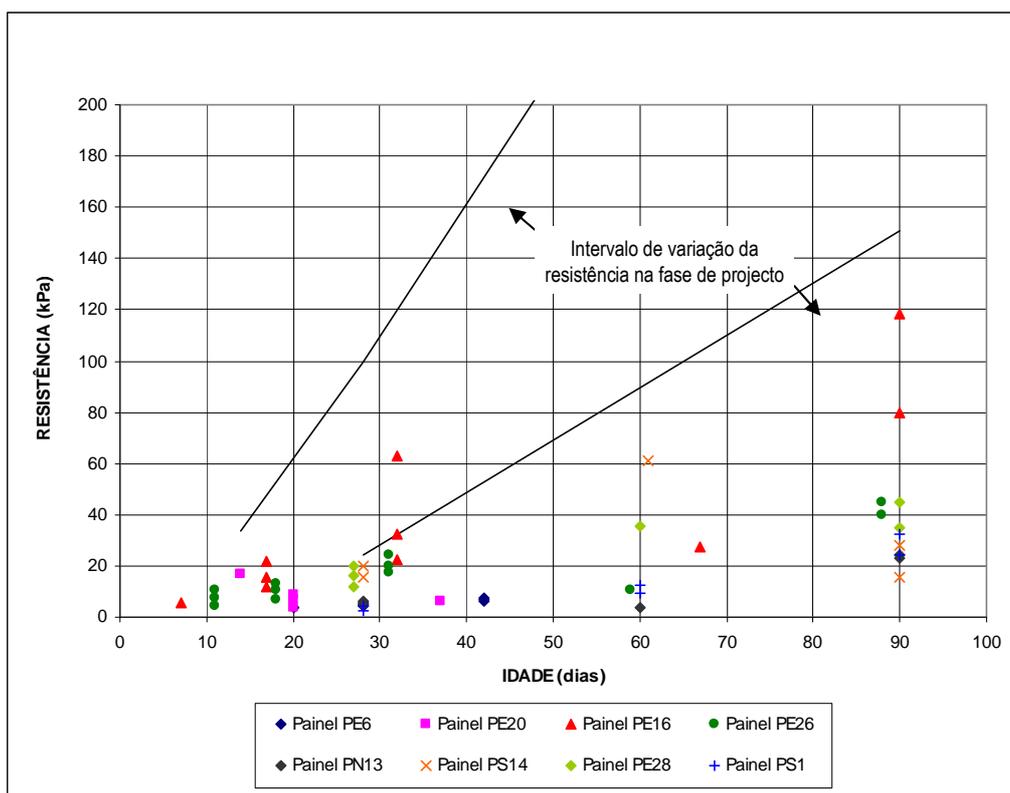


Fig. 23 – Controlo da qualidade da calda durante a construção. Resultados dos ensaios de resistência à compressão simples das amostras A.

Os resultados dos ensaios de compressão simples, efectuados sobre as amostras recolhidas à saída do fabrico, são da mesma ordem de grandeza para todas as amostras, sendo excepção a amostra 3A, do painel PE16. Conforme se pode constatar pela observação da Fig. 23, a resistência da calda auto-endurecedora fabricada na obra é reduzida, não ultrapassando os 45 kPa aos 90 dias, valor bastante inferior ao registado durante a campanha de ensaios efectuados para determinação da composição da calda, cujo intervalo de variação se representa na mesma figura através das linhas a negro. Os valores obtidos também são significativamente inferiores ao valor mínimo estabelecido no projecto, condicionado pelos resultados da modelação (as tensões de compressão máximas obtidas nos modelos foram da ordem de 312 a 344 kN/m²).

De acordo com o “Relatório Final da Obra” elaborada pela empresa TEIXEIRA DUARTE, S.A., as diferenças entre os valores de resistência obtidos na obra e os obtidos na fase de determinação da composição da calda, deveram-se às condições climáticas verificadas no início da construção da parede. As temperaturas muito inferiores às registadas no laboratório poderão ter contribuído para o retardamento do início da presa e para a reduzida magnitude da resistência da calda. Admite-se que, para além do aspecto referido, o tipo de cura e a alteração das condições de realização dos ensaios (designadamente da velocidade de corte da amostra) terão contribuído para as diferenças observadas. Acresce que, tratando-se de um material sensível, o simples transporte para o laboratório das amostras antes de um período mínimo de cura, altera a estrutura do material. Também a extrusão do provete do molde pode introduzir perturbações. Todos estes aspectos contribuem para a redução da resistência da calda e devem ser acautelados.

No que se refere à amostra 3A, a sua resistência é significativamente superior à das restantes amostras, sendo sobretudo visível após 90 dias de cura, constatando-se que se aproxima do limite inferior do intervalo de variação da fase de projecto. Analisando as restantes características desta amostra, conclui-se que, também em termos de viscosidade e de perda de água por filtração, a amostra se distingue das restantes, apresentando, respectivamente, valor inferior e superior, fazendo suspeitar de alterações na sua composição (menor

quantidade de bentonite ou maior quantidade de cimento) ou nas condições de ensaio, relativamente às restantes amostras.

Na tentativa de determinar a influência do meio envolvente e do processo de escavação sobre a resistência do material constituinte da parede moldada, representaram-se os resultados dos ensaios de compressão simples na Fig. 24.

Conforme se constata pela análise da figura, a resistência à compressão simples de todas as amostras cresce com o período de cura, mas observa-se um desvio generalizado deste padrão de comportamento aproximadamente aos 60 dias de cura. De facto, os resultados dos ensaios das amostras 1B, 3A, 3B, 3C, 4A, 4B, 4C, 9A, 9B e 10C, para o referido período de cura, não seguem a tendência de crescimento, apresentando ou valores inferiores aos do período de cura anterior ou superiores aos do período de cura seguinte.

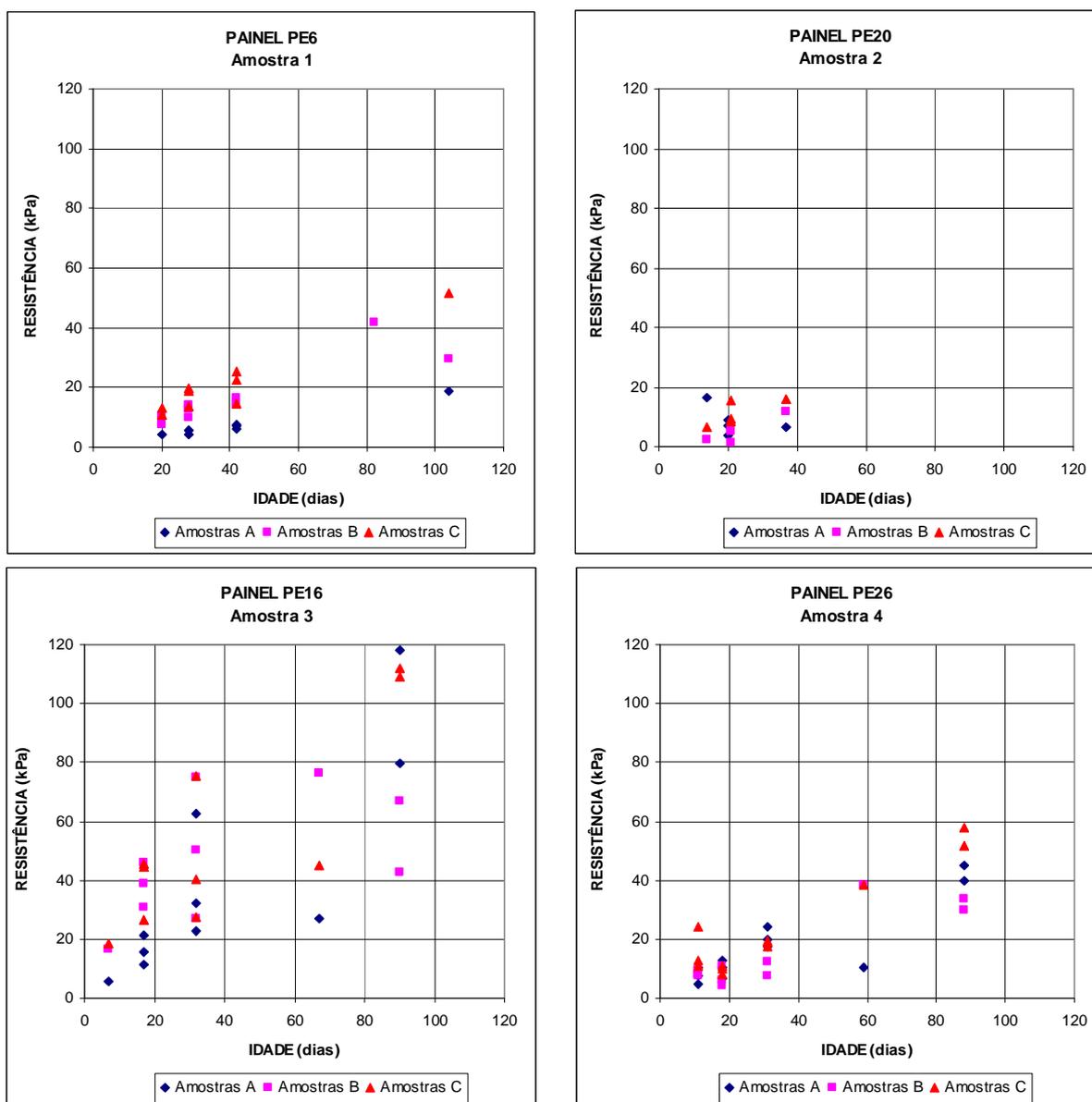


Fig. 24 – Controlo da qualidade da calda durante a construção. Resultados dos ensaios de resistência à compressão simples.

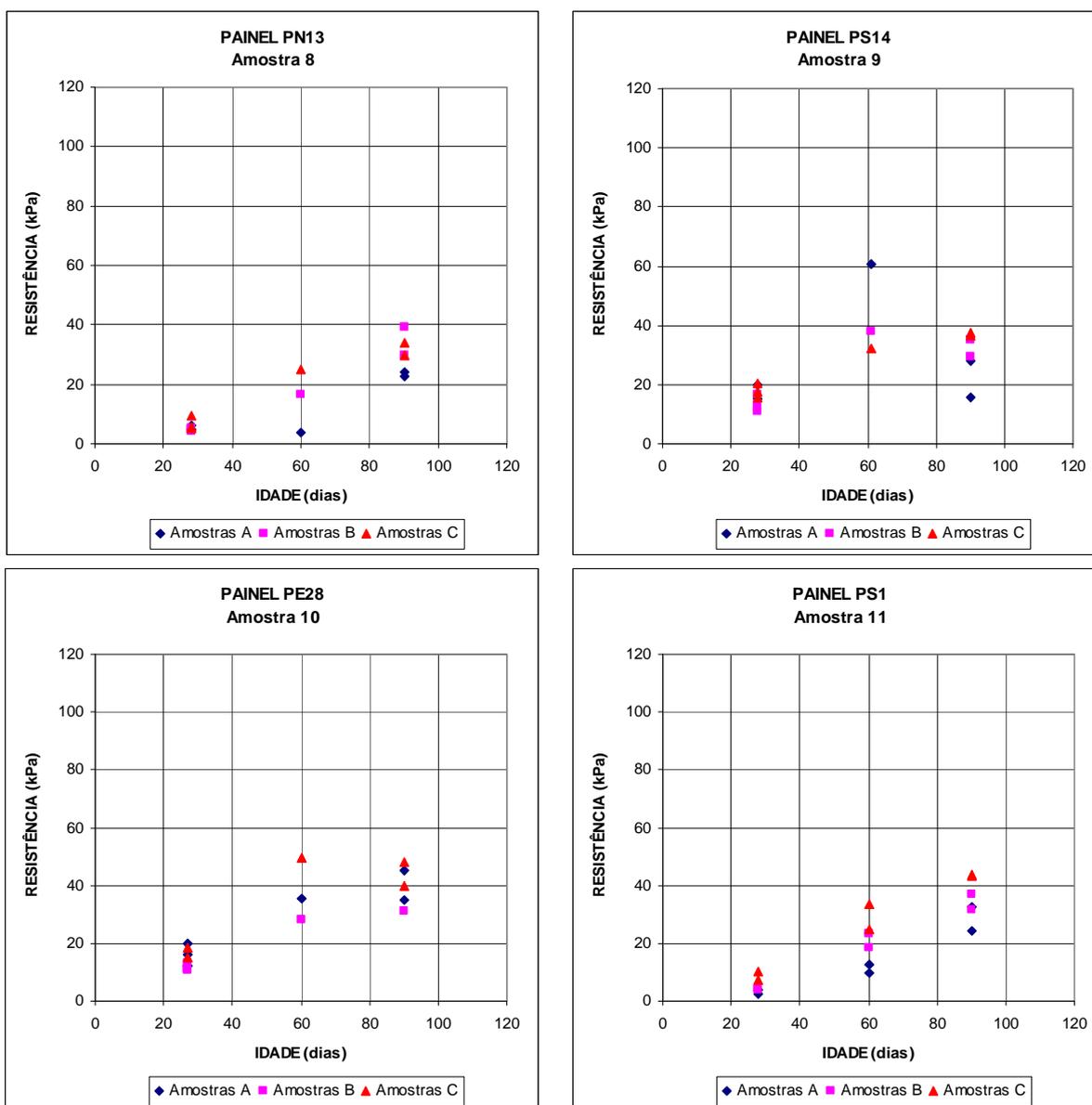


Fig. 24 – Controlo da qualidade da calda durante a construção. Resultados dos ensaios de resistência à compressão simples. (cont.)

No que se refere à resistência das amostras recolhidas nos painéis em fases diferentes da escavação, observam-se diferentes comportamentos. Assim, a amostra 1 (painel PE6) e a amostra 11 (painel PS1) apresentam resistências crescentes de A para C. Nas restantes amostras é difícil estabelecer um padrão de variação da resistência. Com efeito, nalguns casos, a tendência observada para um determinado período de cura, altera-se nos restantes.

É porém de referir que em diversas situações as resistências das amostras B e C são inferiores à resistência das amostras A correspondentes, embora se possa afirmar que a ordem de grandeza não se altera. Uma explicação para este facto foi dada no “Relatório Final de Obra” elaborado pela empresa TEIXEIRA DUARTE, S.A. Neste documento refere-se que o atravessamento das formações lodosas e consequente incorporação de material fino na calda poderão ter contribuído para a redução da sua resistência e para o retardamento da presa.

No que se refere aos módulos de deformabilidade, apresentam-se no Quadro 42 os valores do módulo inicial, tangente à curva tensão-deformação e o módulo secante para uma tensão equivalente ao valor de rotura.

Quadro 42 – Controlo da qualidade da calda durante a construção. Ensaios de compressão simples. Módulos de deformabilidade.

PAINEL	AMOSTRA	PERÍODO DE CURA (dias)	MÓDULOS DE DEFORMABILIDADE (MPa)					
			INICIAL			$(\sigma'_1 - \sigma'_3)_{\max}/2$		
			A	B	C	A	B	C
Painel PE6	Amostra 1	21	0,48	1,87	1,40	0,32	1,63	0,92
			-	0,70	2,30	-	0,70	2,30
		28	1,70	0,74	?	1,70	0,70	3,13
			0,90	2,50	?	0,90	1,87	1,87
		42	-	2,22	3,12	-	0,97	1,29
			1,86	3,05	13,60	1,37	1,92	7,44
	1,18	3,85	3,30	0,82	3,85	2,12		
	1,86	3,05	5,42	1,79	2,01	5,42		
	82	-	7,08	-	-	5,84	-	
	104	Os gráficos não foram disponibilizados						
Painel PE20	Amostra 2	14	1,00	0,36	0,77	0,86	0,24	0,77
			-	-	-	-	0,2	1,60
		21	-	-	-	-	0,53	0,50
		-	-	-	-	0,45	0,80	
Painel PE16	Amostra 3	7	2,40	1,50	1,50	2,4	1,40	1,5
		17	1,56	4,03	10,20	1,02	3,80	4,63
			1,56	3,12	?	1,18	3,10	2,36
			1,56	3,12	1,61	1,08	2,90	1,57
		32	8,33	3,83	?	7,70	3,61	?
			6,31	5,92	5,00	6,15	5,81	5,00
	6,31	13,80	2,65	3,49	13,54	2,65		
	67	2,15	13,75	3,10	2,15	12,29	3,10	
	90	Os gráficos não foram disponibilizados						
Painel PE26	Amostra 4	11	3,38	1,25	3,06	1,70	0,80	0,04
			1,50	2,50	4,22	0,80	1,20	3,19
			3,38	2,50	1,11	2,10	2,10	1,11
		18	3,18	3,00	3,87	1,20	2,20	3,00
			1,43	1,80	2,40	0,90	1,80	1,10
			3,18	1,50	3,87	0,30	1,10	2,84
31	4,48	4,73	4,82	0,13	4,71	4,82		
	1,99	7,86	4,82	1,71	3,06	1,98		
	4,48	?	7,51	0,18	?	3,97		
	59	1,97	4,73	5,69	1,76	4,73	5,69	
	88	Os gráficos não foram disponibilizados						
Painel PN13	Amostra 8	28	5,60	2,58	3,53	1,43	2,55	1,55
			5,60	4,50	1,03	1,18	2,36	0,74
			4,89	6,67	3,53	1,77	2,21	1,93
	60	2,31	2,50	6,99	?	2,50	6,99	
	90	?	3,90	10,10	?	3,81	7,26	
4,24		12,60	4,39	2,67	10,56	4,39		
Painel PS14	Amostra 9	28	6,67	4,86	4,59	3,85	2,07	3,08
			6,67	4,86	4,59	3,63	1,89	3,38
			?	8,82	10,00	?	4,86	7,27
	61	Os gráficos não foram disponibilizados						
	90	13,60	9,09	6,79	6,53	7,96	5,23	
		7,32	9,09	10,67	7,32	5,70	9,61	
Painel PE28	Amostra 10	60	Os gráficos não foram disponibilizados					
		90	-	?	21,00	-	?	8,48
		-	18,90	21,00	-	8,53	6,20	
Painel PS1	Amostra 11	28	2,34	2,81	5,40	1,15	2,12	2,25
			2,34	4,50	2,49	0,94	4,09	2,14
		60	4,73	9,65	4,00	2,31	7,71	3,95
			8,80	6,01	7,23	3,74	4,82	4,34
90	8,37	9,94	9,83	6,42	9,42	9,83		
	19,20	14,68	13,30	8,02	14,68	9,41		

Conforme se conclui pela análise do quadro, a deformabilidade das amostras é caracterizada por uma significativa dispersão, independentemente do local onde foram recolhidas.

O menor valor de módulo de deformabilidade inicial registado é de 0,36 MPa aos 14 dias de cura para as amostras B, seguindo-se as amostras A com 0,48 MPa aos 21 dias de cura, e finalmente as amostras C, com um valor de 0,77 MPa aos 14 dias de cura. Os máximos valores obtidos correspondem a um período de cura de 90 dias e foram de 19,2 MPa, para as amostras A, 18,9 MPa, para as amostras B, e de 21 MPa, para as amostras C.

Os módulos de deformabilidade secantes apresentam valores mais baixos, verificando-se, tal como expectável, que a máxima magnitude é atingida aos 90 dias de cura.

Na fase de definição da composição da calda os resultados disponíveis relativos à deformabilidade da calda dizem respeito a amostras com uma composição distinta da composição final, e ao fim de 18 dias de cura. Apesar das diferenças, constata-se que os valores obtidos são da mesma ordem de grandeza e muito inferiores ao valor mínimo estabelecido no projecto, de 100 MPa, embora se tenha utilizado um valor de 50 MPa na modelação.

4.6.3.3. Descrição e análise dos ensaios de corte em compressão triaxial

Para além dos ensaios de determinação da resistência à compressão simples, foram efectuados ensaios de corte em compressão triaxial do tipo consolidado, não drenado, com medição de pressões intersticiais, no *Laboratório de Solos da Universidade de Coimbra*.

A análise da informação disponibilizada permitiu concluir que existem incorrecções nos gráficos dos ensaios. Uma vez que não foram disponibilizadas as tabelas correspondentes, não foi possível determinar os valores de resistência e deformabilidade.

No Quadro 43 apresentam-se algumas características dos provetes relevantes para a análise dos resultados dos ensaios de corte em compressão triaxial. Supõe-se que o teor em água indicado nas fichas se refira ao teor em água após a fase de consolidação das amostras, já que na generalidade dos provetes há uma relação entre o decréscimo do teor em água e o aumento da tensão de consolidação a que foram sujeitos. Da análise do quadro também se conclui que há um decréscimo significativo do teor em água com o aumento da profundidade de recolha das amostras, quer no Painel PE6, quer no Painel PE16. Este decréscimo é normal e fruto da incorporação de solo na calda, da filtração e eventualmente da exsudação.

Quadro 43 – Controlo da qualidade da calda durante a construção. Ensaio de corte em compressão triaxial, consolidados não drenados. Características das amostras ensaiadas.

PAINEL	AMOSTRA	TEMPO DE CURA (dias)	TEOR EM ÁGUA (%)		
			Provete 1	Provete 2	Provete 3
Painel PE6	1A	90	356,4	301,5	257,0
	1B	28	87,6	91,2	73,7
	1C	90	127,4	91,2	73,7
Painel PE16	3A	90	285,7	224,7	212,2
	3B	90	188,9	157,0	122,5
	3C	90	193,1	177,2	138,2

4.6.3.4. Descrição e análise dos ensaios de determinação da permeabilidade

Durante a realização dos ensaios de corte em compressão triaxial foi determinada a permeabilidade das amostras para as diferentes tensões de consolidação, com gradiente hidráulico desconhecido. Os resultados obtidos são apresentados no Quadro 44.

Quadro 44 – Controlo da qualidade da calda durante a construção. Ensaios de corte em compressão triaxial. Coeficientes de permeabilidade.

PAINEL	AMOSTRA	TEMPO DE CURA (dias)	TENSÃO CONSOL. (kPa)	COEFICIENTE PERMEABIL. (m/s)
PE6	1A	90	50	$5,5 \times 10^{-11}$
			200	$1,9 \times 10^{-11}$
	1B	28	100	$2,1 \times 10^{-11}$
			200	$5,7 \times 10^{-12}$
PE16	3A	90	400	$7,5 \times 10^{-12}$
			50	$2,6 \times 10^{-11}$
			100	$2,6 \times 10^{-11}$
	3B	90	200	$1,1 \times 10^{-11}$
			50	$9,5 \times 10^{-12}$
			200	$1,3 \times 10^{-11}$
3C	90	200	$4,7 \times 10^{-12}$	

Os valores de permeabilidade variaram entre $5,5 \times 10^{-11}$ m/s e $4,7 \times 10^{-12}$ m/s, sendo significativamente inferiores aos obtidos na fase de determinação da composição da calda para amostras com quantidades de bentonite superiores. Para esta disparidade de resultados poderão ter contribuído os diferentes procedimentos adoptados em laboratórios distintos e eventuais alterações nas condições de realização dos ensaios, designadamente no que se refere ao gradiente hidráulico. É de sublinhar que a menor permeabilidade das amostras recolhidas à saída do fabrico e a também menor resistência por comparação com a determinada na fase de projecto (ver item 4.7.3.2) faz suspeitar de alterações nas características da bentonite utilizada. Desconhece-se, porém, a magnitude dessa variação e se a mesma justifica as diferenças obtidas.

Tanto no caso das amostras recolhidas no painel *PE6*, como no caso das amostras do painel *PE16*, a permeabilidade parece reduzir-se de A para C.

5. EXPLORAÇÃO

5.1. RESULTADOS DOS ENSAIOS DE LABORATÓRIO EFECTUADOS SOBRE AMOSTRAS RECOLHIDAS NOS PAINÉIS

5.1.1. Descrição e análise dos ensaios de compressão simples

No período subsequente à construção da parede moldada foram recolhidas amostras de alguns painéis a diversas profundidades, por meio de furos de sondagem à rotação. As amostras foram sujeitas a ensaios de determinação da resistência à compressão simples em dois laboratórios distintos, um pertencente à empresa *TEIXEIRA DUARTE, S.A.* e o segundo à *Universidade de Coimbra*. Os resultados dos ensaios são apresentados no Quadro 45 e no Quadro 46.

É de salientar que as amostras ensaiadas no laboratório da empresa *TEIXEIRA DUARTE, S.A.* foram previamente rectificadas com calda de cimento. Nestes ensaios foi utilizada a prensa manual dos ensaios *CBR*, tendo-se aplicado na fase de corte, uma velocidade de 1 mm/min. Já na *Universidade de Coimbra*, o corte das amostras foi efectuado com uma velocidade de 0,5 mm/min. Em ambos os casos não são conhecidas as condições de armazenamento das amostras.

Quadro 45 – Controlo de qualidade na fase de exploração. Ensaios de compressão simples realizados no laboratório da empresa *TEIXEIRA DUARTE S.A.*

PAINEL	RECOLHA DA AMOSTRA AOS: (dias) (*1)	PERÍODO TOTAL DE CURA (dias) (*2)	PROFUND. RECOLHA DA AMOSTRA (m)	DESIGN. DA AMOSTRA	RELAÇÃO H/D	TENSÃO DE ROTURA (kPa)
PE16	125	188	17,0 a 19,0	PE16-18A	1,0	149,0
				PE16-18B	2,0	116,0
				PE16-18C	2,0	100,0
PS16	120	182	3,0 a 5,0	PS16-4A	1,0	77,0
				PS16-4B	1,0	63,0
				PS16-4C	1,0	68,0
				PS16-4D	2,0	70,0
				PS16-4E	2,0	51,0
			10,0 a 12,0	PS16-11A	1,0	116,0
				PS16-11B	1,0	100,0
				PS16-15A	2,0	135,0
			14,0 a 16,0	PS16-15B	2,0	126,0
				PS16-15C	2,0	114,0
PN13	125	191	3,0 a 5,0	PN13-4A	1,0	84,0
				PN13-5A	2,0	69,0
			17,0 a 19,0	PN13-18A	1,0	50,0
				PN13-18B	1,0	37,0
				PN13-18C	1,0	50,0
				PN13-18D	1,0	110,0
				PN13-18E	1,0	50,0
				PN13-18F	2,0	75,0
PN13-18G	2,0	40,0				

(*1) Período que decorreu entre a conclusão da construção do painel e a recolha da amostra;

(*2) É a soma do período descrito em (*1) e do período que decorreu entre a recolha da amostra e a realização do ensaio.

Quadro 46 – Controlo de qualidade na fase de exploração. Ensaios de compressão simples realizados no Laboratório de Solos da Universidade de Coimbra.

PAINEL	RECOLHA DA AMOSTRA AOS: (dias) (*1)	PERÍODO TOTAL DE CURA (dias) (*2)	DESIGN. DA AMOSTRA	PROFUND. RECOLHA AMOSTRA (m)	RELAÇÃO H/D	PESO VOL. HÚMIDO (kN/m ³)	TENSÃO DE ROTURA (kPa)
PE6	27	35	6/4	4,5 a 5,5	2,0	-	6,1
					2,0	-	9,6
			6/7	7,5 a 8,5	2,0	-	24,7
					2,0	-	15,2
			6/12	12,0 a 13,0	2,0	-	12,3
					2,0	-	22,2
6/17	17,0 a 18,0	2,0	-	26,6			
		2,0	-	26,1			
PE14	14	22	7/5	5,0 a 6,0	2,0	-	13,3
					2,0	-	14,5
			7/10	10,0 a 11,0	2,0	-	42,1
					2,0	-	35,2
			7/15	15,0 a 16,0	2,0	-	17,1
					2,0	-	11,9
7/20	20,0 a 21,0	2,0	-	28,8			
		2,0	-	28,5			
PE16	125	180	19B	17,0 a 19,0	2,0	13,8	40,3
					2,0	14,2	43,6
					2,0	13,8	43,4
					2,0	13,7	37,6
PS16	120	180	5A	3,0 a 5,0	2,0	12,1	18,4
					2,0	11,9	62,8
					2,0	12,0	39,6
					2,0	11,8	58,6
		181	12A	10,0 a 12,0	2,0	13,5	40,3
					2,0	13,7	45,0
					2,0	13,5	55,5
					2,0	13,8	58,3
		182	16A	14,0 a 16,0	2,0	14,6	60,7
					2,0	14,4	67,6
					2,0	14,6	60,7
					2,0	14,4	67,6
PN13	125	192	5A	3,0 a 5,0	2,0	12,5	41,1
					2,0	13,3	43,0
					2,0	13,3	52,4
		195	12A	12,0 a 13,0	2,0	14,0	11,6
					2,0	13,2	62,8
					2,0	13,1	60,4
					2,0	13,8	35,3
		195	19A	17,0 a 19,0	2,0	12,9	16,1
					2,0	13,7	26,0
					2,0	13,9	33,3
					2,0	13,9	33,3
					2,0	14,1	56,1

(*1) Período que decorreu entre a conclusão da construção do painel e a recolha da amostra;

(*2) É a soma do período descrito em (*1) e do período que decorreu entre a recolha da amostra e a realização do ensaio.

A primeira conclusão que se retira da análise do Quadro 45, diz respeito à influência da relação entre a altura (H) e o diâmetro da amostra (D) sobre a sua resistência à compressão simples. A média dos valores obtidos para relações H/D unitárias, conduz, sistematicamente, a resistências superiores às que se obtêm em amostras com relação H/D = 2.

A comparação entre os valores de resistência obtidos nos ensaios efectuados pela empresa *TEIXEIRA DUARTE, S.A.* com os resultados efectuados no *Laboratório de Solos da Universidade de Coimbra*, permite concluir que os primeiros são superiores aos segundos, podendo a relação entre ambos variar de 1,35 a 1,95. Um dos aspectos que terá contribuído para a alteração de comportamentos terá sido a diferente velocidade de corte adoptada por um e por outro laboratório. Com efeito, tratando-se de um material com uma permeabilidade muito reduzida, a velocidade de aplicação da carga e a trajectória de tensões altera o seu comportamento em termos de tensões totais.

Analisando o Quadro 46 constata-se que nos painéis *PS16* e *PN13* há um aumento, em profundidade, do peso volúmico húmido, para um período de cura de 180 a 195 dias. No painel *PS16*, o peso volúmico médio é de 11,95 kN/m³, à superfície, e de 14,5 kN/m³, entre os 14 e os 16 m de profundidade, apresentando, portanto, uma variação superior à registada no painel *PN13*, onde o valor médio à superfície é de 13,0 kN/m³ e a uma profundidade de 17 a 19 m, de 13,65 kN/m³. Esta diferença nas características do material dos dois painéis poderá ser associada à perda de calda e à exsudação registadas em fase de obra.

Quanto maior for a percentagem de exsudação, maior será a sedimentação das partículas em suspensão e maior será a variação de peso volúmico em profundidade, sendo este o caso dos painéis do Alinhamento Sul onde se registou a maior altura de água – 6,9% do volume do painel.

Sempre que a perda de calda resultar da perda de água por filtração, também ocorrerá adensamento do material. Por outro lado, nos painéis sujeitos a perda de calda, procedeu-se ao seu reatestamento com calda virgem. Uma vez que a escavação estava concluída, a contaminação desta calda com solo é diminuta. Assim, justifica-se que às amostras do painel *PS16*, recolhidas entre os 3 e os 5 m de profundidade, correspondam valores inferiores de peso volúmico, por comparação com as amostras recolhidas à mesma profundidade do painel *PN13*, onde a redução do nível de calda terá sido significativamente inferior.

Os valores de peso volúmico determinados nesta fase, são superiores aos das amostras *B* e *C* recolhidas durante o processo de escavação dos painéis. Nos painéis *PE16* e *PN13*, registam-se aumentos médios de 13 a 19% que se atribuem à cura da calda e aos fenómenos de filtração e de exsudação.

Na Fig. 25 apresenta-se a variação em profundidade da resistência à compressão simples das amostras recolhidas nos painéis *PE6*, *PE14*, *PS16* e *PN13*. Excluíram-se dos gráficos os resultados obtidos pela empresa *TEIXEIRA DUARTE S.A.*

Da observação das figuras conclui-se que a dispersão dos resultados é, nalguns casos, muito significativa, facto que dificulta a sua análise.

Em termos globais, os valores agora obtidos inserem-se no intervalo de variação determinado para as amostras recolhidas durante a execução da obra, conforme se conclui pela análise da Fig. 26, relativa ao painel *PE6*. Na mesma figura representam-se as curvas de variação da resistência da calda não contaminada, determinadas na fase de projecto, sendo visível que as mesmas se afastam significativamente dos resultados obtidos durante a execução da obra. No presente caso admite-se que face ao período de cura em causa, o transporte das amostras da obra para o laboratório não tenha perturbado as amostras. Porém, o procedimento de recolha das mesmas através de carotagem, poderá ter induzido estas perturbações já que se trata de um material extremamente sensível.

5.1.2. Descrição e análise dos ensaios de corte em compressão triaxial

Para além dos ensaios de determinação da resistência à compressão simples, foram efectuados ensaios de corte em compressão triaxial do tipo consolidado não drenado, com medição de pressões intersticiais, no *Laboratório de Solos da Universidade de Coimbra*.

Na fase de consolidação das amostras aplicou-se uma tensão vertical duas vezes superior à horizontal para simular as condições presentes “in situ”.

Foram identificadas incorrecções nos gráficos e as tabelas respectivas não foram fornecidas, motivo pelo qual não foi possível analisar os resultados.

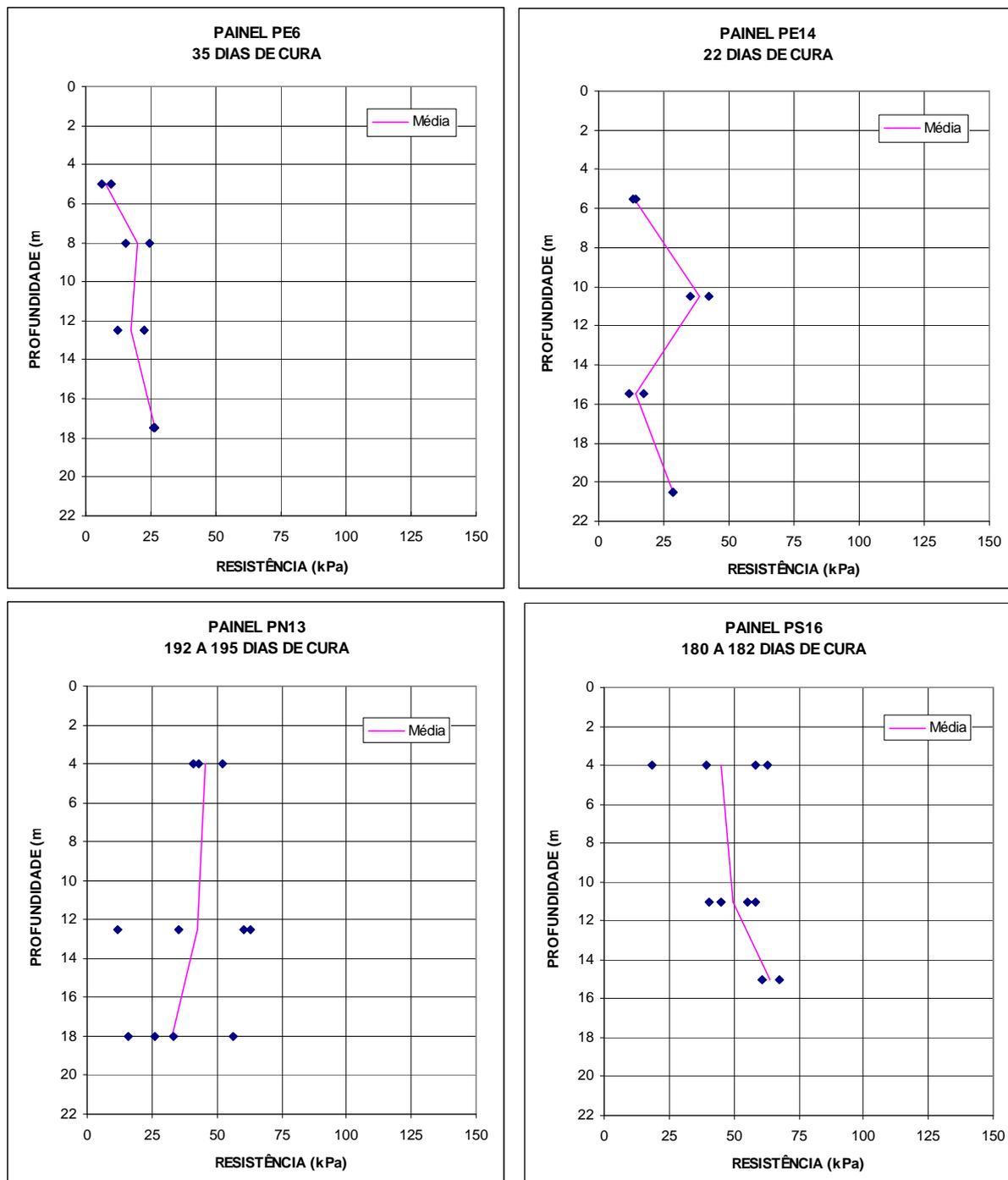


Fig. 25 – Controlo de qualidade na fase de exploração. Ensaios de compressão simples. Variação da resistência em profundidade.

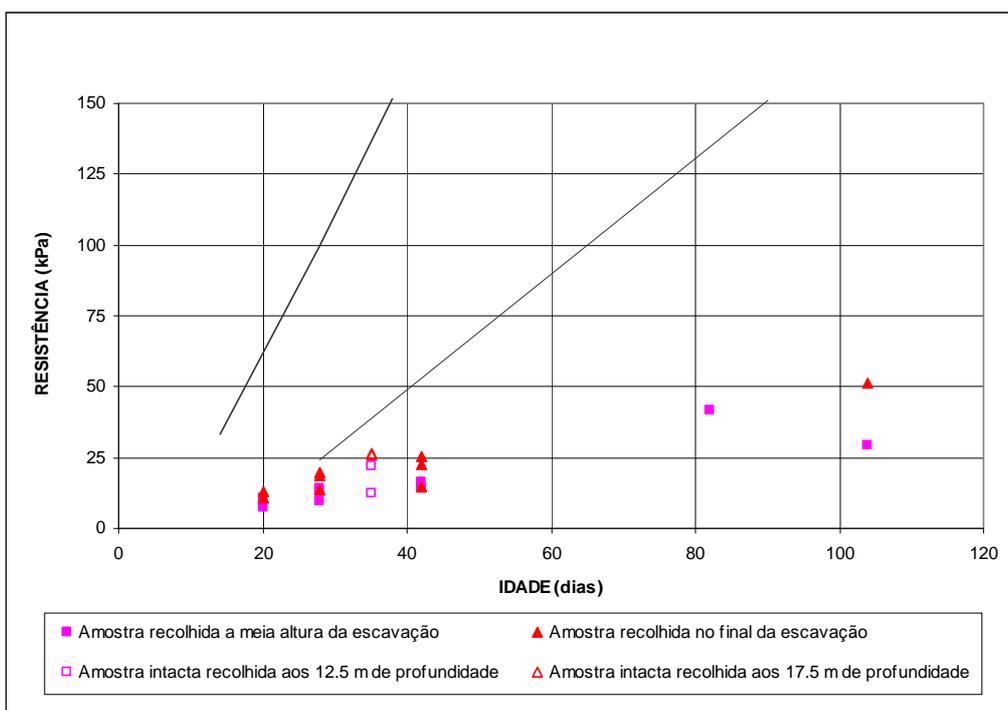


Fig. 26 – Resistência à compressão simples de amostras recolhidas na fase de escavação e durante a exploração. Comparação com os valores obtidos na fase de definição da composição da calda. Painel PE6.

5.2. RESULTADOS DOS ENSAIOS “IN SITU”

5.2.1. Sondagens na parede moldada

Em três painéis primários, designadamente, *PE16*, *PS16* e *PN13*, e num painel secundário, *PN2*⁶, realizaram-se sondagens com carotagem contínua, conforme representado na Foto 11. Estes trabalhos foram efectuados entre 22 de Maio e 11 de Julho de 2002, ou seja, cerca de três meses após a conclusão da parede e um mês após o reinício da bombagem.

A escolha dos painéis foi condicionada pela proximidade aos poços de captação. De acordo com o “Relatório Final de Obra”, admitia-se que os painéis mais próximos dos poços seriam aqueles com maior probabilidade de apresentarem problemas de integridade devido à influência da bombagem.

As amostras foram recolhidas em camisas de *PVC*, tendo sido parafinadas nos topos para manutenção das suas características. No Quadro 47 apresentam-se os valores de recuperação das amostras.

Nos painéis *PS16* e *PN13*, a recuperação foi quase total, frequentemente acima dos 95%, sendo excepção, um trecho entre os 15 e os 16 m de profundidade do painel *PS16*, com percentagens de 73 a 84%. Estes painéis foram construídos, respectivamente, a 24 e a 15 de Janeiro de 2002.

No painel *PN2* a recuperação de carotes foi nula entre 0 e 1 m de profundidade, entre 9 e 13 m, entre 17 e 20 m e entre 23 e 24 m de profundidade. Nos restantes trechos registaram-se, frequentemente, valores da ordem de 40 a 50%, e entre os 4 e os 5 m de profundidade, obteve-se uma recuperação quase total. A construção deste painel data de 19 de Fevereiro de 2002, tendo sido um dos últimos a ser concluído.

⁶ Os resultados referentes à sondagem realizada neste painel são provenientes do arquivo do Dono de Obra.



Foto 11 – Execução de uma sondagem num painel do Alinhamento Nascente.

Quadro 47 – Controlo de qualidade na fase de exploração. Percentagem de recuperação da carotagem efectuada nos painéis após a conclusão da obra.

PAINEL PE16		PAINEL PS16		PAINEL PN2		PAINEL PN13	
PROF. (m)	RECUPER. (%)	PROF. (m)	RECUPER. (%)	PROF. (m)	RECUPER. (%)	PROF. (m)	RECUPER. (%)
0,0	-	0,0	-	0,0	-	0,0	-
1,0	95	1,0	94	1,0	0	1,0	92
2,0	95	2,0	97	2,0	50	2,0	85
3,0	23	3,0	97	3,0	40	3,0	95
4,0	57	4,0	97	4,0	95	4,0	96
5,0	82	5,0	97	5,0	97	5,0	94
6,0	50	6,0	91	6,0	40	6,0	88
7,0	21	7,0	97	7,0	55	7,0	82
8,0	80	8,0	96	8,0	81	8,0	94
9,0	85	9,0	95	9,0	0	9,0	95
10,0	66	10,0	95	10,0	0	10,0	99
11,0	85	11,0	97	11,0	0	11,0	92
12,0	93	12,0	96	12,0	0	12,0	96
13,0	75	13,0	97	13,0	0	13,0	95
14,0	34	14,0	95	14,0	47	14,0	91
15,0	60	15,0	84	15,0	52	15,0	98
16,0	95	16,0	73	16,0	71	16,0	95
17,0	90	17,0	94	17,0	0	17,0	92
18,0	95			18,0	0	18,0	97
19,0	96			19,0	0	19,0	99
20,0	91			20,0	0	20,0	85
21,0	64			21,0	43		
22,0	93			22,0	50		
23,0	95			23,0	0		
24,0	96			24,0	0		
25,0	84						

O painel *PE16*, cuja construção data de 29 de Dezembro de 2001, constitui uma situação intermédia, com percentagens de recuperação de 21 a 93% entre os 3 e os 15 m de profundidade, sendo em média de 62%. A profundidade superior, as percentagens de recuperação atingiram, frequentemente, valores de 90 a 96%, tendo sido registados dois valores inferiores, um de 64% e um de 84%.

Numa tentativa de identificar os aspectos que justificam as diferenças na percentagem de recuperação das sondagens efectuadas nos quatro painéis, foram analisadas as características geológico-geotécnicas dos terrenos envolventes, os valores de perda de calda e de exsudação de cada um dos painéis e os valores da resistência dinâmica obtidos nos ensaios *PDL*. Dos aspectos analisados, apenas os resultados dos ensaios *PDL* são concordantes com a percentagem de recuperação das sondagens. De facto, é ao painel *PN2* que se associam os valores mais reduzidos de resistência dinâmica, tal como seria expectável, uma vez que este era o painel com o menor período de cura, à data da realização do ensaio. Com efeito, o ensaio *PDL* do painel *PN2* foi realizado 92 dias após a sua construção, enquanto que nos restantes este período foi superior a 133 dias. Tendo em consideração a reduzida resistência obtida nos ensaios de compressão simples e no ensaio *PDL*, considera-se provável que o menor período de cura contribua, por si só, para uma redução na percentagem de recuperação.

É de referir que após a execução dos painéis *PE16* e *PN2*, os negativos inseridos no seu interior perderam a verticalidade, facto que foi atribuído à bombagem e à respectiva circulação subterrânea da água. Na sequência desta ocorrência, os painéis foram reescavados, tendo-se procedido à substituição da calda e à introdução de novos negativos. Não existem registos posteriores de perda de verticalidade dos referidos negativos. Não obstante, considera-se que a anomalia identificada poderá ser indiciadora da susceptibilidade dos painéis a fenómenos de lavagem da calda.

Acresce que o sistema de bombagem foi reiniciado quatro meses após a conclusão do painel *PE16* e dois meses após a conclusão do painel *PN2*. A susceptibilidade à lavagem será tanto maior quanto menor for o período de cura da calda. Assim se compreende que, de entre os painéis analisados, é o painel *PN2* o mais afectado por este eventual fenómeno⁷.

Por último, é de referir que estes resultados poderão ter sido afectados por eventuais desvios da verticalidade da sondagem. De facto, a profundidade atingida pelos painéis é muito significativa, pelo que um desvio superior a 2% de uma sondagem executada no centro do painel com 20 m de altura seria suficiente para que a furação ocorresse no exterior do painel. Acresce que também os painéis poderão apresentar pequenos desvios em relação à vertical, facto que, nalguns casos pode agravar o problema. Os resultados estariam assim falseados. Supõe-se, porém, que a menos dos casos de recuperação nula, nos restantes é possível distinguir o material da parede do terreno, eliminando-se, assim, eventuais erros de interpretação.

Desconhece-se a forma como foi assegurada a verticalidade das sondagens.

5.2.2. Ensaios de penetração dinâmica ligeira

A determinação indirecta da resistência da parede moldada foi efectuada com base em ensaios de penetração dinâmica ligeira (*PDL*), conforme representado na Foto 12. Inicialmente, pretendia-se avaliar a resistência dos painéis primários de forma a estabelecer um intervalo mínimo entre a sua conclusão e o início da escavação dos painéis secundários. Este objectivo não foi concretizado. Os ensaios *PDL* foram efectuados alguns meses após a conclusão da construção da cortina, com vista à avaliação da sua integridade.

⁷ Não há dispositivos de observação suficientemente próximos do painel *PN2* que permitissem identificar as consequências destes resultados em termos de eventuais passagens de água.



Foto 12 – Realização de um ensaio *PDL* num painel do Alinhamento Nascente, a 26 de Fevereiro de 2002.

As características do penetrómetro utilizado foram as seguintes:

- Diâmetro do cone 35,6 mm
- Diâmetro das varas 22,0 mm
- Peso do cone 0,14 kg
- Peso das varas 2,9 kg
- Peso do pilão 10,4 kg
- Peso da guia do pilão 15,9 kg
- Altura de queda do pilão 0,5 m

Os gráficos de profundidade versus resistência dinâmica são apresentados no Anexo.

Para a análise dos resultados, é fundamental conhecer o período de cura da calda à data de realização dos ensaios *PDL*. Estes dados são apresentados no Quadro 48 ao Quadro 51.

Quadro 48 – Controlo de qualidade na fase de exploração. Datas de realização dos ensaios *PDL* e correspondentes períodos de cura dos painéis do Alinhamento Nascente.

PAINEL	DATA DE EXECUÇÃO DO PAINEL	DATA DE REALIZAÇÃO DO ENSAIO	PERÍODO DE CURA (dias)
PE1	2002/02/27	2002/05/29	91
PE3	2002/02/27	2002/06/19	112
PE4B	2002/02/13	2002/06/03	164
PE4	2001/12/21	2002/06/19	126
PE5	2002/02/09	2002/06/03	114
PE7	2002/02/08	2002/06/19	131
PE9	2002/02/08	2002/06/19	131
PE10	2001/12/18	2002/06/03	167
PE11	2002/02/07	2002/06/03	116
PE13	2002/02/06	2002/06/20	134
PE15	2002/02/05	2002/06/20	135
PE16	2001/12/29	2002/06/04	157
PE17	2002/02/21	2002/06/04	103
PE18	2001/12/13	2002/02/25	74
PE19	2002/01/31	2002/06/20	140
PE21	2002/02/01	2002/06/20	139
PE22	2001/12/21	2002/02/26	67
		2002/06/12	173
PE23	2002/02/22	2002/06/04	102
PE25	2002/02/05	2002/06/20	135
PE26	2002/01/04	2002/06/05	152
PE27	2002/02/25	2002/06/05	100
PE29	2002/02/21	2002/06/20	119
PE31	2002/02/20	2002/06/21	121
PE33	2002/02/19	2002/06/05	106
PE34	2002/01/03	2002/06/05	153
PE35	2002/02/20	2002/06/21	121
PE37	2002/02/19	2002/06/21	122
PE39	2002/02/19	2002/06/06	107
PE40	2002/01/10	2002/06/06	147
PE41	2002/02/18	2002/06/21	123
PE42	2002/02/15	2002/06/24	129

Quadro 49 – Controlo de qualidade na fase de exploração. Datas de realização dos ensaios *PDL* e correspondentes períodos de cura dos painéis do Alinhamento Sul.

PAINEL	DATA DE EXECUÇÃO DO PAINEL	DATA DE REALIZAÇÃO DO ENSAIO	PERÍODO DE CURA (dias)
PSE	2002/01/17	2002/06/06	140
PS1	2002/02/07	2002/06/06	119
PS3	2002/02/07	2002/06/24	137
PS5	2002/02/05	2002/06/24	139
PS6	2002/01/10	2002/06/11	152
PS7	2002/02/05	2002/06/07	122
PS9	2002/02/08	2002/06/24	136
PS11	2002/02/08	2002/06/24	136
PS12	2002/01/22	2002/06/07	136
PS13	2002/02/09	2002/06/07	118
PS15	2002/02/13	2002/06/11	118
PS16	2002/01/24	2002/06/11	138
PS17	2002/02/18	2002/06/24	126
PS19	2002/02/21	2002/06/25	124

Quadro 50 – Controlo de qualidade na fase de exploração. Datas de realização dos ensaios *PDL* e correspondentes períodos de cura dos painéis do Alinhamento Poente.

PAINEL	DATA DE EXECUÇÃO DO PAINEL	DATA DE REALIZAÇÃO DO ENSAIO	PERÍODO DE CURA (dias)
PW1	2002/02/04	2002/06/12	128
PW2	2002/02/22	2002/06/12	110
PW4	2002/02/13	2002/06/25	132
PW6	2002/02/14	2002/06/25	131
PW7	2002/01/28	2002/06/12	135
PW8	2002/02/18	2002/06/12	114
PW10	2002/02/25	2002/06/25	120
PW12	2002/02/25	2002/06/13	108
PW13	2002/02/06	2002/06/13	127

Quadro 51 – Controlo de qualidade na fase de exploração. Datas de realização dos ensaios *PDL* e correspondentes períodos de cura dos painéis do Alinhamento Norte.

PAINEL	DATA DE EXECUÇÃO DO PAINEL	DATA DE REALIZAÇÃO DO ENSAIO	PERÍODO DE CURA (dias)
PNE	2002/01/24	2002/05/29	125
PN2	2002/02/19	2002/05/22	92
PN3	2002/01/02	2002/05/22	140
PN4	2002/02/19	2002/05/23	93
PN5	?	2002/05/24	?
PN6	2002/02/18	2002/05/24	95
PN7	2002/01/18	2002/05/25	127
PN8	2002/02/26	2002/05/25	88
PN9	2002/01/09	2002/05/27	138
PN10	2002/02/15	2002/05/27	101
PN11	2002/01/11	2002/05/27	136
PN12	2002/02/19	2002/05/27	97
PN13	2002/01/15	2002/05/28	133
PN14	2002/02/13	2002/05/28	104

Conforme se constata pela análise dos referidos quadros, os ensaios *PDL* foram efectuados sobre painéis com períodos de cura muito distintos, sobretudo nos Alinhamentos Nascente e Norte, onde este parâmetro variou entre 67 e 173 dias. Este facto dificulta a análise comparativa dos resultados, já que a resistência da calda aumenta com o período de cura, conforme foi possível verificar nos ensaios de laboratório. Aliás, esta influência é perfeitamente visível nos resultados dos dois ensaios *PDL* efectuados no painel *PE22*, o primeiro aos 67 dias e o segundo aos 173 dias de cura (ver Fig. A5 do Anexo).

Outro aspecto a ter em consideração na análise dos resultados, diz respeito à localização do ensaio *PDL* na secção transversal da parede.

Com efeito, e de acordo com um texto fornecido pela empresa *TEIXEIRA DUARTE S.A.*, de autor desconhecido, em terrenos permeáveis não injectáveis com caldas de cimento-bentonite (areias e areias finas) – $10^{-6} \text{ m/s} < k < 5 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ – a calda perde parte da sua água ao contactar com a parede da vala. Este fenómeno conduz a um espessamento da calda no contacto com a parede e ao aumento do seu teor em cimento. Os diferentes ensaios realizados mostram que a zona de espessamento, seja qual for a pressão instalada (isto é, nos limites da profundidade máxima usual) é da ordem de 0,3 m. Isto significa que a composição da calda não será homogénea em toda a secção transversal da parede. No exterior da secção a calda será rica em cimento, diminuindo progressivamente para o centro até atingir uma composição idêntica à da calda inicial. Tendo em

consideração os resultados da prospecção geológico-geotécnica, admite-se que esta situação poderá ter ocorrido nalguns trechos da cortina.

Ainda de acordo com o citado texto, em terrenos impermeáveis (areias finas argilosas e siltes) – $k < 10^{-6}$ m/s – a perda de água é reduzida ou mesmo nula. A calda final terá praticamente as mesmas características da calda de base. Já no que se refere a terrenos muito permeáveis injectáveis com calda de cimento e bentonite – $k > 5 \times 10^{-3}$ m/s – constata-se que a calda penetra no terreno envolvente, numa menor ou maior distância, assegurando, ao final de algum tempo, a estanqueidade das paredes da vala. Fica-se assim com uma situação idêntica à dos terrenos impermeáveis em que as características finais da calda praticamente não sofrem alterações relativamente às caldas de base.

Uma vez que podem existir alterações na resistência do material na secção transversal do painel, é essencial manter a verticalidade do ensaio para que os resultados sejam comparáveis. Por outro lado, a falta de verticalidade poderá conduzir à realização dos ensaios no exterior da parede moldada, ou seja no terreno adjacente. No caso particular do ensaio *PDL*, a não visualização do material impede o despiste deste problema, ao contrário do que acontece com as sondagens.

Apesar dos condicionalismos assinalados, apresentam-se subseqüentemente algumas conclusões sobre os resultados obtidos.

- Em todos os alinhamentos da cortina foram registados valores reduzidos de resistência dinâmica (inferiores a 500 kPa). Porém, é nos alinhamentos Nascente e Norte que se registam as situações mais críticas, designadamente nos painéis *PE3A* (112 dias de cura), *PE4* (164 dias de cura), *PE7* (131 dias de cura), *PE19* (140 dias de cura), *PE21* (139 dias de cura), *PE25* (135 dias de cura) e *PN3* (140 dias de cura). Nesta síntese excluíram-se os painéis com períodos de cura inferiores a 112 dias. Para os mesmos valores de resistência dinâmica, são mais graves as situações correspondentes a períodos de cura superiores.
- No Alinhamento Nascente, os valores mais reduzidos de resistência dinâmica estão associados à camada de aterros e de solos lodosos, até profundidades variáveis de 5 a 16 m.
- No Alinhamento Norte, os menores resultados dos ensaios *PDL* associam-se à camada de aterro e de solos lodosos, mas também às formações constituídas por areias, areões e cascalheiras e à formação margo-calcária, sendo que os valores mais baixos de resistência dinâmica foram registados nestas últimas. É este o caso do trecho entre os 21 e os 24 m de profundidade do painel *PN3*, do trecho entre os 16 e os 23 m de profundidade do painel *PN4*, e do trecho entre os 16 e os 20 m de profundidade do painel *PN10*.
- Nos Alinhamentos Sul e Poente registaram-se valores reduzidos da resistência dinâmica em três painéis – *PS3* (137 dias de cura), *PS7* (122 dias de cura) e *PW13* (127 dias de cura) –, sempre associados às camadas de areias grosseiras a médias, areões e cascalheiras. Nestes alinhamentos não ocorrem solos lodosos ou a sua expressão é reduzida.
- A análise da informação disponível não permitiu estabelecer uma relação entre a resistência dinâmica do material e as características geológico-geotécnicas dos terrenos adjacentes, ou entre aquela e a percentagem de perda de calda e a percentagem de exsudação. De facto, painéis adjacentes com as mesmas características e idêntico período de cura apresentam diferentes resultados de ensaios *PDL*.
- Em termos médios, é às formações mais superficiais (aterros e solos lodosos) que se associam os menores valores de resistência dinâmica. Tal facto resulta de diversos factores. Por um lado a incorporação de solo fino na calda pode reduzir a sua resistência mecânica e atrasar a sua evolução, por outro lado, o fenómeno de filtração é praticamente inexistente devido à reduzida permeabilidade dos solos envolventes, pelo que o adensamento da calda é mais reduzido. Sobretudo, quanto menor é a

profundidade, menor é a tensão de consolidação a que a calda está sujeita, menor é o adensamento e, conseqüentemente, menor é a resistência.

- Também em termos médios, conclui-se que a maior resistência superficial do material dos painéis localizados nos Alinhamentos Sul e Poente, poderá estar relacionada com a maior percentagem de volume de calda perdida e de exsudação registadas nestes painéis. Com efeito, houve necessidade de adicionar calda fresca aos painéis, calda essa que terá ficado menos contaminada por solo, uma vez que o processo da escavação já estaria concluído. A menor contaminação da calda poderá traduzir-se por uma resistência superior. Acresce que a capacidade de filtração das formações ocorrentes nestes alinhamentos é superior e, como tal, maior o adensamento da calda e maior a sua resistência.

A comparação dos resultados dos ensaios *PDL* com os resultados dos ensaios de compressão simples efectuados sobre provetes recolhidos na parede moldada após a sua execução, apenas pôde ser feita para os painéis *PS16* e *PN13*. Nos painéis *PE6* e *PE14* não foram realizados ensaios *PDL* e, no painel *PE16*, os ensaios de compressão simples foram realizados sobre uma única amostra. É de sublinhar que esta análise é apenas qualitativa, uma vez que os períodos de cura à data de realização dos ensaios *PDL*, e os períodos de cura das amostras submetidas a ensaios de compressão simples diferem em cerca de 50 dias. Na Fig. 27 apresentam-se os gráficos respectivos.

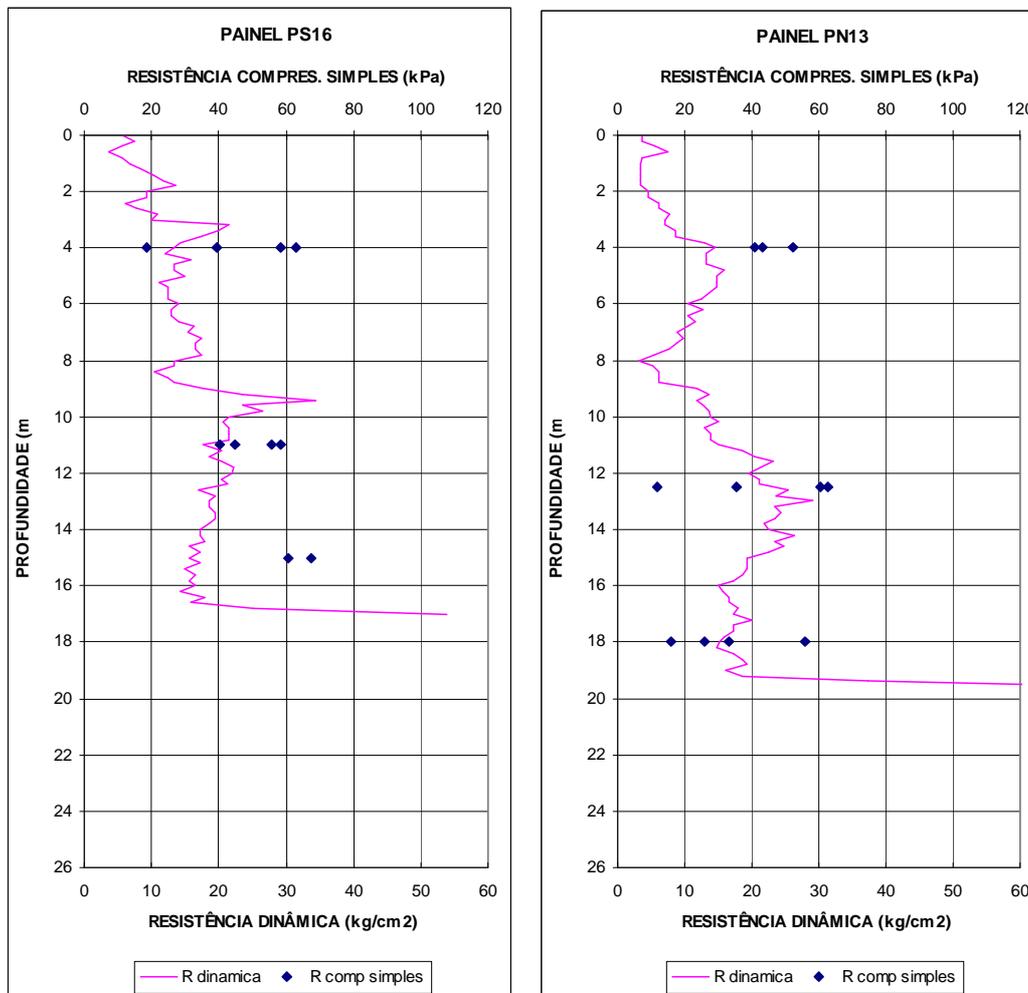


Fig. 27 – Controlo de qualidade na fase de exploração. Comparação dos resultados dos ensaios de compressão simples e dos ensaios *PDL*.

Conforme se conclui, a dispersão dos resultados dos ensaios de compressão simples não permite definir uma tendência de evolução da resistência em profundidade.

Por último é de referir que, de acordo com o “Relatório Final de Obra”, o Empreiteiro optou pela realização de uma cortina de *jet grouting* unidireccional no tardo de parte da parede. Esta decisão foi tomada face à constatação de heterogeneidades na resistência do material e sobretudo face à fraca resistência de algumas zonas, apesar de, aparentemente, a permeabilidade da calda assegurar o bom comportamento da cortina.

5.2.3. Poços de prospecção

De acordo com o “Relatório Final de Obra” foi aberto um poço junto ao painel *PE6* para observação da zona mais superficial da parede e para determinar a profundidade das fendas de retracção. Não foram disponibilizadas fotografias nem qualquer tipo de informação sobre os resultados obtidos.

5.2.4. Ensaio de bombagem

Na determinação dos caudais percolados para o interior do recinto após a execução da cortina periférica, recorreu-se a ensaios de bombagem. Os ensaios foram realizados em dois períodos distintos, um imediatamente a seguir à conclusão da parede e antes da realização da cortina de estanqueidade do maciço subjacente, e o segundo após a conclusão do tratamento por injeção.

Antes do início da obra, o caudal bombeado para rebaixamento do nível freático e que permitia colocar a seco a zona do claustro era de 850 m³/hora⁸. É de salientar que ainda assim existiam ressurgências localizadas nalguns pontos do claustro.

Após a conclusão da parede moldada e antes da realização do tratamento por injeção, foi efectuado um ensaio de bombagem com três patamares de rebaixamento, tendo-se obtido os seguintes caudais:

- 1º patamar: rebaixamento de 1,3 m, da cota 17,8 m para a cota 16,5 m: 70 m³/hora;
- 2º patamar: rebaixamento de 2,8 m, da cota 17,8 m para a cota 15,0 m: 134 m³/hora;
- 3º patamar: rebaixamento de 4,8 m, da cota 17,8 m para a cota 13,0 m: 175 m³/hora.

Após o tratamento por injeção do maciço subjacente à parede moldada, os ensaios de bombagem tiveram os seguintes resultados:

- O rebaixamento de 4,8 m, da cota 17,8 m para a cota 13,0 m conduziu a um caudal de bombagem de 150 m³/hora;
- A manutenção do caudal de bombagem em 150 m³/hora permitiu eliminar as ressurgências e rebaixar o nível freático para a cota 12,0 m, tendo estabilizado naquele nível.

O valor de caudal obtido é da ordem de 17,6% do valor medido antes da realização da cortina, um pouco superior ao valor previsto no projecto, de 11% para um desnível hidráulico de 4 m e de 14% para um desnível de 5 m. A eficiência da parede moldada na redução da percolação é superior à eficiência da cortina de injeção.

5.3. RESULTADOS DA OBSERVAÇÃO

5.3.1. Descrição do sistema de observação instalado

O Plano de Observação definido no Projecto-Base (item 2.5) terá sido objecto de alteração durante a execução da obra. Dos dispositivos de observação previstos não terão sido instalados os seguintes:

- os inclinómetros *IP1*, *IP8* e *IP10*;

⁸ Foram encontradas referências a valores de caudal bombado antes do início da obra de 500 m³/hora a 3600 m³/hora em diferentes documentos.

- a totalidade das bases de alongâmetros;
- os piezómetros na zona exterior da cortina, com as seguintes designações: *PHE3*, *PHE7.3* e *PHE8.3*;
- os piezómetros na zona interior da cortina com as seguintes designações: *PHI2*, *PHI4.3*, *PHI5.3*, *PHI11*, *PHI12.3*, *PHI13*, *PHI14.3* e *PHI15*.

Dos dispositivos efectivamente instalados, parte deixou de estar acessível, e outra foi inutilizada, conforme se constatou durante a visita à zona do mosteiro efectuada a 19 de Setembro de 2007. Efectivamente, as obras realizadas nas áreas adjacentes ao mosteiro, primeiro no âmbito do programa *POLIS* e posteriormente para construção de um museu, foram responsáveis pela destruição e/ou pela obstrução de um número significativo de dispositivos de observação, conforme descrito subseqüentemente:

- o tubo inclinométrico *IP7* não foi encontrado; admite-se que o mesmo tenha sido obturado durante a construção do muro exterior, fundado sobre a cortina;
- o tubo inclinométrico *IP11* ficou inacessível devido à construção de um passadiço sobre a cortina, no âmbito do programa *POLIS*;
- os piezómetros *PHE1* não foram encontrados; admite-se que tenham ficado soterrados pelo aterro de acesso ao passadiço, construído no âmbito do programa *POLIS*;
- os piezómetros *PHE4* não foram encontrados; admite-se que tenham sido soterrados pelo acesso aberto para a construção do muro exterior, fundado sobre a cortina;
- os piezómetros *PHE5* ficaram inacessíveis devido à construção, sobre os mesmos, de um aterro provisório, que se prevê manter no arranjo final da área, embora a cota inferior;
- os piezómetros *PHE8* não foram encontrados; admite-se que tenham ficado soterrados pelo aterro de acesso ao passadiço, construído no âmbito do programa *POLIS*;
- os piezómetros *PHI3* não foram encontrados; admite-se que tenham sido soterrados pelo acesso aberto para a construção do muro exterior, fundado sobre a cortina;
- os piezómetros *PHI4* foram destruídos durante a realização das obras do museu;
- os piezómetros *PHI6* não foram encontrados; admite-se que tenham sido soterrados durante a abertura de um acesso;
- os piezómetros *PHI7* não foram encontrados; admite-se que tenham sido soterrados pelo acesso aberto para a construção do muro exterior, fundado sobre a cortina;
- os piezómetros *PHI8* ficaram inacessíveis devido à construção, sobre os mesmos, de um aterro provisório, que se prevê manter no arranjo final da área, embora a cota inferior;
- os piezómetros *PHI9* não se encontravam acessíveis;
- a base da manilha onde se encontram a bocas dos piezómetros *PHI10* foi preenchida por argamassa;
- os piezómetros *PHI12* não foram encontrados; no local foram depositados blocos de pedra que dificultaram a identificação destes dispositivos.

No Quadro 52 ao Quadro 54 apresentam-se as características dos dispositivos instalados durante a realização da cortina, cuja localização é apresentada no Des. 7. Nos mesmos quadros identifica-se o estado dos dispositivos à data da visita de 19 de Setembro de 2007, durante a qual foram aferidos os comprimentos dos piezómetros, cujas alterações relativamente aos valores constantes do “Relatório de Instrumentação” estão assinaladas a cor vermelha.

Desconhece-se o estado das células dinamométricas colocadas nalgumas ancoragens da parede moldada tradicional. Estas células não foram objecto de leitura em nenhuma das campanhas efectuadas.

Quadro 52 – Características dos tubos inclinométricos.

DESIGNAÇÃO	PAINEL	COMPRIMENTO (m)	ESTADO À DATA DA VISITA DE 2007/09/19
IP2	PN18	20,0	Em bom estado.
IP3	PW47	20,0	Em bom estado.
IP4	PW41	21,0	Em bom estado.
IP5	PW35	19,0	Em bom estado.
IP6	PW22	22,0	Em bom estado.
IP7	PW5	20,0	Não foi encontrado.
IP9	PE20	26,0	Em bom estado.
IP11	PE4B	24,8	O dispositivo está inacessível.

Quadro 53 – Características dos piezómetros instalados na zona exterior do recinto.

DESIGNAÇÃO	PAINEL	COTA DA BOCA	COMPRIM. (m)	FORMAÇÃO GEOLÓGICA (em que se insere ponteira)	ESTADO À DATA DA VISITA DE 2007/09/19
PHE1	PN9	18,58	13,5	Cascalheiras argilosas.	Não foram encontrados.
			27,5	Formação margo-calcária.	
PHE2	PW34	19,58	9,9	Cascalheiras e areões argil.	-
			23,15	Formação margo-calcária.	
PHE4	PW5	18,49	10,5	Areões com seixos.	Não foram encontrados.
			24,0	Formação margo-calcária.	
PHE5	PS9	18,60	11,5	Areões com seixos.	Inacessíveis.
			23,5	Formação margo-calcária.	
PHE6	PE20	18,62	19,5	Areões cascalheiras +/- argil.	-
			30,5	Formação margo-calcária.	
PHE7	PE36	18,50	11,3	Seixos com argila arenosa.	-
			23,9	Formação margo-calcária.	
PHE8	PE4A-PE4B	18,53	21,5	Cascalheiras +/- argilosas.	-
			29,5	Formação margo-calcária.	

Quadro 54 – Características dos piezómetros instalados na zona interior do recinto.

DESIGNAÇÃO	PAINEL	COTA DA BOCA	COMPRIM. (m)	FORMAÇÃO GEOLÓGICA (em que se insere ponteira)	ESTADO À DATA DA VISITA DE 2007/09/19
PHI1	PN9	18,36	13,95	Cascalheiras argilosas.	-
			21,40	Formação margo-calcária.	
PHI3	PN19	19,03	12,5	Cascalheiras.	Não foram encontrados.
			23,5	Formação margo-calcária.	
PHI4	PW34	18,98	13,0	Cascalheiras argilosas.	Foram destruídos.
			26,0	Formação margo-calcária.	
PHI5	PW22	19,03	13,0	Areia grosseira com seixos.	Não foram encontrados.
			26,5	Formação margo-calcária.	
PHI6	PW11	17,98	13,0	Areões com cascalheiras.	Não foram encontrados.
			27,0	Formação margo-calcária.	
PHI7	PW5	18,40	10,5	Areões com seixos.	Não foram encontrados.
			24,0	Formação margo-calcária.	
PHI8	PS9	18,43	11,5	Areões com seixos.	Os dispositivos estão inacessíveis.
			23,5	Formação margo-calcária.	
PHI9	PE36	18,40	13,0	Areia gros. argilosa c/ seixos.	Os dispositivos estão inacessíveis.
			25,5	Formação margo-calcária.	
PHI10	PE20	18,56	19,0	Areões cascalheiras +/- argil.	-
			30,3	Formação margo-calcária.	
PHI12	PE10	18,64	17,0	Cascalheira argilosa (?)	Não foram encontrados.
			29,5	Formação margo-calcária.	
PHI14	PE4B	18,56	21,75	Cascalheiras +/- argilosas.	-
			30,90	Formação margo-calcária.	
PHI16	PE26	18,05	15,25	Cascalheiras +/- argilosas (?)	-
			27,95	Formação margo-calcária.	

5.3.2. Análise dos resultados da observação

No que se refere aos tubos inclinométricos, dispõe-se apenas de duas leituras, uma efectuada a 20 de Novembro de 2002 e outra a 18 de Dezembro do mesmo ano. Na campanha de 2007 foi efectuada uma nova medição, mas que, devido à mudança de sonda, apenas serve como referência para leituras posteriores.

A análise dos gráficos constantes do “Relatório de Instrumentação” elaborado pela empresa *TEIXEIRA DUARTE S.A.* permitiu identificar a ocorrência de deformações dos tubos inclinométricos, na direcção transversal à cortina, em quatro dispositivos: *IP2*, *IP3*, *IP6* e *IP9*. Dos quatro tubos inclinométricos mencionados, apenas o *IP9* se encontra instalado no interior da parede moldada auto-endurecedora.

A magnitude dos deslocamentos registados nos tubos inclinométricos foi reduzida, não ultrapassando os 5 mm, para um desnível hidráulico de 4,97 m, valor bastante inferior ao determinado na fase de projecto, de 31 mm para 4 m de desnível hidráulico e de 50 mm para 6 m de desnível hidráulico.

Supõe-se que à data da leitura de referência dos dispositivos, os níveis de água no interior e no exterior do recinto seriam praticamente coincidentes, hipótese que resulta da análise da evolução dos piezómetros *PHE4* e *PHI7* (Fig. 33). Na leitura subsequente, efectuada a 20 de Novembro de 2002, o nível de água no interior do recinto desceu para cerca da cota 14,45 m, mantendo-se o exterior cerca da cota 17,7 m. Na segunda leitura, efectuada a 18 de Dezembro de 2002, o nível de água exterior ter-se-á mantido à mesma cota, enquanto que na zona interior do recinto ocorreu um rebaixamento de cerca de 1,82 m, para a cota 12,63 m. Este desnível hidráulico terá sido responsável pela deformação da parede moldada registada nos tubos inclinométricos. Em conformidade com o aumento da solicitação, a deformação dos tubos inclinométricos aumentou da primeira leitura para a segunda.

Dos 5 tubos inclinométricos instalados na parede moldada tradicional, apenas dois não sofreram deformações (*IP4* e *IP5*). Relativamente ao tubo inclinométrico *IP4*, verifica-se que o trecho da parede em que se encontra instalado está contraventado, na direcção perpendicular ao seu desenvolvimento, pelo trecho *F1-G1*. Efeito semelhante poderá ter o trecho *F1-E1* sobre as deformações do trecho *F1-G1*, onde se insere o tubo inclinométrico *IP5*. Outros factores, como as características geológico-geotécnicas dos terrenos envolventes têm obviamente influência sobre as deformações da parede moldada. Assim, comparando os resultados dos ensaios *SPT*, efectuados na sondagem mais próxima do tubo inclinométrico *IP3* (*S8,97*), com os resultados dos ensaios efectuados na sondagem adjacente ao inclinómetro *IP5* (*S7,97*) conclui-se que, no primeiro caso, os terrenos apresentam menor resistência até profundidades superiores (N_{SPT} de 4, 5, 3, 3 e 8, até 8,5 m de profundidade, na *S8,97*, e N_{SPT} de 20, 2 e 16, até 6,8 m de profundidade, na *S7,97*), facto que contribui para a maior deformação da parede moldada no trecho em que o tubo inclinométrico *IP3* se encontra instalado.

No que se refere aos tubos inclinométricos instalados na parede moldada auto-endurecedora, foram identificados os seguintes factores com influência sobre os resultados obtidos:

- No piezómetro *PHI14*, instalado na proximidade do tubo inclinométrico *IP11*, na zona interior do recinto, o nível de água medido na camada de cascalheiras foi superior em cerca de 1 a 2 m aos níveis medidos na proximidade dos tubos inclinométricos *IP7* e *IP9*, ou seja, o desnível hidráulico a que a parede moldada estaria sujeita naquele local era inferior, o que justifica as menores deformações deste dispositivo.
- No painel *PE20*, onde se encontra instalado o tubo inclinométrico *IP9*, foram recolhidas amostras que foram objecto de ensaios de compressão simples (ver item 4.7.3). De entre todas as amostras ensaiadas, as recolhidas neste painel são as que apresentam os menores valores de resistência e os maiores valores de deformabilidade, facto que justifica as maiores deformações deste painel. É de salientar que neste painel não foi realizado nenhum ensaio *PDL*.

- O ensaio *PDL* realizado no painel *PE4B*, onde se insere o tubo inclinométrico *IP11*, revelou valores de resistência dinâmica da ordem de 500 kPa até aos 6 m de profundidade, e superiores a 1 MPa, a partir daí. Comparando com os resultados de ensaios efectuados noutros painéis, conclui-se que, apesar de reduzidos, estes valores são superiores à média dos valores obtidos noutros trechos de parede moldada. É de referir que o ensaio foi concluído aos 10 m de profundidade, tendo sido realizado 164 dias após a construção do painel.
- No painel *PW5*, onde se insere o tubo inclinométrico *IP7*, não foi realizado nenhum ensaio *PDL*, nem recolhidas amostras para ensaios de laboratório. Não obstante, todos os ensaios *PDL* efectuados no Alinhamento Poente são caracterizados por valores médios superiores aos resultados dos ensaios efectuados nos restantes alinhamentos, pelo que se admite idêntico comportamento para o referido painel, facto que também contribui para as menores deformações registadas no dispositivo *IP7*, por comparação com o *IP9*.

Na Fig. 28 à Fig. 35 apresenta-se a evolução dos níveis piezométricos entre 31 de Outubro de 2002 e 10 de Janeiro de 2003, cerca de 8 a 10 meses após a conclusão da construção da cortina. Neste período não foram efectuadas medições do nível de água na albufeira do Açude-Ponte de Coimbra⁹. Porém, os valores de variação mínimos e máximos do nível de água na albufeira correspondentes ao nível mínimo de exploração (*Nme*) e ao nível de máxima cheia (*NMC*) são representados nos gráficos respectivos. Relativamente ao nível de água no interior do recinto, desconhece-se qual foi o procedimento utilizado na sua determinação.

Sempre que possível, apresentam-se na mesma figura os resultados do par de piezómetros que definem um perfil transversal à cortina.

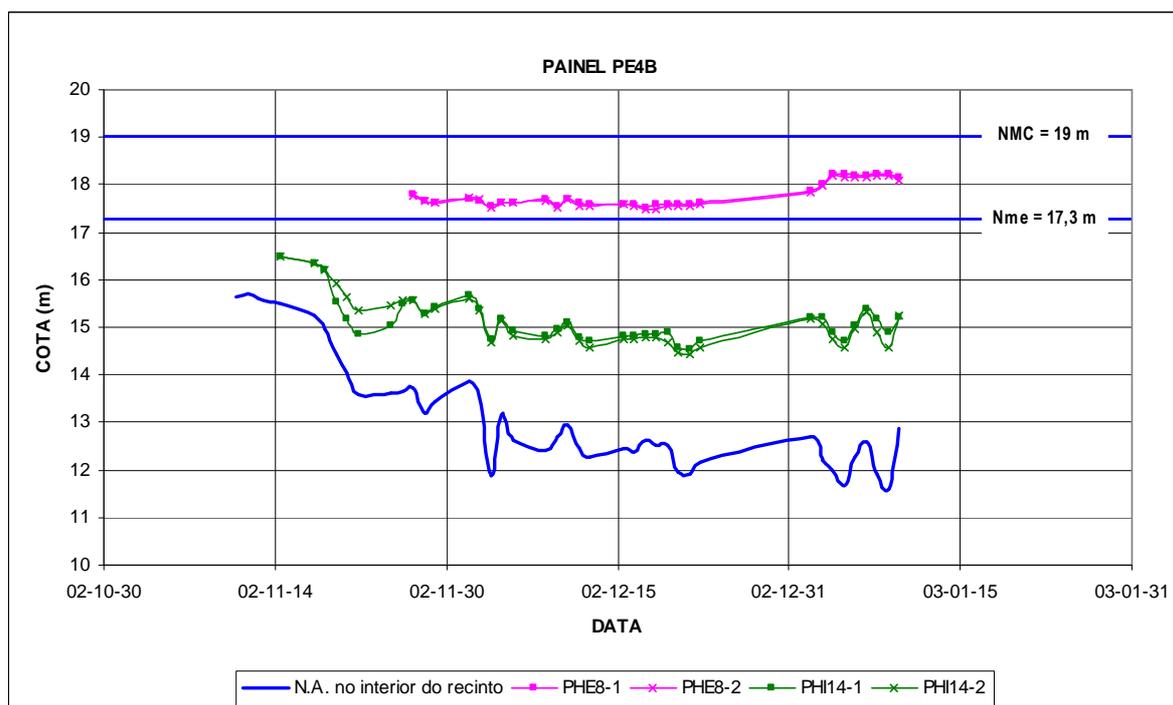


Fig. 28 – Evolução dos níveis de água nos piezómetros *PHE8* e *PHI14*.

⁹ O registo disponibilizado pelo Instituto da Água limita-se a um pequeno período anterior à execução da obra.

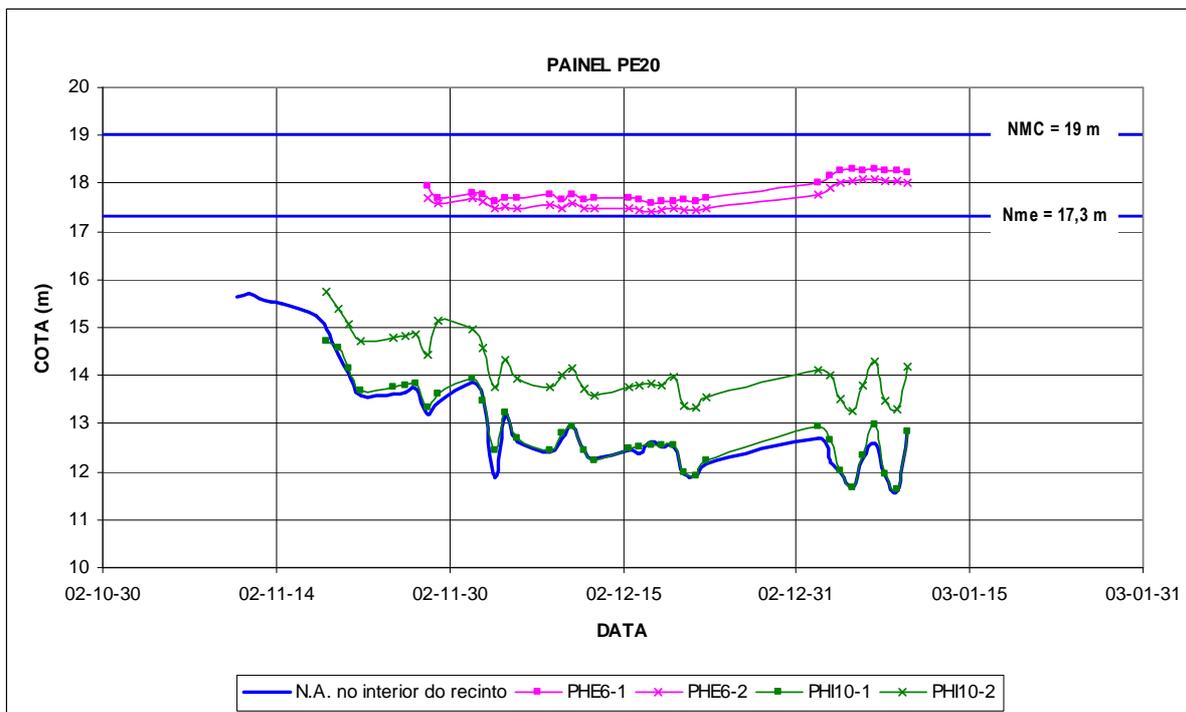


Fig. 29 – Evolução dos níveis de água nos piezômetros *PHE6* e *PHI10*.

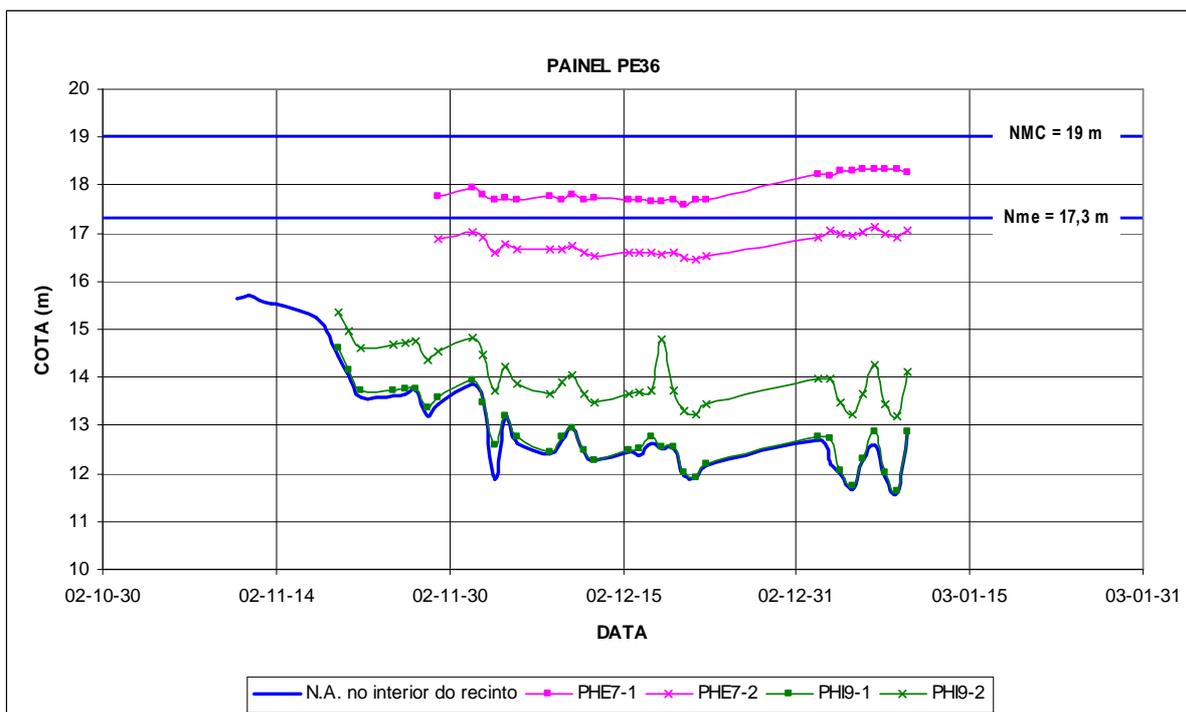


Fig. 30 – Evolução dos níveis de água nos piezômetros *PHE7* e *PHI9*.

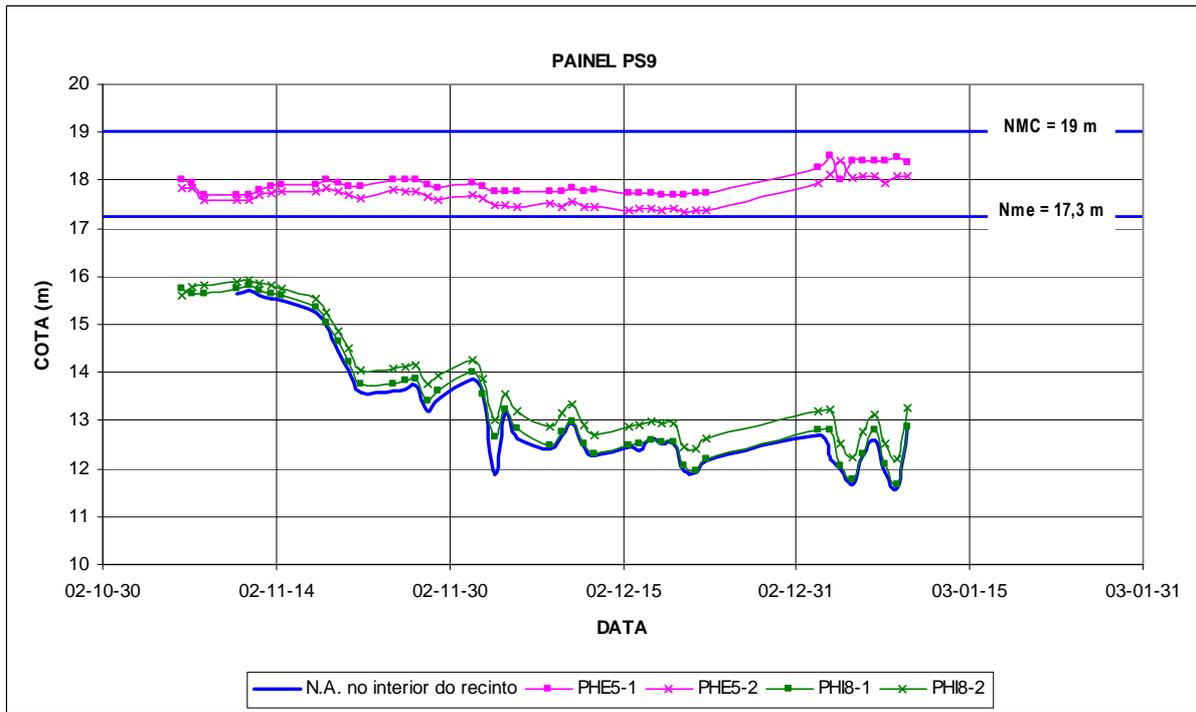


Fig. 31 – Evolução dos níveis de água nos piezômetros *PHE5* e *PHI8*.

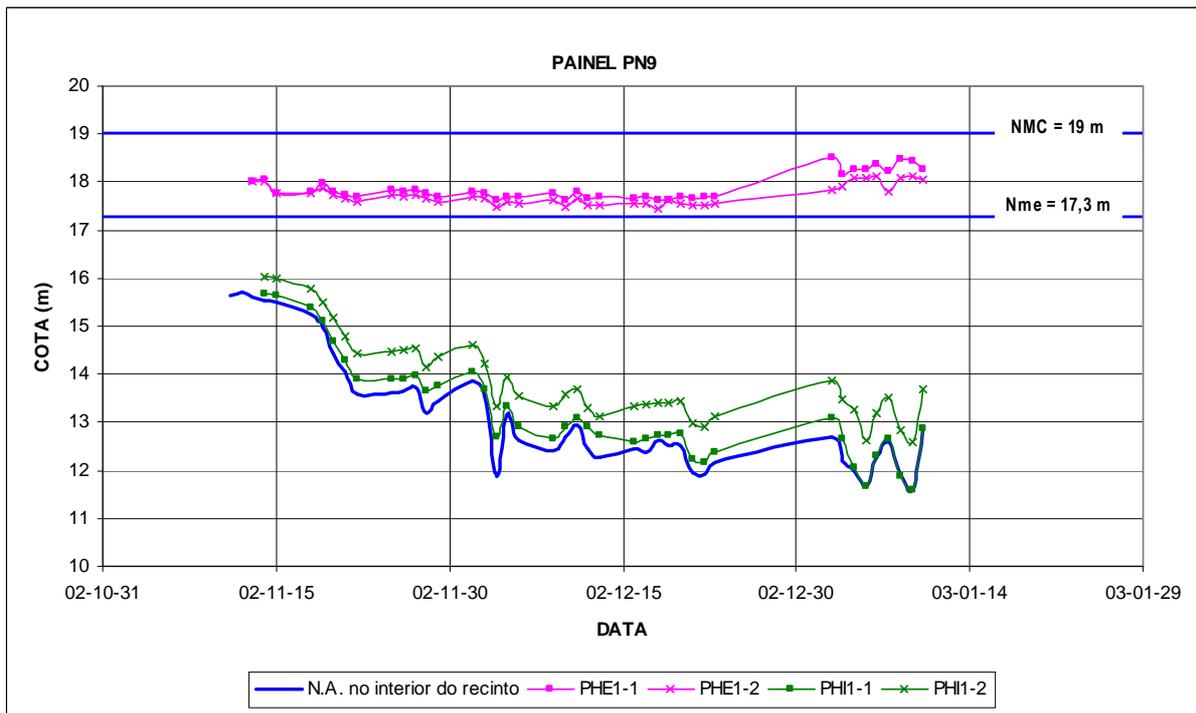


Fig. 32 – Evolução dos níveis de água nos piezômetros *PHE1* e *PHI1*.

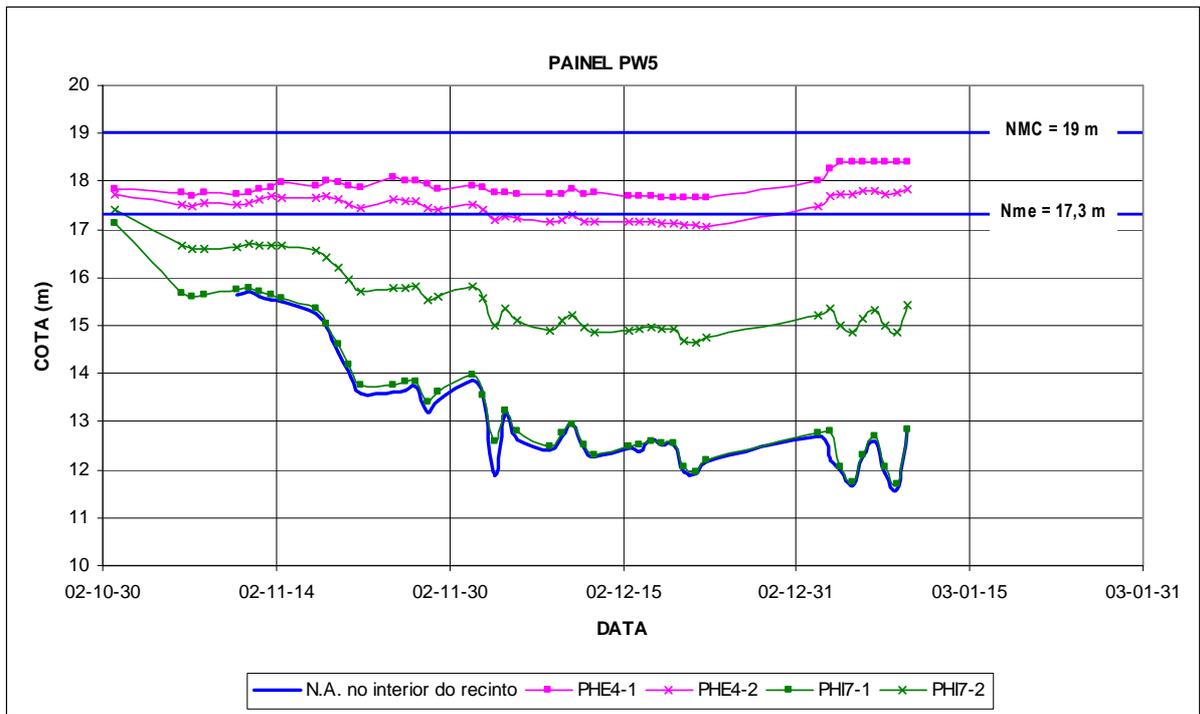


Fig. 33 – Evolução dos níveis de água nos piezômetros *PHE4* e *PHI7*.

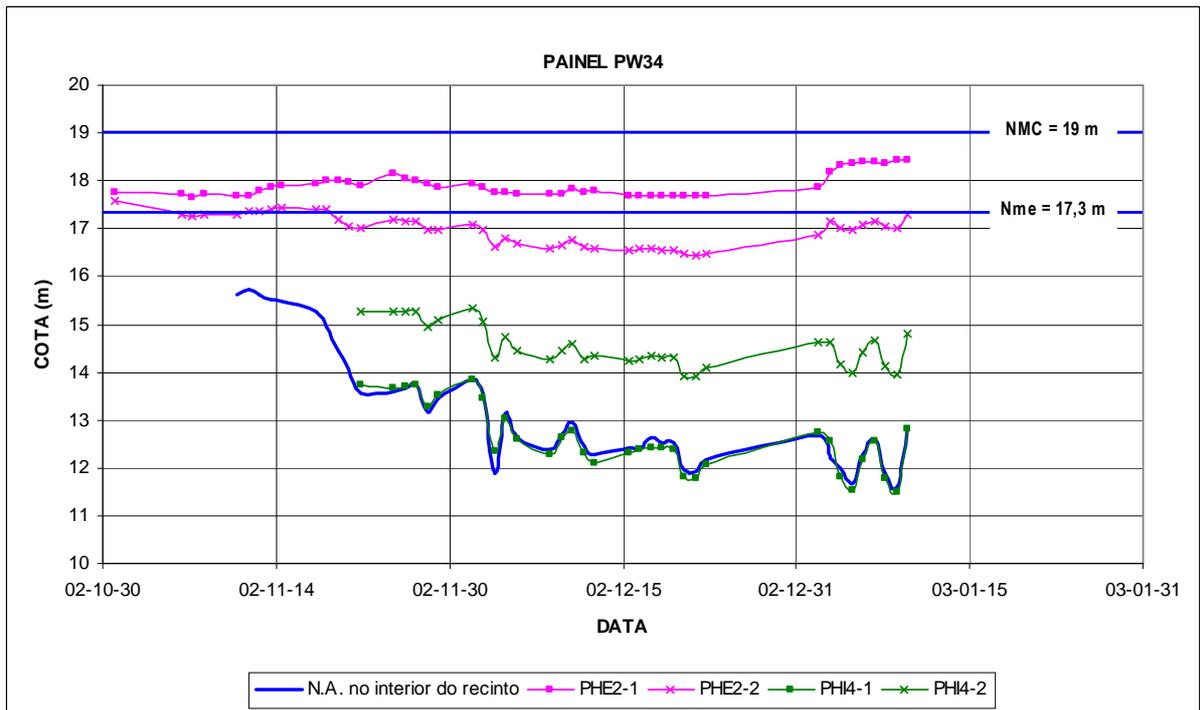


Fig. 34 – Evolução dos níveis de água nos piezômetros *PHE2* e *PHI4*.

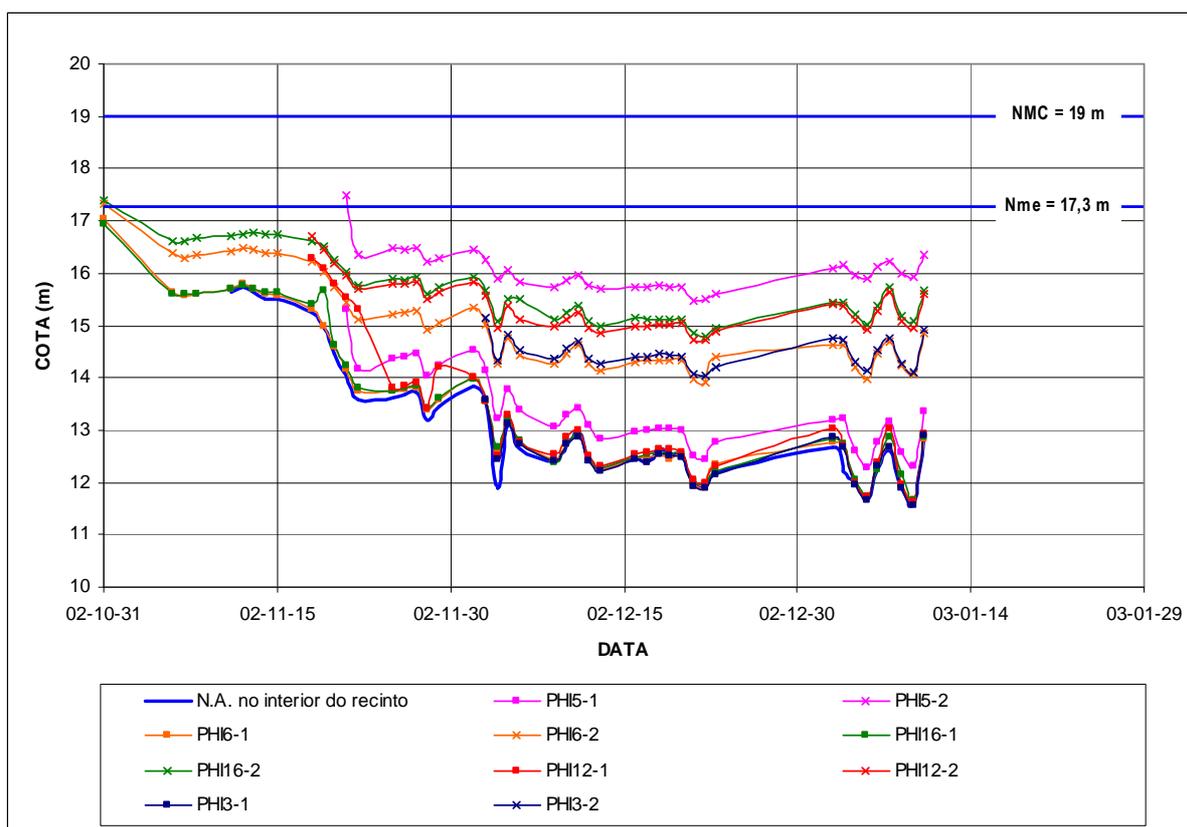


Fig. 35 – Evolução dos níveis de água nos piezómetros *PHI3*, *PHI5*, *PHI6*, *PHI12* e *PHI16*.

No Quadro 55 indicam-se os níveis de água medidos na visita de inspeção de Setembro de 2007 e os valores registados na campanha anterior.

Quadro 55 – Níveis piezométricos medidos na campanha de 19 de Setembro de 2007.

DESIGNAÇÃO	COTA (m)	
	2003/01/10	2007/09/19
PHE2.1	18,43	17,68
PHE2.2	17,30	16,25
PHE7.1	18,25	17,78
PHE7.2	17,06	16,45
PHI1.1	12,86	15,54
PHI1.2	13,68	11,75
PHI10.1	12,84	13,23
PHI10.2	14,20	11,73
PHI14.1	15,23	14,01
PHI14.2	15,26	13,93
PHI16.1	12,88	11,43
PHI16.2	15,67	14,79
BOMBA 1	-	6,15 (*)
BOMBA 2	-	6,05 (*)
BOMBA 3	-	8,05 (*)
BOMBA 4	-	10,20 (*)

(*) Os valores indicados foram calculados admitindo que o topo dos poços de bombagem se localiza à cota 18,5 m.

Naquela data foram medidos os níveis de água no interior dos poços de bombagem, cuja localização aproximada se indica subseqüentemente. É de sublinhar que se desconhece a cota do respectivo topo, pelo que os valores indicados serão revistos numa fase posterior.

- Poço de bombagem 1: a cerca de 9 m dos painéis *PN7* a *PN11*;
- Poço de bombagem 2: a cerca de 9 m dos painéis *PE12* a *PE16*;
- Poço de bombagem 3: a cerca de 9 m dos painéis *PE20* a *PE24*;
- Poço de bombagem 4: a cerca de 9 m dos painéis *PW14* a *PW18*.

Da análise das figuras retiram-se as seguintes conclusões:

- Na quase totalidade dos perfis analisados, a variação do nível de água nas duas câmaras dos piezómetros no exterior ao recinto é praticamente coincidente e insere-se no intervalo possível de variação do nível de água na albufeira do Açude-Ponte de Coimbra. São excepção os piezómetros *PHE2-2* e *PHE7-2*. Estes dispositivos foram instalados no maciço margo-calcário e apresentam níveis de água inferiores ao menor valor possível de variação do nível de água na albufeira.

O contraste de permeabilidade entre o maciço margo-calcário e a cortina de injeção não é suficiente para que a totalidade da perda de carga ocorra na cortina. Parte desta perda de carga ocorrerá no maciço, sobretudo na vizinhança da cortina de injeção. Assim, em condições geológico-geotécnicas semelhantes, quanto menor for a distância do piezómetro à cortina e quanto maior for a profundidade a que se encontra a câmara, menor será o nível de água medido no dispositivo devido à ocorrência de perda de carga. Ora, de todos os dispositivos em análise, os piezómetros *PHE2* e *PHE7* são os que se encontram a menor distância da cortina, a cerca de 2,5 m, justificando-se assim o seu comportamento.

É de referir que o piezómetro *PHE2-2* tem a particularidade de se situar num perfil transversal ao painel *PW34* da parede moldada tradicional, cuja análise não é do âmbito do presente documento.
- Nos piezómetros instalados no exterior do recinto, a menor profundidade, na camada de cascalheiras e areões, os níveis de água medidos apresentam uma evolução coincidente. A evolução destes dispositivos não coincide com as variações registadas nos poços de bombagem, concluindo-se que o nível de água nesta formação é independente da bombagem efectuada no interior do recinto. Uma vez que não se dispõe do registo do nível de água na albufeira, não se pode estabelecer uma relação entre ambos.
- De acordo com os estudos de percolação efectuados na fase de projecto, as câmaras piezométricas instaladas na zona exterior do recinto, na camada de cascalheiras, deveriam registar níveis de água idênticos aos medidos na albufeira. Já nas câmaras instaladas na formação margo-calcária, o nível de água medido deveria ser inferior, devido à influência da bombagem. Com efeito, o contraste de permeabilidade entre a formação margo-calcária e o tratamento por injeção não é muito significativo, pelo que parte da perda de carga ocorre no terreno, na vizinhança da cortina. É de referir que a maioria dos piezómetros foram instalados a uma distância variável da cortina de 2,5 a 6 m. Conclui-se, assim, que o comportamento observado nos piezómetros exteriores ao recinto se aproximou do simulado. Há porém a referir que no projecto, o nível exterior foi estabelecido à cota 15,0 m e o interior à 11,0 m. Nas observações realizadas, verifica-se que entre a albufeira e a parede não ocorrem perdas de carga. Neste contexto, o nível exterior variou entre a cota 17,5 m e a 18,0 m, ou seja, 2,5 a 3 m acima do previsto no projecto. O nível interior esteve também um pouco acima (entre 12 e 13 m) o que aproxima o desnível hidráulico real do projectado.
- Nos piezómetros instalados na formação margo-calcária, na zona interior do recinto, foram registados valores bastante variáveis dos níveis de água, mas sempre com uma evolução idêntica à observada nos poços de bombagem. Os níveis piezométricos mais baixos foram registados no piezómetro *PHI8-2*, enquanto que os mais elevados se registaram no piezómetro *PHI5-2*. Os níveis piezométricos na formação margo-calcária, na zona interior do recinto, são influenciados por diversos factores, de entre os quais se destacam o tipo e a permeabilidade da cortina, as características geológico-geotécnicas dos

terrenos ocorrentes, a proximidade à cortina e a proximidade aos poços de bombagem. Estes dois últimos parâmetros têm efeitos contrários. Quanto maior é a proximidade à cortina, menor é a perda de carga (entre a zona exterior e interior do recinto) e maior é o nível registado no piezómetro. Pelo contrário, quanto maior é a proximidade ao poço de bombagem, maior é a sua influência e, como tal, menor é o nível medido no dispositivo. Neste contexto, a variabilidade dos comportamentos é normal, e não está, obrigatoriamente, associada a problemas de integridade da cortina de injeções.

- Nos piezómetros instalados na camada de cascalheiras e areões, na zona interior do recinto, foram medidos níveis coincidentes com o nível de água medido nos poços de bombagem (?), sendo excepções os piezómetros *PHI5-1* e *PHI14-1*. Neste último, *PHI14-1*, os níveis coincidiram com os observados no piezómetro *PHI14-2* do mesmo furo. Uma hipótese possível para este comportamento seria uma ligação hidráulica entre ambas as câmaras, sendo o nível de água na câmara superior influenciado pelo nível de água na câmara inferior. No *PHI5-1*, o nível de água acompanha as variações registadas no interior do recinto, mas com uma diferença de cerca de 0,5 m. No mesmo furo, na câmara instalada na formação margo-calcária, foi observada a mesma diferença de 0,5 m em relação aos restantes dispositivos, o que faz suspeitar de um erro na medição da cota da boca do piezómetro. Infelizmente estes dispositivos não se encontravam acessíveis na última campanha de leituras, pelo que esta hipótese não pôde ser confirmada.
- No interior do recinto, os piezómetros *PHI6* e *PHI16*, instalados a uma distância muito significativa da parede moldada, apresentam um comportamento semelhante ao dos restantes dispositivos, facto que confirma a eficiência das intervenções realizadas, quer no que se refere à cortina de impermeabilização, quer no que se refere ao sistema de bombagem, que consegue rebaixar o nível de água de forma uniforme na totalidade da área.
- O comportamento dos piezómetros instalados no interior do recinto está em consonância com o simulado no projecto. Devido ao desnível hidráulico entre o exterior e o interior da cortina, a percolação ocorre, sobretudo, pelas camadas subjacentes à cortina de injeções. É assim expectável que a maior percentagem de perda de carga ocorra na formação margo-calcária. Consequentemente, nas câmaras instaladas a maior profundidade de um mesmo furo, registam-se níveis superiores aos das câmaras a menor profundidade. Um comportamento contrário ao descrito poderá ocorrer se existirem problemas de integridade da parede moldada.
- Em todos os casos analisados, e tal como esperado, os níveis piezométricos no exterior da cortina são superiores aos níveis registados no interior. O desnível hidráulico entre piezómetros instalados na camada de cascalheira, no exterior e interior do recinto, é superior ao que se regista nos piezómetros inseridos na formação margo-calcária.

Face ao exposto, conclui-se que a parede moldada e respectiva cortina de injeções cumprem a sua função de impermeabilização, tendo a parede moldada uma eficiência superior à do tratamento por injeção, em resultado do maior contraste de permeabilidade entre o terreno e o material de que é constituída a cortina.

Na campanha de Setembro de 2007, as profundidades dos furos foram verificadas e registados os níveis de água correspondentes. Aparentemente, o nível de água na zona interior do recinto terá sofrido uma redução entre a penúltima e a última leitura. Neste período não é conhecida a variação do nível de água na albufeira do Açude-Ponte de Coimbra.

Nos piezómetros exteriores ao recinto, foi registada uma descida do nível de água entre a última leitura de 2003 e a leitura de Setembro de 2007. O comportamento dos dispositivos é idêntico ao observado no período anterior. Admite-se que a descida do nível de água nos piezómetros instalados na camada mais permeável esteja associada a idêntica descida do nível de água na albufeira do Açude-Ponte de Coimbra. De igual forma, a

descida do nível piezométrico na formação margo-calcária pode ser atribuída à descida do nível de água na albufeira, mas também à descida do nível de água no interior do recinto. De facto, só desta forma se justifica que a magnitude da redução dos níveis nos piezómetros mais profundos seja superior à redução dos níveis piezométricos superficiais.

No que se refere aos piezómetros instalados no interior do recinto, observam-se diferentes comportamentos. Entre a última leitura de 2003 e a leitura de Setembro de 2007, foram registados aumentos do nível de água nos dispositivos *PHI1-1* e *PHI10-1*, e reduções do nível de água nos dispositivos *PHI14-1* e *PHI16-1*. Em todos os piezómetros instalados na formação margo-calcária, foram registadas descidas do nível de água. Tendo em consideração que os piezómetros *PHI1* e *PHI10* se encontram na proximidade de poços de bombagem e que se registou uma descida do nível de água naqueles¹⁰, as subidas do nível de água na camada de cascalheiras são de difícil explicação.

A comparação dos resultados das leituras de 2007 com as do período anterior, de 2002 / 2003, permitirão identificar eventuais alterações no comportamento da cortina, designadamente no que se refere à sua permeabilidade. Contudo, esta análise só será viável após a determinação da cota do topo dos poços de bombagem.

¹⁰ No “Relatório de Instrumentação” elaborado pela empresa *TEIXEIRA DUARTE S.A.* não é identificada a forma de medição do nível de água no interior do recinto. Na última campanha de leituras, foi medida a profundidade da água no interior dos poços de bombagem, mas desconhecem-se as cotas das bocas. Assim, a assunção de uma descida do nível de água no interior do recinto parte do pressuposto de que a cota da boca do poço é aproximadamente idêntica à cota da boca dos piezómetros, facto que deve ser objecto de aferição.

6. CONCLUSÕES

Nos capítulos anteriores procedeu-se à análise detalhada dos dados relativos ao projecto, construção e exploração da obra de contenção periférica da área museológica do Mosteiro de Santa Clara-a-Velha.

Tratando-se de um dos poucos casos de aplicação da tecnologia de paredes moldadas auto-endurecedoras em Portugal, houve por parte de todos os Intervenientes, uma preocupação particular no estudo das caldas e no controlo de qualidade, desde a fase de projecto até à fase de exploração. Neste contexto, a informação disponível sobre a obra é em qualidade e quantidade significativamente superior à que é usual em obras de engenharia civil.

A análise crítica da informação disponibilizada foi essencial para identificar os aspectos relacionados com a tecnologia que deverão ser objecto de investigação no sentido de otimizar a sua aplicação quer do ponto de vista técnico, quer do ponto de vista económico.

De acordo com as informações fornecidas pelo Dono de Obra no que se refere à exploração do sistema de bombagem, e tendo em consideração a análise dos dados de observação, conclui-se que a cortina de contenção hidráulica está a cumprir a sua função.

VISTOS

O Chefe do Núcleo de Fundações, Taludes e Obras de
Suporte



Francisco Salgado
Eng.º Civil, Investigador Principal

A Directora do Departamento de Geotecnia



Laura Caldeira
Eng.ª Civil, Investigadora Coordenadora

AUTORIA



Joana Carreto
Eng.ª Civil, Bolseira de Doutoramento

BIBLIOGRAFIA:

HIDROPROJECTO, Consultores de Hidráulica e Salubridade, S.A. (1985) “*Estudos Relativos à Defesa do Mosteiro de Santa Clara – Coimbra. Estudo Prévio*”

Artur Côrte-Real e Equipa (sem data) “*Intervenção Arqueológica no Mosteiro de Santa Clara-a-Velha. Abordagem...*”

Francisco Pato Macedo (1997) “*Valor Patrimonial do Mosteiro de Santa Clara-a-Velha de Coimbra*”

AEMITEQ (Maio de 1997) “*Estudo Técnico Pericial de Viabilidade de Construção de um Lago na Envolvente da Igreja de Santa Clara-a-Velha*”

IPPAR (Julho de 1997) “*Fórum de Debate. O estaleiro de Santa Clara-a-Velha. Questões e Soluções. O Elemento Água: Problemas de Conservação e Valorização 10-12 de Julho de 1997*”

IPPAR (1997) “*Mosteiro de Santa Clara-a-Velha. Memorando*”

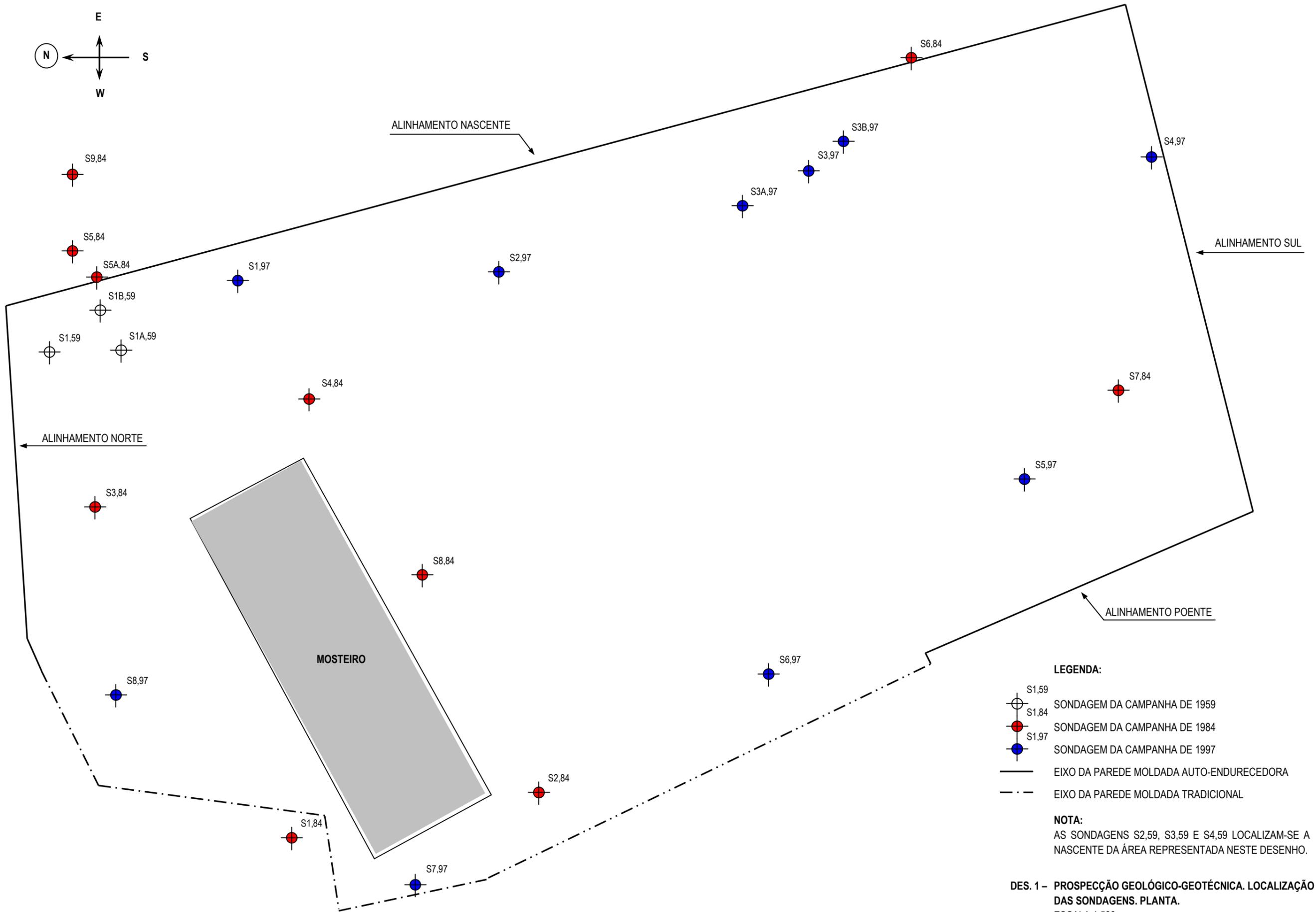
Caldeira, L.; Bilé Serra, J. (Outubro de 1998) “*Mosteiro de Santa Clara-a-Velha. Avaliação da Exequibilidade da Contenção Hidráulica Periférica. Relatório Confidencial 248/98 – LNEC*”

TEIXEIRA DUARTE, S.A. / COBA, S.A. (2000) “*Cortina de Contenção Periférica do Mosteiro de Santa Clara-a-Velha, em Coimbra. Projecto-Base*”

TEIXEIRA DUARTE, S.A. (Março de 2003) “*Coimbra. Mosteiro de Santa Clara-a-Velha. Cortina de Contenção Periférica. Relatório Final de Obra*”

TEIXEIRA DUARTE, S.A. (Agosto de 2009) “*Fabrico da calda*”

DESENHOS

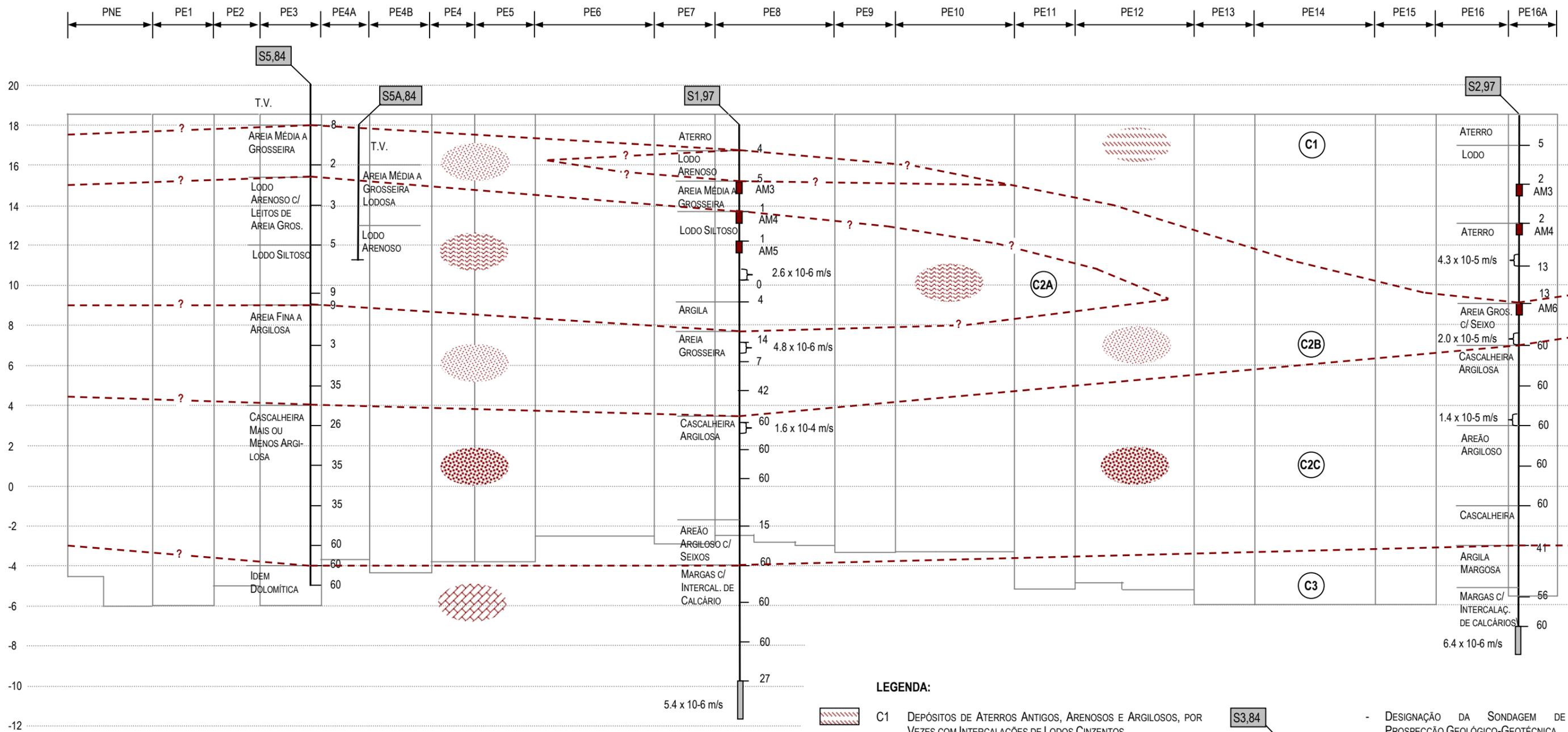


LEGENDA:

- ⊕ S1,59 SONDAJEM DA CAMPANHA DE 1959
- ⊕ S1,84 SONDAJEM DA CAMPANHA DE 1959
- S1,84 SONDAJEM DA CAMPANHA DE 1984
- S1,97 SONDAJEM DA CAMPANHA DE 1997
- EIXO DA PAREDE MOLDADA AUTO-ENDURECEDORA
- · - EIXO DA PAREDE MOLDADA TRADICIONAL

NOTA:
 AS SONDAJENS S2,59, S3,59 E S4,59 LOCALIZAM-SE A NASCENTE DA ÁREA REPRESENTADA NESTE DESENHO.

DES. 1 - PROSPECÇÃO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA. LOCALIZAÇÃO DAS SONDAJENS. PLANTA.
 ESCALA 1:500

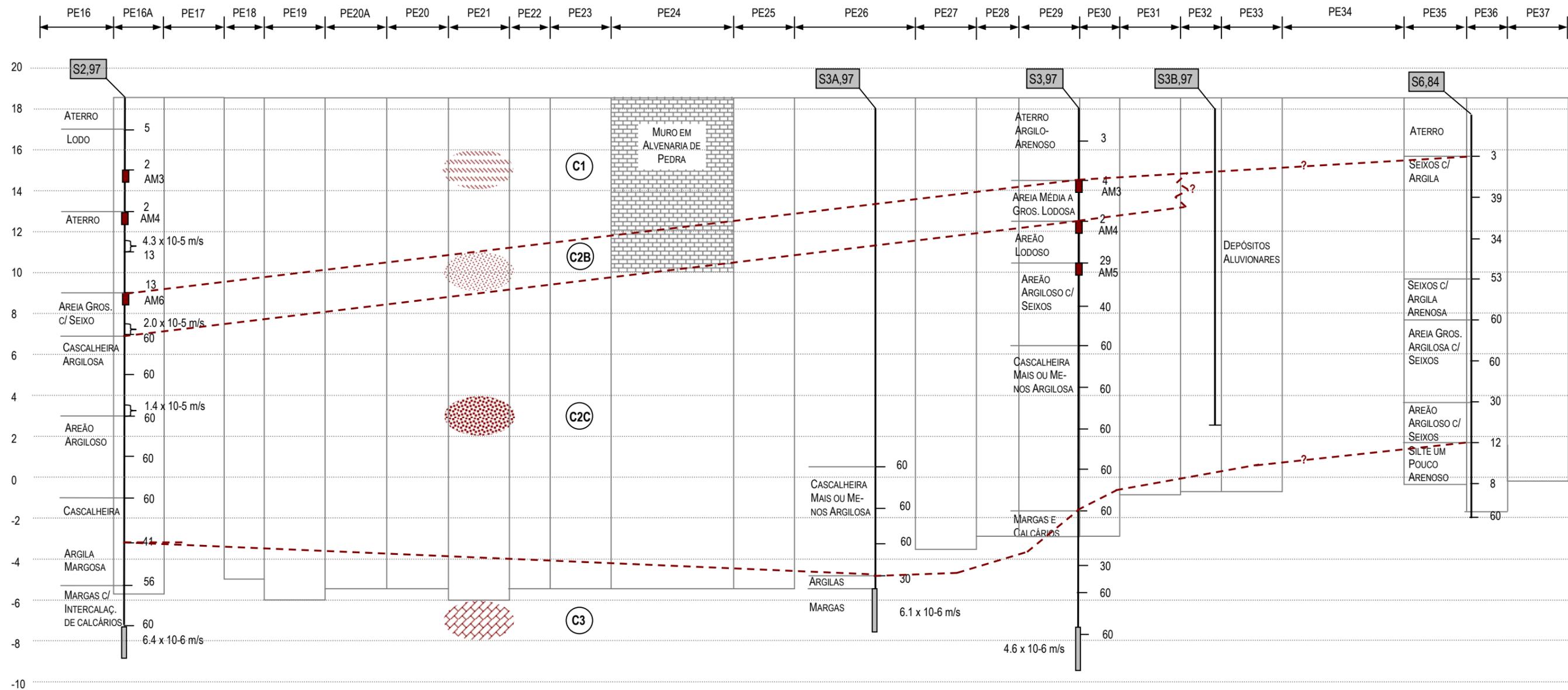


LEGENDA:

-  C1 DEPÓSITOS DE ATERROS ANTIGOS, ARENOSOS E ARGILOSOS, POR VEZES COM INTERCALAÇÕES DE LODOS CINZENTOS.
-  C2A LODOS SILTOSOS E ARENOSOS, CINZENTOS ESCUROS.
-  C2B AREIAS MÉDIAS A GROSSEIRAS, MAIS OU MENOS ARGILOSAS, POR VEZES COM SEIXOS.
-  C2C DEPÓSITOS GROSSEIROS CONSTITUÍDOS POR AREIA E CASCALHEIRAS.
-  C3 MARGAS E CALCÁRIOS MARGOSOS.

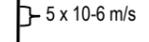
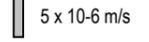
-  S3,84 - DESIGNAÇÃO DA SONDAGEM DE PROSPECÇÃO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA.
-  50 - NÚMERO DE PANCADAS NO ENSAIO SPT.
-  5×10^{-6} m/s - ENSAIO DE PERMEABILIDADE LEFRANC.
-  5×10^{-6} m/s - ENSAIO DE PERMEABILIDADE LUGEON.

DES. 2 - CORTE GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO SEGUNDO O ALINHAMENTO NASCENTE DA PAREDE MOLDADA. (FOLHA 1/3) ESCALA 1:200

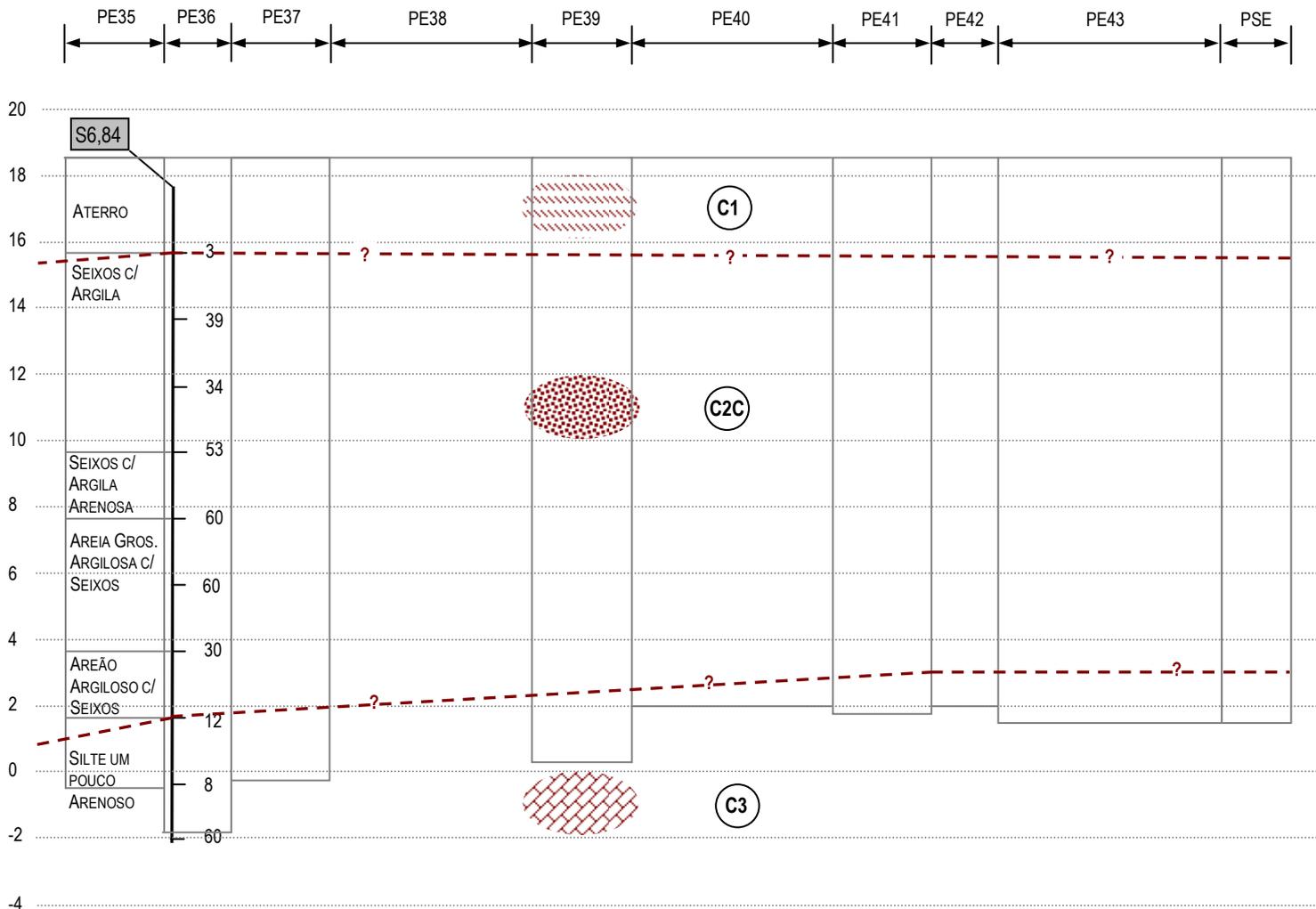


LEGENDA:

-  C1 DEPÓSITOS DE ATERROS ANTIGOS, ARENOSOS E ARGILOSOS, POR VEZES COM INTERCALAÇÕES DE LODOS CINZENTOS.
-  C2A LODOS SILTOSOS E ARENOSOS, CINZENTOS ESCUROS.
-  C2B AREIAS MÉDIAS A GROSSEIRAS, MAIS OU MENOS ARGILOSAS, POR VEZES COM SEIXOS.
-  C2C DEPÓSITOS GROSSEIROS CONSTITUÍDOS POR AREIA E CASCALHEIRAS.
-  C3 MARGAS E CALCÁRIOS MARGOSOS.

-  - DESIGNAÇÃO DA SONDAAGEM DE PROSPECÇÃO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA.
-  50 - NÚMERO DE PANCADAS NO ENSAIO SPT.
-  5 x 10-6 m/s - ENSAIO DE PERMEABILIDADE LEFRANC.
-  5 x 10-6 m/s - ENSAIO DE PERMEABILIDADE LUGEON.

DES. 2 - CORTE GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO SEGUNDO O ALINHAMENTO NASCENTE DA PAREDE MOLDADA. (FOLHA 2/3) ESCALA 1:200



LEGENDA:

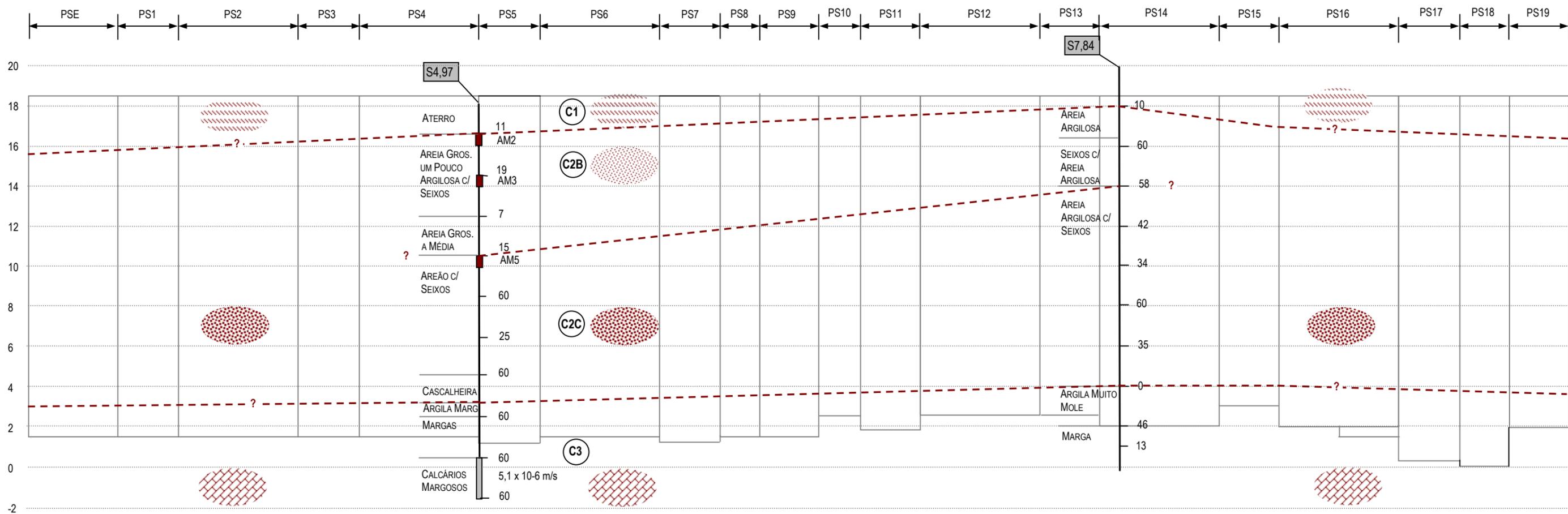
-  C1 DEPÓSITOS DE ATERROS ANTIGOS, ARENOSOS E ARGILOSOS, POR VEZES COM INTERCALAÇÕES DE LODOS CINZENTOS.
-  C2A LODOS SILTOSOS E ARENOSOS, CINZENTOS ESCUROS.
-  C2B AREIAS MÉDIAS A GROSSEIRAS, MAIS OU MENOS ARGILOSAS, POR VEZES COM SEIXOS.
-  C2C DEPÓSITOS GROSSEIROS CONSTITUÍDOS POR AREIA E CASCALHEIRAS.
-  C3 MARGAS E CALCÁRIOS MARGOSOS.

-  - DESIGNAÇÃO DA SONDAGEM DE PROSPECÇÃO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA.
-  50 - NÚMERO DE PANCADAS NO ENSAIO SPT.
-  5 x 10⁻⁶ m/s - ENSAIO DE PERMEABILIDADE LEFRANC.
-  5 x 10⁻⁶ m/s - ENSAIO DE PERMEABILIDADE LUGEON.

NOTA:

AS FRONTEIRAS ENTRE AS DIFERENTES FORMAÇÕES GEOLÓGICO-GEOTÉCNICAS FORAM ESTABELECIDAS A PARTIR DA INFORMAÇÃO RECOLHIDA DURANTE A ESCAVAÇÃO DOS PAINÉIS.

DES. 2 – CORTE GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO SEGUNDO O ALINHAMENTO NASCENTE DA PAREDE MOLDADA. (FOLHA 3/3) ESCALA 1:200



LEGENDA:

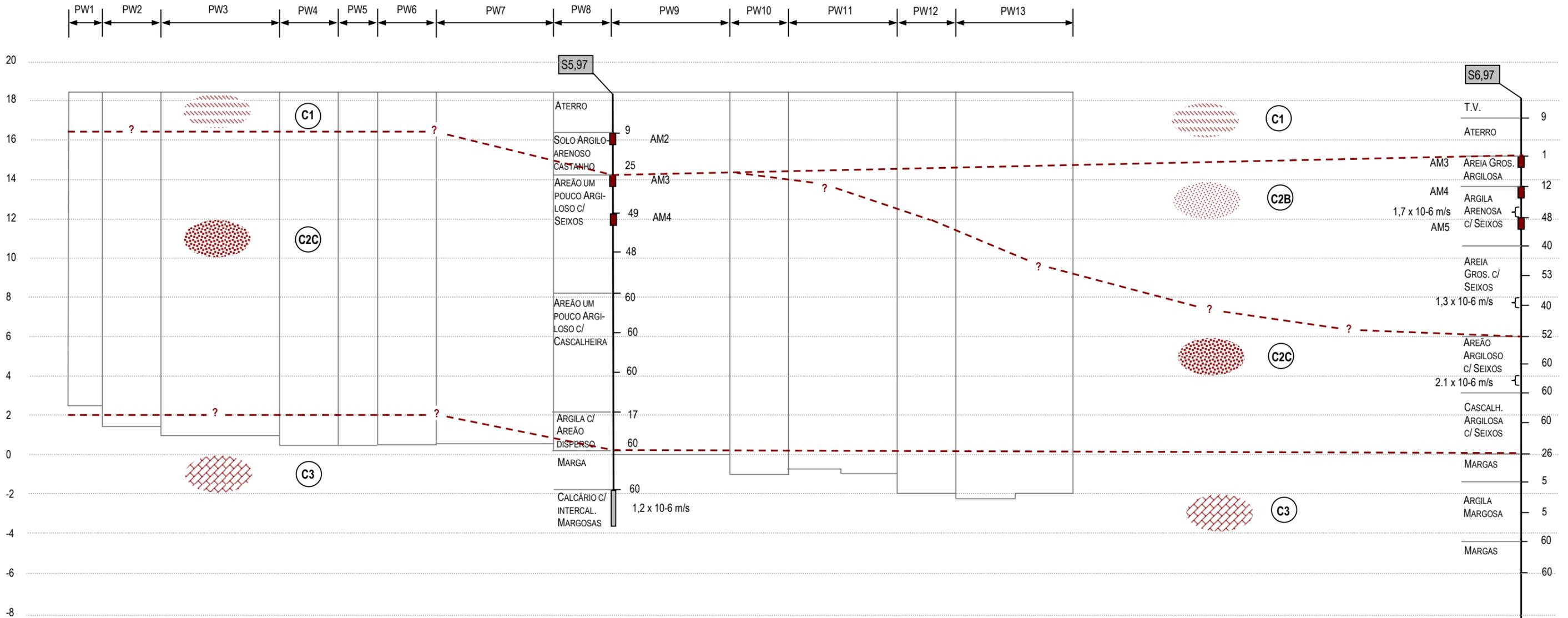
-  C1 DEPÓSITOS DE ATERROS ANTIGOS, ARENOSOS E ARGILOSOS, POR VEZES COM INTERCALAÇÕES DE LODOS CINZENTOS.
-  C2A LODOS SILTOSOS E ARENOSOS, CINZENTOS ESCUROS.
-  C2B AREIAS MÉDIAS A GROSSEIRAS, MAIS OU MENOS ARGILOSAS, POR VEZES COM SEIXOS.
-  C2C DEPÓSITOS GROSSEIROS CONSTITUÍDOS POR AREIA E CASCALHEIRAS.
-  C3 MARGAS E CALCÁRIOS MARGOSOS.

NOTA:

NAS EXTREMIDADES DO CORTE, AS FRONTEIRAS ENTRE AS DIFERENTES FORMAÇÕES GEOLÓGICO-GEOTÉCNICAS FORAM ESTABELECIDAS A PARTIR DA INFORMAÇÃO RECOLHIDA DURANTE A ESCAVAÇÃO DOS PAINÉIS.

-  S3,84 - DESIGNAÇÃO DA SONDAGEM DE PROSPECÇÃO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA.
-  50 - NÚMERO DE PANCADAS NO ENSAIO SPT.
-  5 x 10-6 m/s - ENSAIO DE PERMEABILIDADE LEFRANC.
-  5 x 10-6 m/s - ENSAIO DE PERMEABILIDADE LUGEON.

DES. 3 – CORTE GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO SEGUNDO O ALINHAMENTO SUL DA PAREDE MOLDADA. ESCALA 1:200

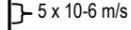


LEGENDA:

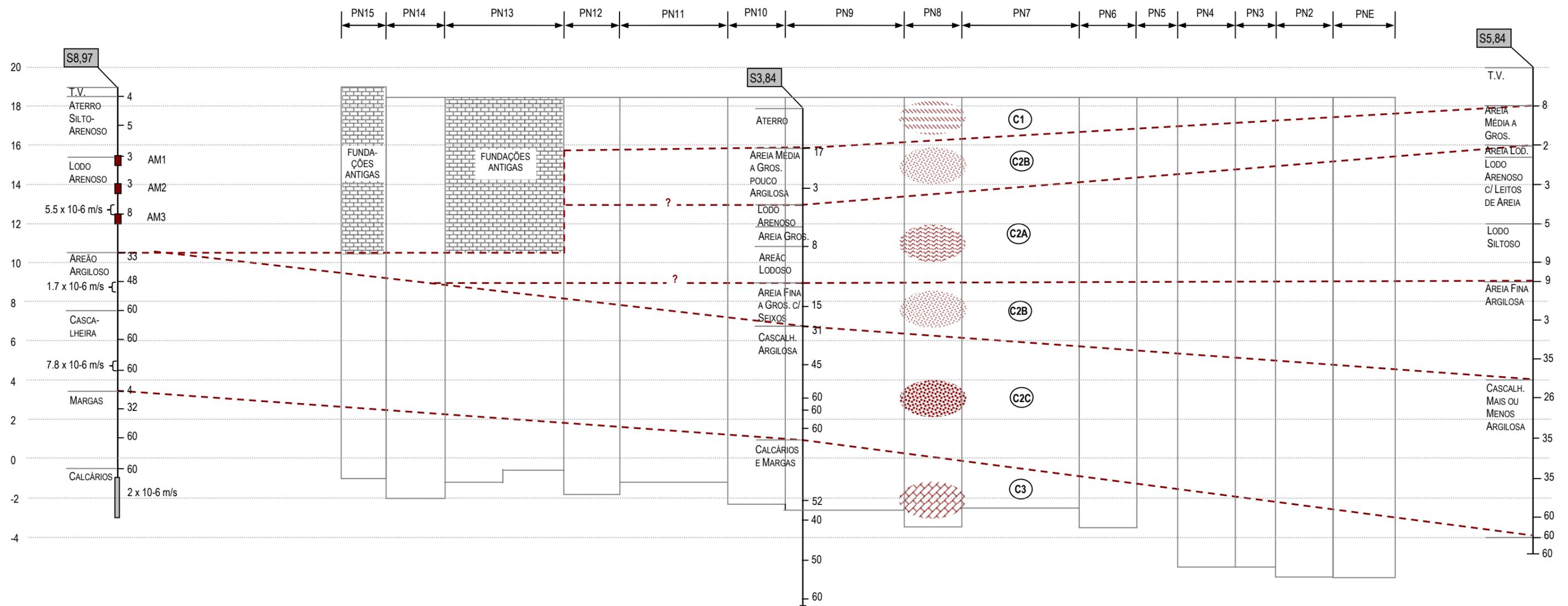
-  C1 DEPÓSITOS DE ATERROS ANTIGOS, ARENOSOS E ARGILOSOS, POR VEZES COM INTERCALAÇÕES DE LODOS CINZENTOS.
-  C2A LODOS SILTOSOS E ARENOSOS, CINZENTOS ESCUROS.
-  C2B AREIAS MÉDIAS A GROSSEIRAS, MAIS OU MENOS ARGILOSAS, POR VEZES COM SEIXOS.
-  C2C DEPÓSITOS GROSSEIROS CONSTITUÍDOS POR AREIA E CASCALHEIRAS.
-  C3 MARGAS E CALCÁRIOS MARGOSOS.

NOTA:

NA EXTREMIDADES DO CORTE, AS FRONTEIRAS ENTRE AS DIFERENTES FORMAÇÕES GEOLÓGICO-GEOTÉCNICAS FORAM ESTABELECIDAS A PARTIR DA INFORMAÇÃO RECOLHIDA DURANTE A ESCAVAÇÃO DOS PAINÉIS.

-  - DESIGNAÇÃO DA SONDADEGE DE PROSPECÇÃO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA.
-  - NÚMERO DE PANCADAS NO ENSAIO SPT.
-  - ENSAIO DE PERMEABILIDADE LEFRANC.
-  - ENSAIO DE PERMEABILIDADE LUGEON.

DES. 4 - CORTE GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO SEGUNDO O ALINHAMENTO POENTE DA PAREDE MOLDADA. ESCALA 1:200

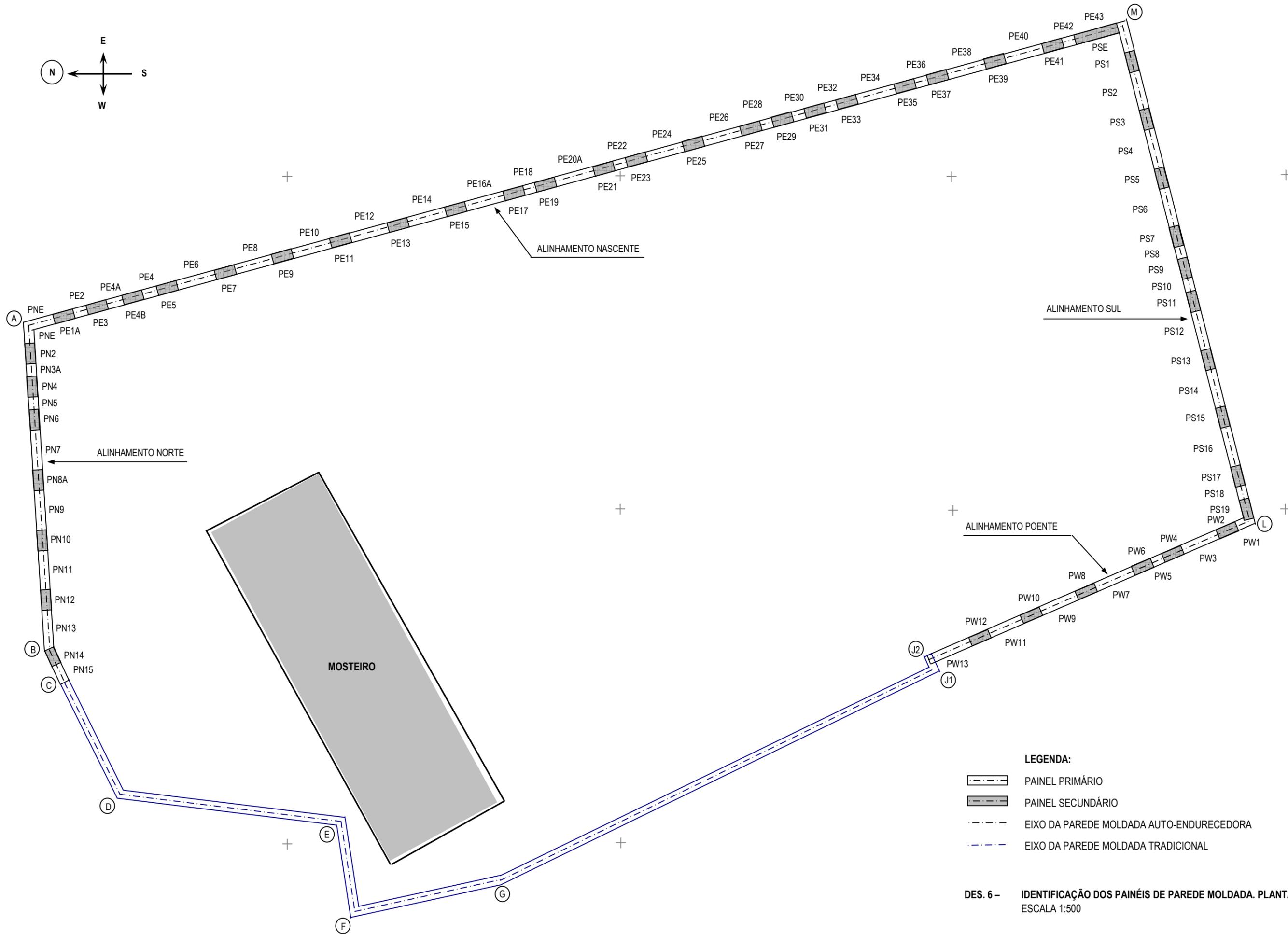
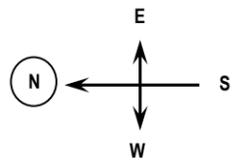


LEGENDA:

-  C1 DEPÓSITOS DE ATERROS ANTIGOS, ARENOSOS E ARGILOSOS, POR VEZES COM INTERCALAÇÕES DE LODOS CINZENTOS.
-  C2A LODOS SILTOSOS E ARENOSOS, CINZENTOS ESCUROS.
-  C2B AREIAS MÉDIAS A GROSSEIRAS, MAIS OU MENOS ARGILOSAS, POR VEZES COM SEIXOS.
-  C2C DEPÓSITOS GROSSEIROS CONSTITUÍDOS POR AREIA E CASCALHEIRAS.
-  C3 MARGAS E CALCÁRIOS MARGOSOS.

-  - DESIGNAÇÃO DA SONDAGEM DE PROSPECÇÃO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA.
-  - NÚMERO DE PANCADAS NO ENSAIO SPT.
-  - ENSAIO DE PERMEABILIDADE LEFRANC.
-  - ENSAIO DE PERMEABILIDADE LUGEON.

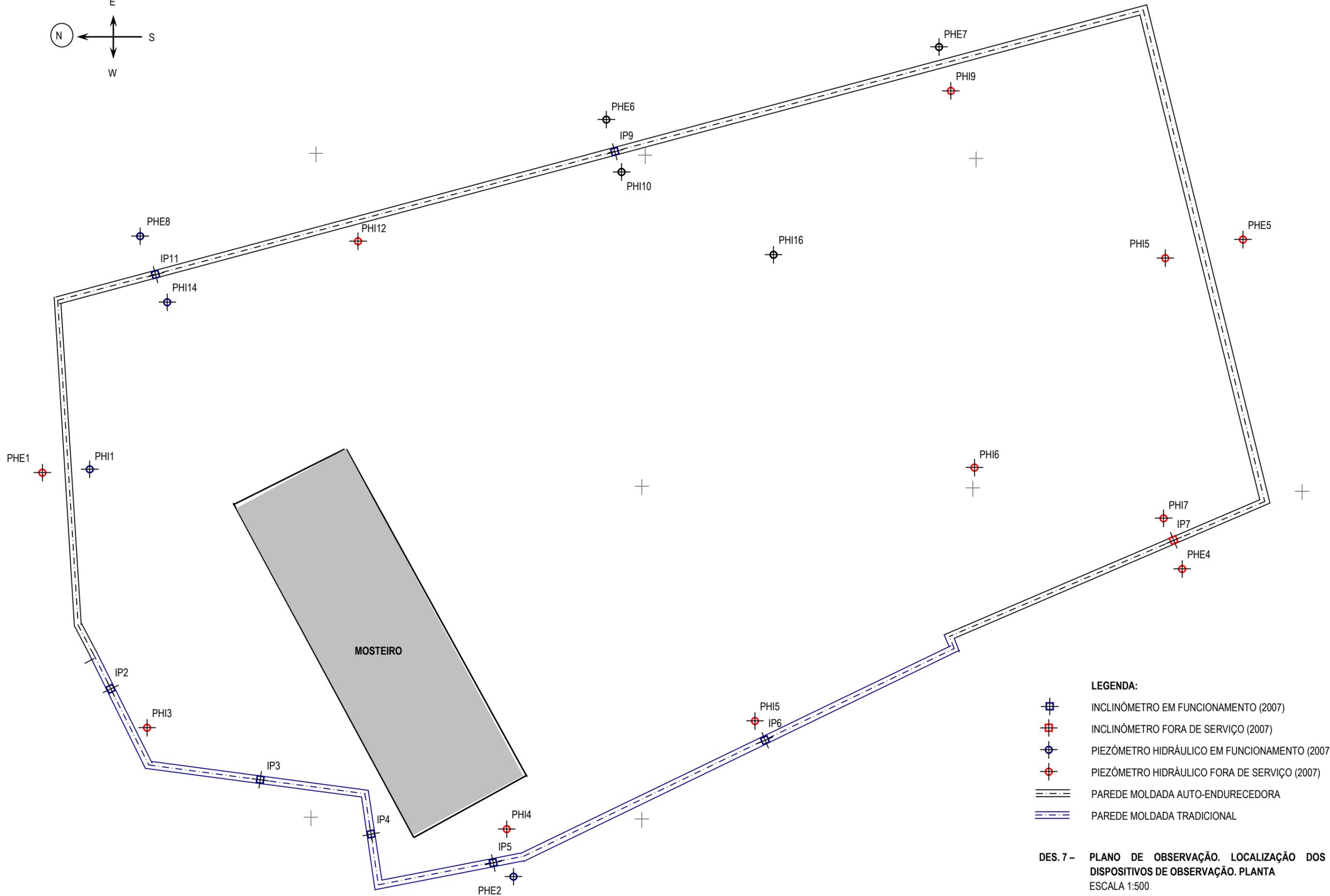
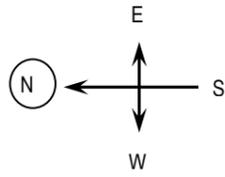
DES. 5 - CORTE GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO SEGUNDO O ALINHAMENTO NORTE DA PAREDE MOLDADA. ESCALA 1:200



LEGENDA:

- PAINEL PRIMÁRIO
- PAINEL SECUNDÁRIO
- EIXO DA PAREDE MOLDADA AUTO-ENDURECEDORA
- EIXO DA PAREDE MOLDADA TRADICIONAL

DES. 6 - IDENTIFICAÇÃO DOS PAINÉIS DE PAREDE MOLDADA. PLANTA.
ESCALA 1:500



LEGENDA:

-  INCLINÓMETRO EM FUNCIONAMENTO (2007)
-  INCLINÓMETRO FORA DE SERVIÇO (2007)
-  PIEZÓMETRO HIDRÁULICO EM FUNCIONAMENTO (2007)
-  PIEZÓMETRO HIDRÁULICO FORA DE SERVIÇO (2007)
-  PAREDE MOLDADA AUTO-ENDURECEDORA
-  PAREDE MOLDADA TRADICIONAL

DES. 7 - PLANO DE OBSERVAÇÃO. LOCALIZAÇÃO DOS DISPOSITIVOS DE OBSERVAÇÃO. PLANTA ESCALA 1:500

ANEXOS

Quadro A1 – Assentamento da calda, altura de água e volumes de calda adicionados (informações recolhidas das “partes diárias”). Alinhamento Nascente.

PAINEIS	DATA	NÍVEL ÁGUA ACIMA DO CLAUSTRO	PASSE	HORA	ASSENTAM. DA CALDA (m)	ALTURA DE ÁGUA NA VALA (m)	VOLUME ADICIONADO (m ³)
PE1	2002-02-20	1,5 m	1	16:00	1.0	0,8	7,0
	2002-02-20		1	19:00	2.0		
	2002-02-20		1	22:00	3.0	0,4	
	2002-02-21		1	01:00	1.0		
	2002-02-21		1	04:00	2.0		4,0
PE1A	2002-02-27	2,3 m	1	20:00	1.0	0,8	7,0
	2002-02-27		1	23:00	2.0		
	2002-02-28		1	02:00	3.0	0,4	
	2002-02-28		1	05:00	1.0		
	2002-02-28		1	08:00	2.0		3,0
PE2	2002-01-25	Seco	1	15:00	1.0	0,5	7,0
	2002-01-25		1	18:00	2.0		
	2002-01-25		1	00:00	3.0	0,3	
	2002-01-26		1	?	1.0		
	2002-01-26		1	?	1.5		
	2002-01-27		1	?	0.5		6,0
PE3	2002-02-20	1,5 m	1	21:00	1.0	0,9	8,0
	2002-02-21		1	00:00	2.0		
	2002-02-21		1	03:00	3.0	0,4	
	2002-02-21		1	06:00	1.0		
	2002-02-21		1	09:00	2.0		
							4,0
PE4A	2002-01-28	Seco	1	20:00	1.0	0,5	6,0
	2002-01-28		1	23:00	2.0		
	2002-01-29		1	02:00	3.0	0,3	
	2002-01-29		1	?	0.5		
							7,0
PE4B	2002-02-13	0,8 m	1	15:00	1.0	0,9	8,0
	2002-02-13		1	18:00	2.0		
	2002-02-13		1	21:00	3.0	0,4	
	2002-02-14		1	00:00	1.0		
	2002-02-14		1	03:00	2.0		
							4,0
PE4	2001-12-21	Seco	1	22:00	2.0	1,0	5,0
	2001-12-22		1	08:00	1.5	0,5	3,5
	2001-12-26		1	08:00	1.5	0,5	3,5
PE5	2002-02-09	1,0 m	1	14:00	1.0	0,9	8,0
	2002-02-09		1	17:00	2.0		
	2002-02-09		1	20:00	3.0	0,4	
	2002-02-10		1	00:00	1.0		
	2002-02-10		1	?	1.0		
							2,0
PE6	2001-12-13	Seco	1	08:00	3.0	2,0	5,0
	2001-12-14		2	?	2.0		
	2001-12-14		3	08:00	2.0	1,0	11,2
PE7	2002-02-08	1,0 m	1	21:00	1.0	0,9	9,0
	2002-02-09		1	00:00	2.0		
	2002-02-09		1	03:00	3.0	0,5	
	2002-02-09		1	06:00	1.0		
PE8	2001-12-14	Seco	1	08:00	2.0	1,0	5,0
	2001-12-14		2	08:00	2.0	1,0	5,0
	2001-12-15		3	08:00	1.0	1,0	5,5
PE9	2002-02-08	1,0 m	1	15:00	1.0	0,9	9,0
	2002-02-08		1	18:00	2.0		
	2002-02-08		1	21:00	3.0	0,5	
	2002-02-09		1	00:00	1.0		
	2002-02-09		1	03:00	2.0		
							6,0

Quadro A1 – Assentamento da calda, altura de água e volumes de calda adicionados (informações recolhidas das “partes diárias”). Alinhamento Nascente. (cont.)

PAINEIS	DATA	NÍVEL ÁGUA ACIMA DO CLAUSTRO	PASSE	HORA	ASSENTAM. DA CALDA (m)	ALTURA DE ÁGUA NA VALA (m)	VOLUME ADICIONADO (m³)
PE10	2001-12-17	Seco	1	02:00	2.0	1,0	5,0
	2001-12-18		2	02:00	2.0	1,0	5,0
	2001-12-18		3	02:00	2.0	1,0	5,5
PE11	2002-02-07	1,0 m	1	16:00	1.0	0,9	9,0
	2002-02-07		1	19:00	2.0		
	2002-02-08		1	00:00	3.0	0,5	
	2002-02-08		1	03:00	1.0		
	2002-02-08		1	06:00	2.0		
PE12	2001-12-19	Seco	1	00:00	1.0	0,5	2,5
	2001-12-20		3	00:00	2.0	1,0	5,0
PE13	2002-02-06	1,0 m	1	20:00	1.0	0,7	7,0
	2002-02-06		1	23:00	2.0		
	2002-02-07		1	01:00	3.0	0,6	
	2002-02-07		1	03:00	1.0		
	2002-02-07		1	05:00	2.0		
PE14	2001-12-26	Seco	1	22:00	1.5	0,5	3,5
	2001-12-27		2	07:00	1.5	0,5	3,5
	2001-12-27		3	07:00	1.5	0,5	3,5
PE15	2002-02-05	1,2 m	1	22:00	1.0	0,7	6,0
	2002-02-05		1	01:00	2.0		
	2002-02-05		1	04:00	3.0		
PE16	2001-12-28	Seco	1	22:00	1.5	0,5	3,5
	2001-12-29		2	20:00	1.5	0,5	15,0
	2002-12-30		2	08:00	?		
	2001-12-29		3	20:00	1.5	0,5	15,0
	2001-12-30		3	08:00	?		
PE16A	2002-01-18	Seco	1	?	1.0	0,5	7,0
	2002-01-18		1	?	2.0		
	2002-01-18		1	?	3.0	0,3	
	2002-01-20		1	?	0.5		
	2002-01-20		1	?	1.0		
PE17	2002-02-21	1,5 m	1	19:00	1.0	0,8	7,0
	2002-02-21		1	22:00	2.0		
	2002-02-22		1	01:00	3.0	0,4	
	2002-02-22		1	03:00	1.0		
	2002-02-22		1	06:00	2.0		
PE18	2001-12-14	Seco	1	?	2.0	1,0	5,0
	2001-12-15		1	?	1.0	0,5	3,5
PE19	2002-01-31	Seco	1	22:00	1.0	0,6	7,0
	2002-02-01		1	01:00	2.0		
	2002-02-01		1	04:00	3.0	0,4	
	2002-02-01		1	22:00	1.0		
PE20	19-12-2001	Seco	1	00:00	1.0	0,5	2,5
	20-12-2001		3	00:00	2.0	1,0	5,0
PE20A	2002-02-01	Seco	1	16:00	1.0	0,8	6,0
	2002-02-01		1	19:00	2.0		
	2002-02-01		1	22:00	3.0	0,2	
	2002-02-02		1	?	1.0		
PE21	2002-02-04	1,2 m	1	18:00	1.0	0,5	7,0
	2002-02-04		1	21:00	2.0		
	2002-02-05		1	00:00	3.0	0,3	
	2002-02-05		1	02:00	1.0		

Quadro A1 – Assentamento da calda, altura de água e volumes de calda adicionados (informações recolhidas das “partes diárias”). Alinhamento Nascente. (cont.)

PAINEIS	DATA	NÍVEL ÁGUA ACIMA DO CLAUSTRO	PASSE	HORA	ASSENTAM. DA CALDA (m)	ALTURA DE ÁGUA NA VALA (m)	VOLUME ADICIONADO (m³)
PE22	2001-12-21	Seco	1	22:00	2.0	1.0	5.0
	2001-12-22		1	08:00	1.5	0.5	3.5
	2001-12-26		1	08:00	1.5	0.5	3.5
PE23	2002-02-22	1,5 m	1	15:00	1.0	0.9	8.0
	2002-02-22		1	18:00	2.0		
	2002-02-22		1	21:00	3.0		
	2002-02-23		1	?	1.0	0.3	2.0
	2002-02-23		1	?	2.0		
	2002-02-24		1	?	1.0		
	2002-02-24		1	?	2.0		
PE24	2001-12-26	Seco	1	22:00	2.0	0.5	5.0
	2001-12-28		2	07:00	1.5	0.5	5.0
	2001-12-28		3	07:00	1.5	0.5	5.0
PE25	2002-02-05	1,2 m	1	17:00	1.0	0.6	7.0
	2002-02-05		1	20:00	2.0		
	2002-02-05		1	23:00	3.0		
	2002-02-06		1	02:00	1.0	0.2	3.0
PE26	Parte diária em falta						
PE27	2002-02-25	1,5 m	1	17:00	1.0	0.9	8.0
	2002-02-25		1	20:00	2.0		
	2002-02-25		1	23:00	3.0		
	2002-02-26		1	02:00	1.0	0.4	3.0
	2002-02-26		1	05:00	2.0		
PE28	2002-01-30	Seco	1	18:00	1.0	0.5	7.0
	2002-01-30		1	21:00	2.0		
	2001-01-30		1	01:00	3.0	0.4	6.0
	2001-01-31		1	20:00	0.8		
	2001-01-31		1	00:00	?		
PE29	2002-02-21	1,5 m	1	15:00	1.0	0.8	7.0
	2002-02-21		1	18:00	2.0		
	2002-02-21		1	21:00	3.0		
	2002-02-22		1	00:00	1.0	0.4	4.0
	2002-02-22		1	03:00	2.0		
PE30	2002-01-30	Seco	1	23:00	1.0	0.6	7.0
	2002-01-31		1	02:00	2.0		
	2002-01-31		1	05:00	3.0		
	2002-01-31		1	23:00	1.0	0.6	4.0
	2002-02-01		1	02:00	2.0		
	2002-02-01		1	05:00	3.0		
PE31	2002-02-20	1,5 m	1	19:00	1.0	0.8	7.0
	2002-02-20		1	22:00	2.0		
	2002-02-21		1	02:00	3.0		
	2002-02-21		1	05:00	1.0	4.0	4.0
	2002-02-21		1	08:00	2.0		
PE32	2001-12-29	Seco	1	22:00	1.5	0.5	3.5
	2001-12-30		1	08:00	1.0	0.5	2.5
PE33	2002-02-19	1,3 m	1	20:00	1.0	0.8	8.0
	2002-02-19		1	23:00	2.0		
	2002-02-20		1	02:00	3.0		
	2002-02-20		1	05:00	1.0	0.4	3.0
	2002-02-20		1	08:00	2.0		
PE34	Parte diária em falta						

Quadro A1 – Assentamento da calda, altura de água e volumes de calda adicionados (informações recolhidas das “partes diárias”). Alinhamento Nascente. (cont.)

PAINEIS	DATA	NÍVEL ÁGUA ACIMA DO CLAUSTRO	PASSE	HORA	ASSENTAM. DA CALDA (m)	ALTURA DE ÁGUA NA VALA (m)	VOLUME ADICIONADO (m³)
PE35	2002-02-20	1,5 m	1	14:00	1.0	0.8	7.0
	2002-02-20		1	17:00	2.0		
	2002-02-20		1	20:00	3.0	0.5	
	2002-02-20		1	23:00	1.0		
	2002-02-21		1	02:00	2.0		5.0
PE36	Parte diária em falta						
PE37	2002-02-19	1,3 m	1	18:00	1.0	0.8	7.0
	2002-02-19		1	21:00	2.0		
	2002-02-20		1	00:00	3.0	0.4	
	2002-02-20		1	03:00	1.0		
	2002-02-20		1	06:00	2.0		4.0
PE38	Parte diária em falta						
PE39	2002-02-19	1,3 m	1	14:00	1.0	0.9	8.0
	2002-02-19		1	17:00	2.0		
	2002-02-19		1	20:00	3.0	0.4	
	2002-02-19		1	23:00	1.0		
	2002-02-20		1	02:00	2.0		3.0
PE40	2001-01-09	Seco	1	22:00	1.5	0.5	6.0
	2001-01-10		1	01:00	2.5		
	2001-01-10		1	20:00	1.0	0.5	
	2001-01-10		2	22:00	2.0		
	2001-01-11		3	01:00	3.0		17.0
PE41	2002-02-18	1,2 m	1	15:00	1.0	1.0	9.0
	2002-02-18		1	18:00	2.0		
	2002-02-18		1	21:00	3.0	0.6	
	2002-02-19		1	00:00	1.0		
	2002-02-19		1	03:00	2.0		
	2002-02-19		1	06:00	3.0	4.0	
PE42	2002-01-13	Seco	1	?	1.0	0.5	12.0
PE43	2002-02-14	0,8 m	1	21:00	1.0	0.9	8.0
	2002-02-15		1	00:00	2.0		
	2002-02-15		1	03:00	3.0	0.8	
	2002-02-15		2	14:00	1.0		
	2002-02-15		2	17:00	2.0		
	2002-02-15		2	20:00	3.0	0.8	
	2002-02-15		3	14:00	1.0		
	2002-02-15		3	17:00	2.0		
	2002-02-15		3	20:00	3.0	4.0	
PSE	2002-01-16	Seco	1	21:00	1.0	0.5	7.0
	2002-01-16		1	23:00	2.0		
	2002-01-17		1	01:00	3.0	0.5	
	2002-01-16		3	21:00	1.0		
	2002-01-16		3	23:00	2.0		
	2002-01-17		3	01:00	3.0		17.0

Quadro A2 – Assentamento da calda, altura de água e volumes de calda adicionados (informações recolhidas das “partes diárias”). Alinhamento Sul. (cont.)

PAINEIS	DATA	NÍVEL ÁGUA ACIMA DO CLAUSTRO	PASSE	HORA	ASSENTAM. DA CALDA (m)	ALTURA DE ÁGUA NA VALA (m)	VOLUME ADICIONADO (m ³)
PS1	2002-02-07	1,0 m	1	15:00	1.0	0.8	8.0
	2002-02-07		1	18:00	2.0		
	2002-02-07		1	21:00	3.0	0.4	
	2002-02-08		1	00:00	1.0		
	2002-02-08		1	03:00	2.0		
PS2	2002-01-21	Seco	1	20:00	1.0	0.5	7.0
	2002-01-21		1	22:00	2.0		
	2002-01-22		1	01:00	3.0		
	2002-01-22		3	20:00	1.0	0.5	
	2002-01-22		3	22:00	2.0		
	2002-01-23		3	01:00	3.0		
PS3	2002-02-07	1,0 m	1	21:00	1.0	0.8	7.0
	2002-02-08		1	00:00	2.0		
	2002-02-08		1	03:00	3.0		
	2002-02-08		1	06:00	1.0	0.5	
	2002-02-08		1	09:00	2.0		
	2002-02-08		1	12:00	3.0		
PS4	2002-01-14	Seco	2	19:00	1.0	0.5	15.0
	2002-01-14		2	21:00	2.0		
	2002-01-15		2	00:00	3.0		
	2002-01-15		3	20:00	1.0	0.5	
	2002-01-16		3	22:00	2.0		
PS5	2002-02-05	1,2 m	1	15:00	1.0	0.7	6.0
	2002-02-05		1	18:00	2.0		
	2002-02-05		1	21:00	3.0		
	2002-02-06		1	01:00	1.0	0.6	
	2002-02-06		1	04:00	2.0		
PS6	2002-01-09	Seco	1	22:00	1.0	0.5	5.0
	2002-01-10		1	01:00	2.0		
	2002-01-10		1	20:00	1.5		
	2002-01-10		2	22:00	2.5	0.5	
	2002-01-11		3	01:00	3.5		
PS7	2002-02-05	1,2 m	1	19:00	1.0	0.6	6.0
	2002-02-06		1	00:00	2.0		
	2002-02-06		1	03:00	3.0		
	2002-02-06		1	06:00	1.0	0.6	
	2002-02-06		1	09:00	2.0		
PS8	2002-01-13	Seco	1	?	1.0	0.5	12.0
PS9	2002-02-08	1,0 m	1	13:00	1.0	0.9	9.0
	2002-02-08		1	16:00	2.0		
	2002-02-08		1	19:00	3.0		
	2002-02-08		1	22:00	1.0	0.6	
	2002-02-09		1	01:00	2.0		
PS10	2002-01-18	Seco	1	15:00	1.0	0.5	7.0
	2002-01-18		1	18:00	2.0		
	2002-01-18		1	22:00	3.0		
	2002-01-19		1	?	1.0	0.3	
	2002-01-19		1	?	1.5		
	2002-01-20		1	?	2.3		
PS11	2002-02-08	1,0 m	1	19:00	1.0	0.8	8.0
	2002-02-08		1	22:00	2.0		
	2002-02-09		1	01:00	3.0		
	2002-02-09		1	04:00	1.0	0.6	
	2002-02-09		1	04:00	1.0		

Quadro A2 – Assentamento da calda, altura de água e volumes de calda adicionados (informações recolhidas das “partes diárias”). Alinhamento Sul. (cont.)

PAINEIS	DATA	NÍVEL ÁGUA ACIMA DO CLAUSTRO	PASSE	HORA	ASSENTAM. DA CALDA (m)	ALTURA DE ÁGUA NA VALA (m)	VOLUME ADICIONADO (m³)
PS12	2002-01-22	Seco	1	16:00	1.0	0.5	6.0
	2002-01-22		1	19:00	2.0		
	2002-01-23		1	00:00	3.0		
	2002-01-22		3	16:00	1.0	0.5	16.0
	2002-01-22		3	19:00	2.0		
	2002-01-23		3	00:00	3.0		
PS13	2002-02-09	1,0 m	1	15:00	1.0	0.9	8.0
	2002-02-09		1	18:00	2.0		
	2002-02-09		1	21:00	3.0		
	2002-02-10		1	00:00	1.0	0.4	2.0
	2002-02-10		1	?	1.0	0.4	2.0
PS14	2002-01-23	Seco	1	20:00	1.0	0.5	7.0
	2002-01-23		1	23:00	2.0		
	2002-01-24		1	01:00	3.0		
	2002-01-23		3	20:00	1.0	0.5	15.0
	2002-01-23		3	23:00	2.0		
	2002-01-24		3	01:00	3.0		
PS15	2002-02-13	0,8 m	1	13:00	1.0	0.9	8.0
	2002-02-13		1	16:00	2.0		
	2002-02-13		1	19:00	3.0		
	2002-02-13		1	22:00	1.0	0.4	4.0
	2002-02-14		1	01:00	2.0		
PS16	2002-01-23	Seco	1	21:00	1.0	0.5	7.0
	2002-01-24		1	00:00	2.0		
	2002-01-24		1	03:00	3.0		
	2002-01-23		3	21:00	1.0	0.5	16.0
	2002-01-24		3	00:00	2.0		
	2002-01-24		3	03:00	3.0		
PS17	2002-02-18	1,2 m	1	19:00	1.0	0.9	8.0
	2002-02-18		1	22:00	2.0		
	2002-02-19		1	02:00	3.0		
	2002-02-19		1	05:00	1.0	0.4	3.0
	2002-02-19		1	08:00	2.0		
PS18	2002-02-01	Seco	1	15:00	1.0	0.8	8.0
	2002-02-01		1	18:00	2.0		
	2002-02-01		1	21:00	3.0		
	2002-02-02		1	?	1.0	0.4	5.0
	2002-02-02		1	?	2.0		
PS19	2002-02-21	1,5 m	1	20:00	1.0	0.9	8.0
	2002-02-21		1	23:00	2.0		
	2002-02-22		1	02:00	3.0		
	2002-02-22		1	05:00	1.0	0.4	4.0
	2002-02-22		1	08:00	2.0		

Quadro A3 – Assentamento da calda, altura de água e volumes de calda adicionados (informações recolhidas das “partes diárias”). Alinhamento Poente.

PAINEIS	DATA	NÍVEL ÁGUA ACIMA DO CLAUSTRO	PASSE	HORA	ASSENTAM. DA CALDA (m)	ALTURA DE ÁGUA NA VALA (m)	VOLUME ADICIONADO (m³)
PW1	2002-02-04	1,2 m	1	18:00	1.0	0.5	7.0
	2002-02-04		1	21:00	2.0		
	2002-02-05		1	00:00	3.0	0.3	
	2002-02-05		1	01:00	1.0		
PW2	2002-02-22	1,5 m	1	00:00	1.0	0.8	8.0
	2002-02-22		1	15:00	2.0		
	2002-02-22		1	18:00	3.0		
	2002-02-23		1	21:00	1.0	0.4	
	2002-02-23		1	?	2.0		
	2002-02-24		1	?	1.0	0.2	
	2002-02-24		1	?	2.0		
PW3	2002-01-22	Seco	1	23:00	1.0	0.5	2.5
	2002-01-23		2	02:00	1.5		8.0
	2002-01-23		3	05:30	1.0		5.5
PW4	2002-02-13	0,8 m	1	19:00	1.0	0.8	7.0
	2002-02-13		1	22:00	2.0		
	2002-02-14		1	02:00	3.0		
	2002-02-14		1	05:00	1.0	0.4	
	2002-02-14		1	08:00	2.0		
PW5	2002-01-25	Seco	1	15:00	1.0	0.5	7.0
	2002-01-25		1	19:00	2.0		
	2002-01-26		1	00:00	3.0		
	2002-01-27		1	?	1.0	0.4	
	2002-01-27		1	?	1.5		
	2002-01-28		1	?	0.8		
PW6	2002-02-14	0,8 m	1	14:00	1.0	0.8	7.0
	2002-02-14		1	17:00	2.0		
	2002-02-14		1	20:00	3.0		
	2002-02-14		1	23:00	1.0	0.4	
	2002-02-15		1	02:00	2.0		
PW7	2002-01-28	Seco	1	23:00	1.0	0.5	7.0
	2002-01-29		1	02:00	2.0		
	2002-01-29		1	05:00	3.0		
	2002-01-28		3	23:00	1.0	0.5	
	2002-01-29		3	02:00	2.0		
	2002-01-29		3	05:00	3.0		
PW8	2002-02-18	1,2 m	1	21:00	1.0	0.9	8.0
	2002-02-19		1	00:00	2.0		
	2002-02-19		1	03:00	3.0		
	2002-02-19		1	05:00	1.0	0.4	
	2002-02-19		1	08:00	2.0		
PW9	2002-01-30	Seco	1	22:00	1.0	0.5	8.0
	2002-01-31		1	01:00	2.0		
	2002-01-31		1	04:00	3.0		
	2002-01-30		3	22:00	1.0	0.5	
	2002-01-31		3	01:00	2.0		
	2002-01-31		3	04:00	3.0		
PW10	2002-02-25	1,5 m	1	15:00	1.0	0.8	7.0
	2002-02-25		1	18:00	2.0		
	2002-02-25		1	21:00	3.0		
	2002-02-26		1	00:00	1.0	0.4	
	2002-02-26		1	03:00	2.0		

Quadro A3 – Assentamento da calda, altura de água e volumes de calda adicionados (informações recolhidas das “partes diárias”). Alinhamento Poente. (cont.)

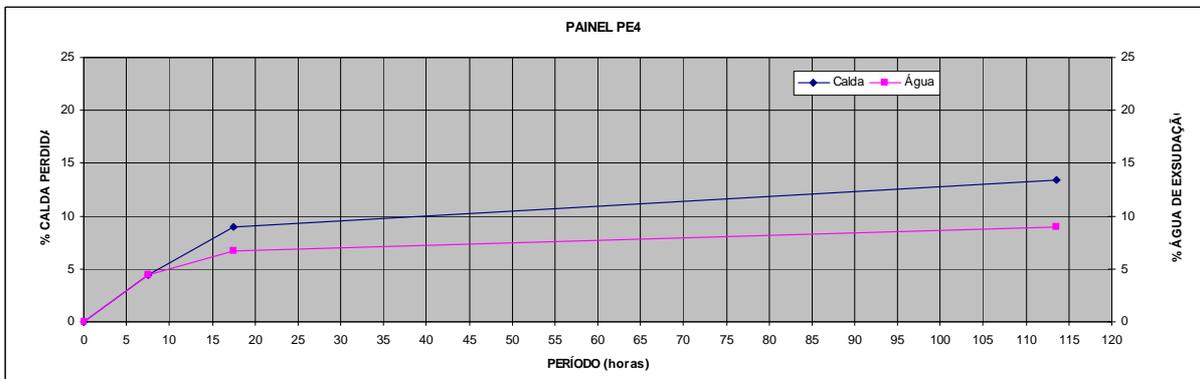
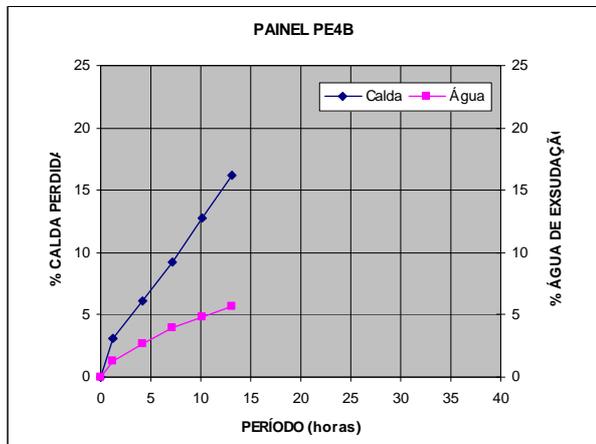
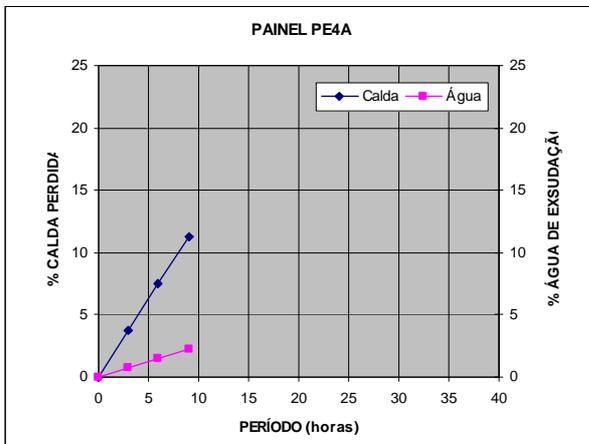
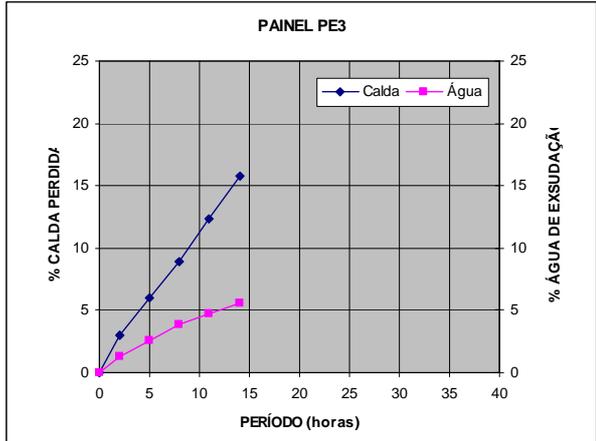
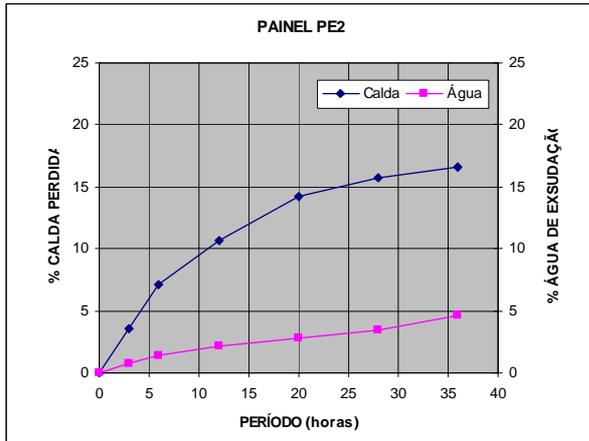
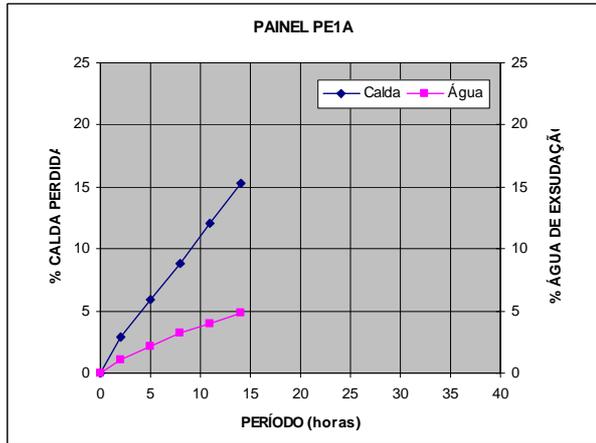
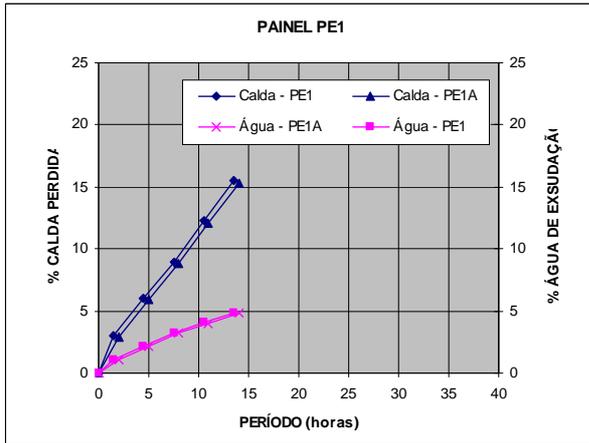
PAINEIS	DATA	NÍVEL ÁGUA ACIMA DO CLAUSTRO	PASSE	HORA	ASSENTAM. DA CALDA (m)	ALTURA DE ÁGUA NA VALA (m)	VOLUME ADICIONADO (m³)
PW11	2002-01-31	Seco	1	21:00	1.0	0.5	7.0
	2002-02-01		1	00:00	2.0		
	2002-02-01		1	03:00	3.0		
	2002-01-31		3	21:00	1.0	0.5	15.0
	2002-02-01		3	00:00	2.0		
	2002-02-01		3	03:00	3.0		
PW12	2002-02-25	1,5 m	1	19:00	1.0	0.9	8.0
	2002-02-25		1	22:00	2.0		
	2002-02-26		1	02:00	3.0		
	2002-02-26		1	04:00	1.0	0.4	3.0
	2002-02-26		1	07:00	2.0		
PW13	2002-02-06	1,0 m	1	22:00	1.0	0.5	7.0
	2002-02-07		1	01:00	2.0		
	2002-02-07		1	04:00	3.0		
	2002-02-06		3	22:00	1.0	0.5	13.0
	2002-02-07		3	01:00	2.0		
	2002-02-07		3	04:00	3.0		

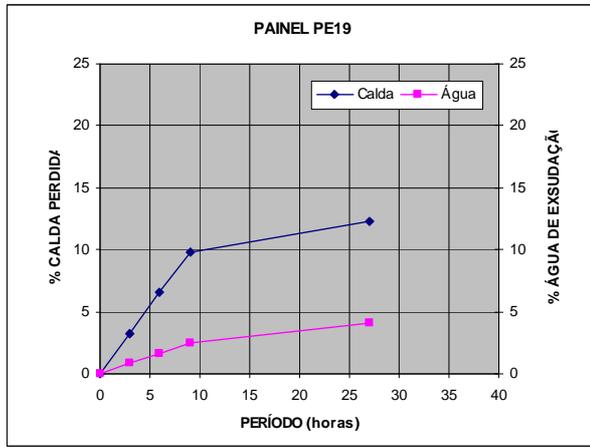
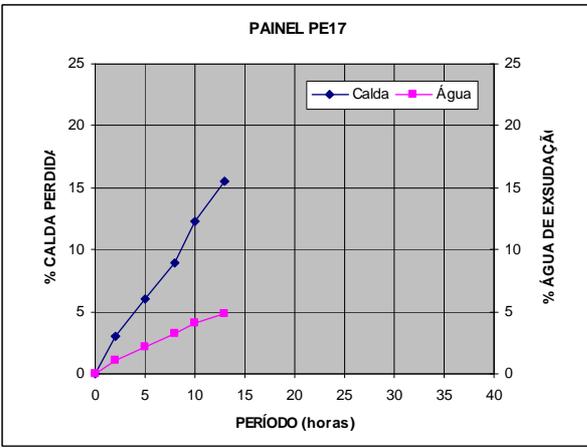
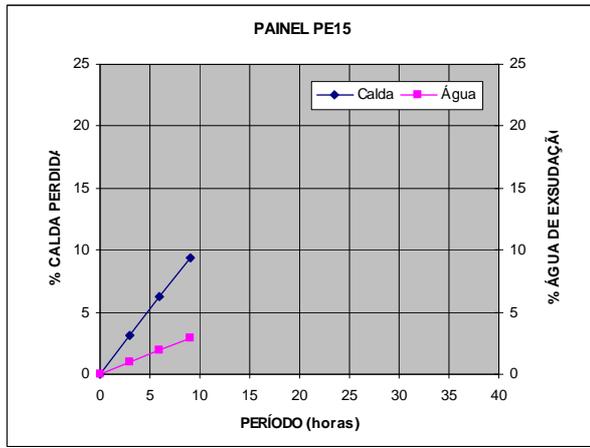
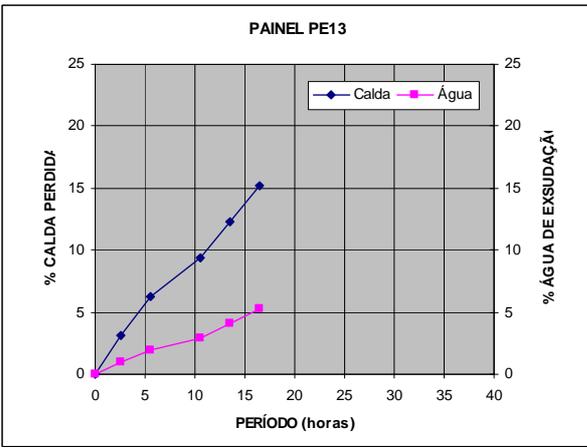
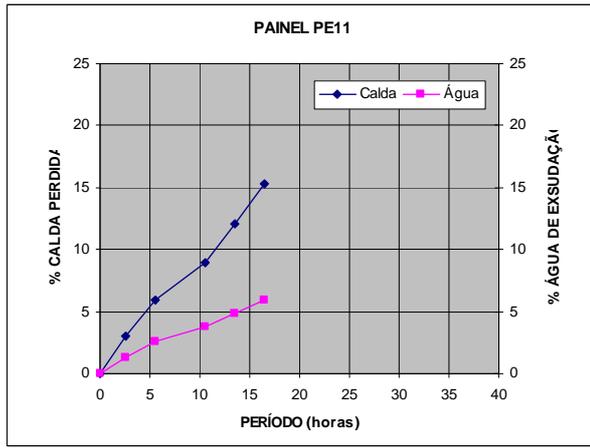
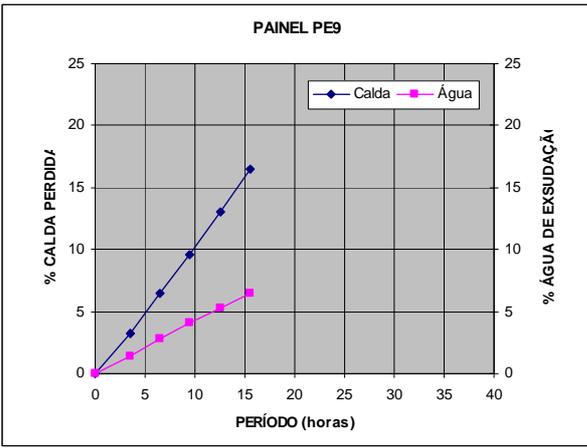
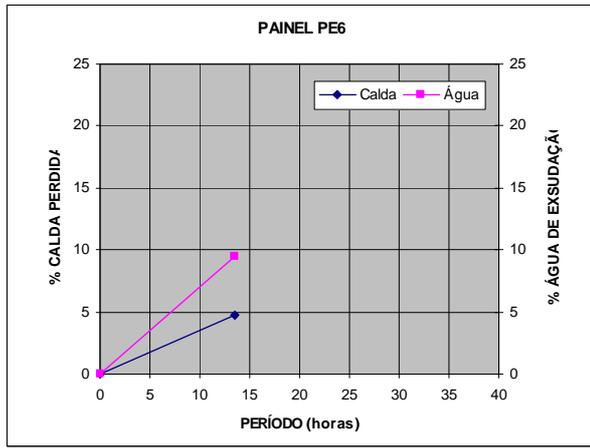
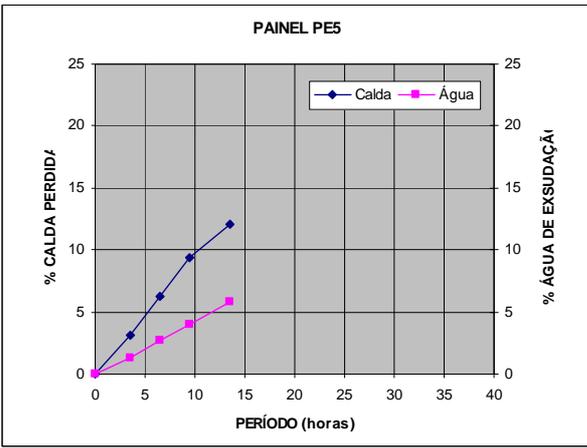
Quadro A4 – Assentamento da calda, altura de água e volumes de calda adicionados (informações recolhidas das “partes diárias”). Alinhamento Norte.

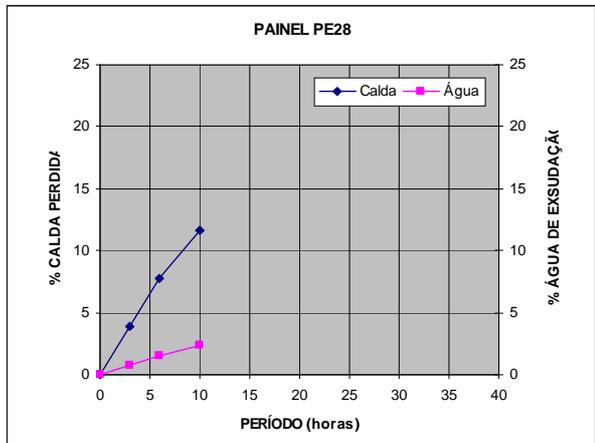
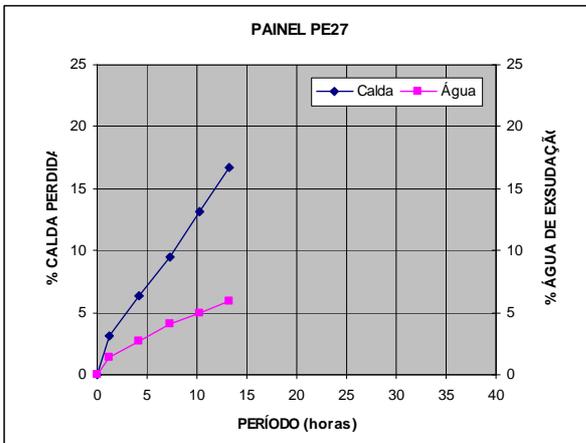
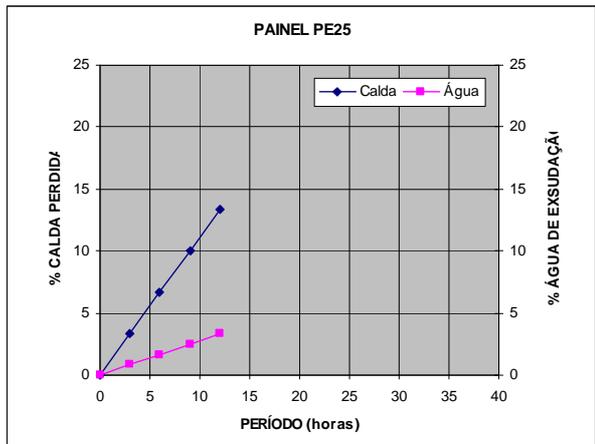
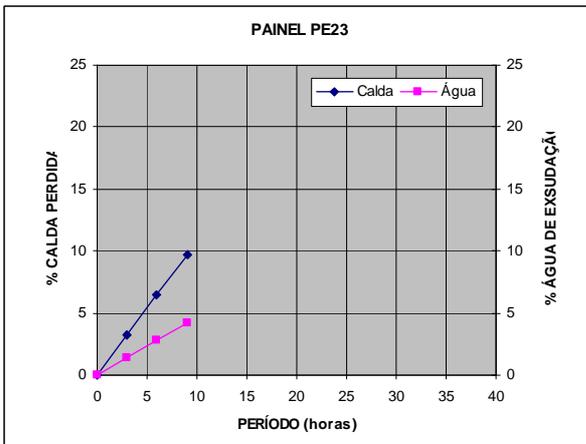
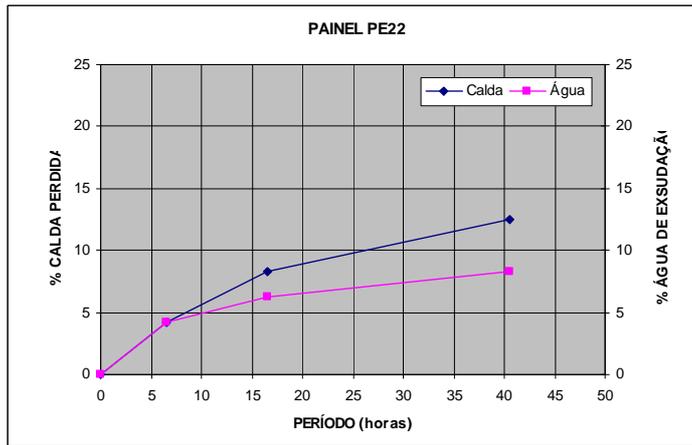
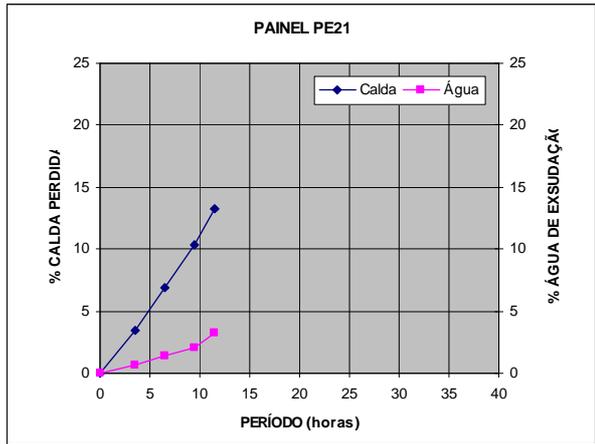
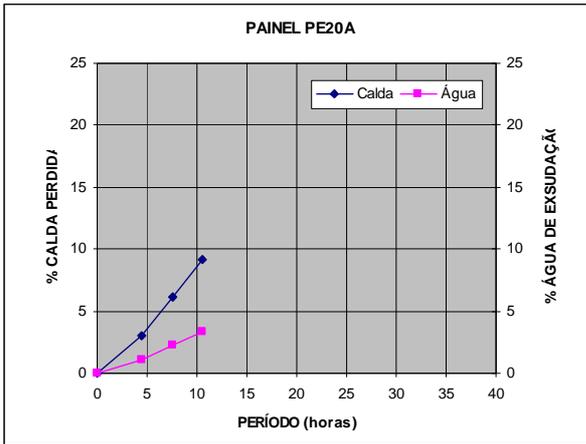
PAINEIS	DATA	NÍVEL ÁGUA ACIMA DO CLAUSTRO	PASSE	HORA	ASSENTAM. DA CALDA (m)	ALTURA DE ÁGUA NA VALA (m)	VOLUME ADICIONADO (m³)
PNE	2002-01-24	Seco	1	02:00	1.0	0.5	7.0
	2002-01-24		1	05:00	2.0		
	2002-01-24		1	08:00	3.0		
	2002-01-24		3	02:00	1.0	0.5	15.0
	2002-01-24		3	05:00	2.0		
	2002-01-24		3	08:00	3.0		
PN2	2002-02-19	1,5 m	1	20:00	1.0	0.8	7.0
	2002-02-19		1	23:00	2.0		
	2002-02-20		1	02:00	3.0		
	2002-02-20		1	05:00	1.0	0.4	4.0
	2002-02-20		1	08:00	2.0		
PN3	2002-01-03	Seco	1	00:00	1.5	0.8	3.5
	2002-01-03		1	07:00	1.0	0.5	2.5
PN3A	2002-01-03	Seco	1	00:00	1.0	0.3	2.5
PN4	2002-02-19	1,5 m	1	17:00	1.0	0.9	8.0
	2002-02-19		1	20:00	2.0		
	2002-02-19		1	23:00	3.0		
	2002-02-20		1	02:00	1.0	0.5	4.5
	2002-02-20		1	05:00	2.0		
	2002-02-20		1	08:00	3.0		
PN5	Parte diária em falta						
PN6	2002-02-18	1,2 m	1	20:00	1.0	0.9	8.0
	2002-02-18		1	23:00	2.0		
	2002-02-19		1	01:00	3.0		
	2002-02-19		1	03:00	1.0	0.4	4.0
	2002-02-19		1	06:00	2.0		

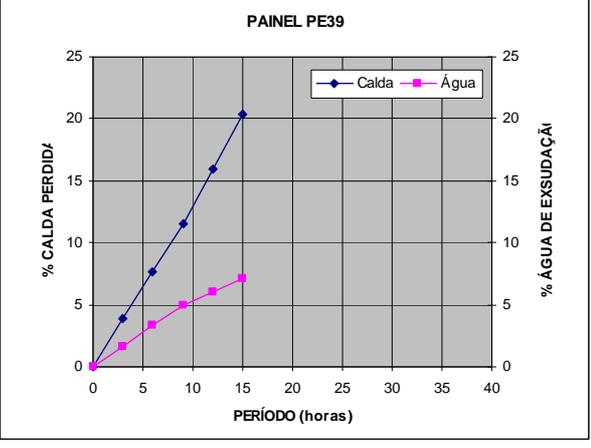
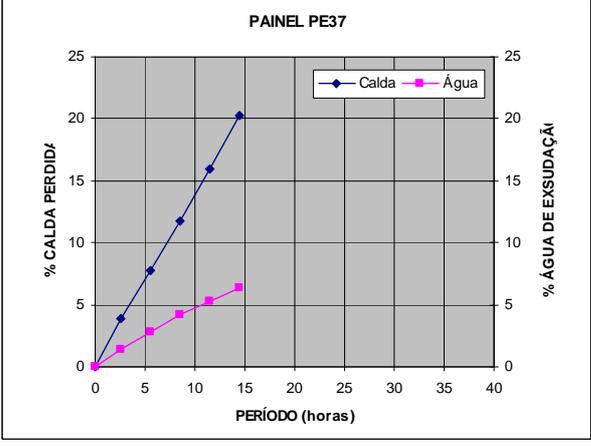
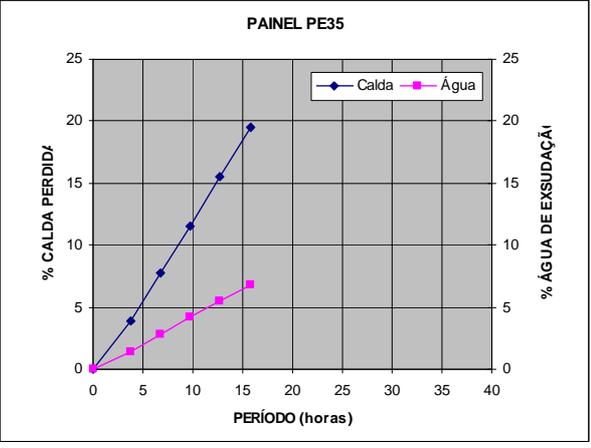
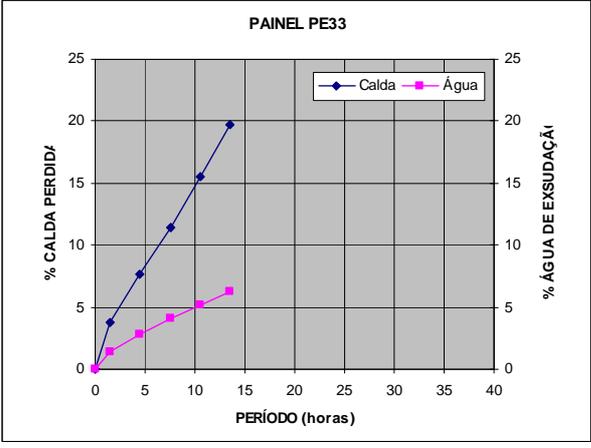
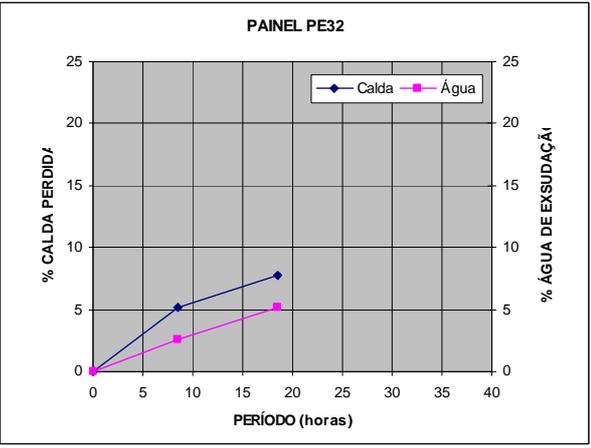
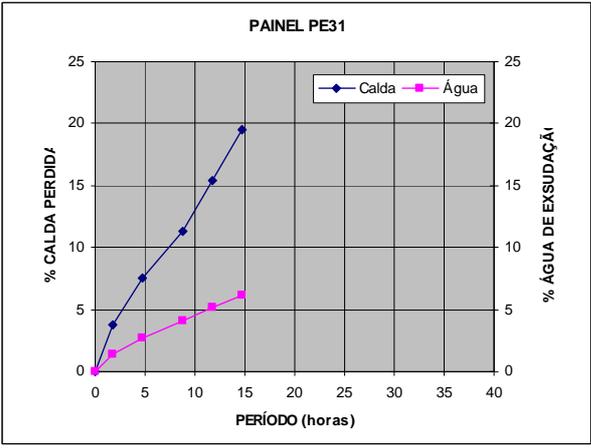
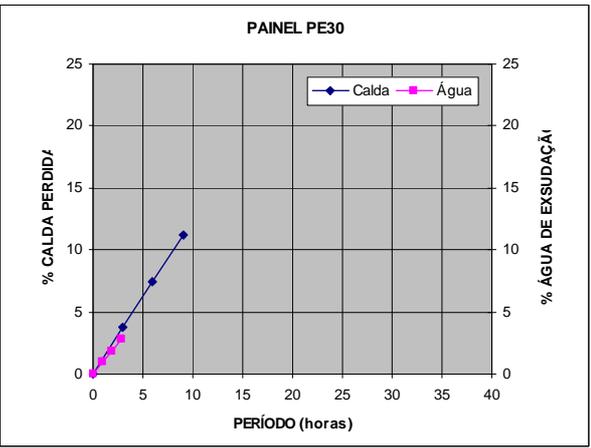
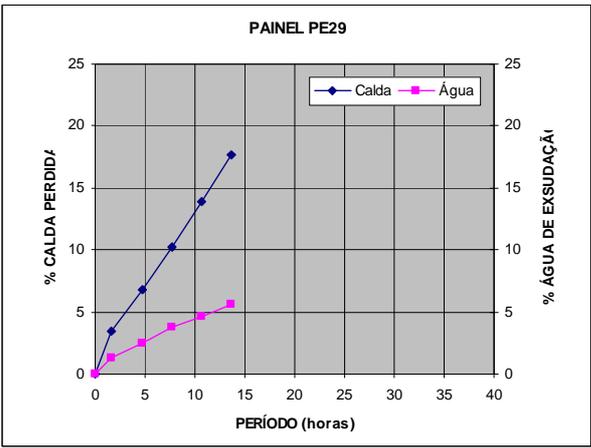
Quadro A4 – Assentamento da calda, altura de água e volumes de calda adicionados (informações recolhidas das “partes diárias”). Alinhamento Norte. (cont.)

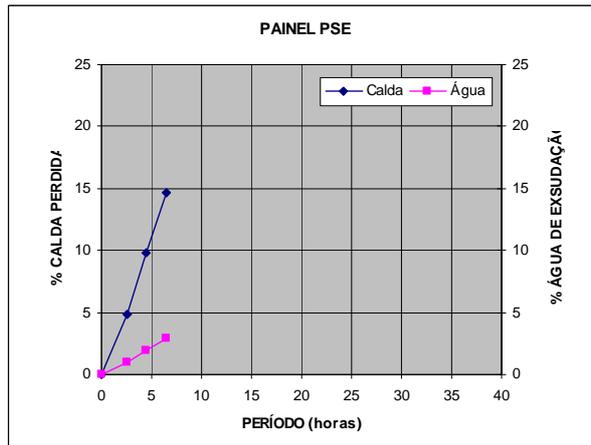
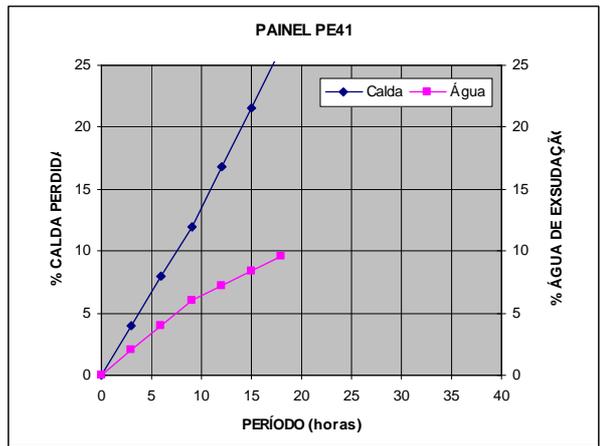
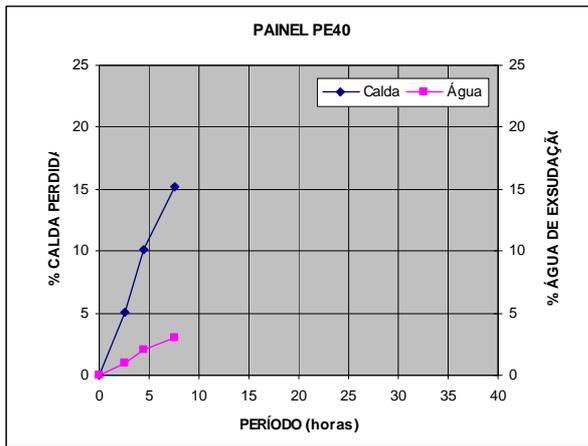
PAINEIS	DATA	NÍVEL ÁGUA ACIMA DO CLAUSTRO	PASSE	HORA	ASSENTAM. DA CALDA (m)	ALTURA DE ÁGUA NA VALA (m)	VOLUME ADICIONADO (m³)
PN7	2002-01-08	Seco	3	20:00	1.0	0.5	20.0
	2002-01-08		3	22:00	2.0		
	2002-01-09		3	02:00	3.5		
PN8	2002-02-18	1,2 m	1	17:00	1.0	0.8	7.0
	2002-02-18		1	20:00	2.0		
	2002-02-18		1	23:00	3.0	0.5	4.0
	2002-02-19		1	02:00	1.0		
	2002-02-19		1	03:00	2.0		
PN8A	2002-02-26	2,0 m	1	20:00	1.0	0.8	7.0
	2002-02-26		1	23:00	2.0		
	2002-02-27		1	02:00	3.0	0.3	2.0
	2002-02-27		1	05:00	1.0		
	2002-02-27		1	08:00	2.0		
PN9	2002-01-09	Seco	?	?	?	?	20.0
PN10	2002-02-15	0,8 m	1	13:00	1.0	0.9	7.0
	2002-02-15		1	15:00	2.0		
	2002-02-15		1	18:00	3.0	0.4	4.0
	2002-02-16		1	?	1.0		
	2002-02-16		1	?	2.0		
	2002-02-17		1	?	1.0	0.5	5.0
	2002-02-17		1	?	2.0		
	2002-02-17		1	?	3.0		
PN11	2002-01-12	Seco	1	?	1.0	0.5	24.0
PN12	2002-02-14	0,8 m	1	19:00	1.0	0.8	7.0
	2002-02-14		1	22:00	2.0		
	2002-02-15		1	01:00	3.0	0.4	4.0
	2002-02-15		1	04:00	1.0		
	2002-02-15		1	07:00	2.0		
PN13	2002-01-14	Seco	1	19:00	1.0	0.5	7.0
	2002-01-14		1	21:00	2.0		
	2002-01-15		1	00:00	3.0	0.4	14.0
	2002-01-15		3	20:00	1.0		
	2001-01-15		3	22:00	1.8		
	2001-01-16		3	00:00	2.5		
PN14	2002-02-13	0,8 m	1	22:00	1.0	0.8	7.0
	2002-02-14		1	01:00	2.0		
	2002-02-14		1	03:00	3.0	0.6	4.0
	2002-02-14		1	06:00	1.0		
	2002-02-14		1	09:00	2.0		
PN15	2002-01-16	Seco	1	21:00	1.0	0.5	7.0
	2002-01-16		1	23:00	2.0		
	2002-01-17		1	01:00	3.0		

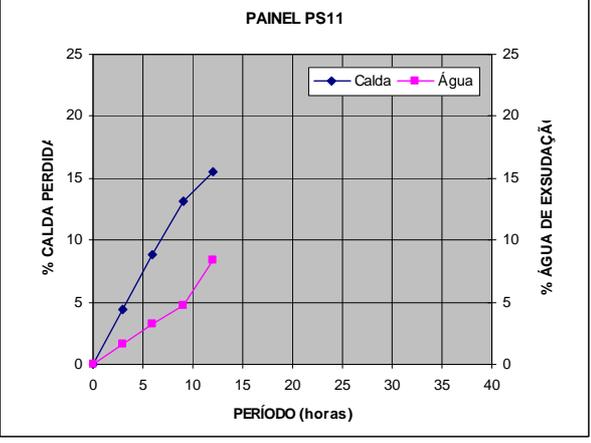
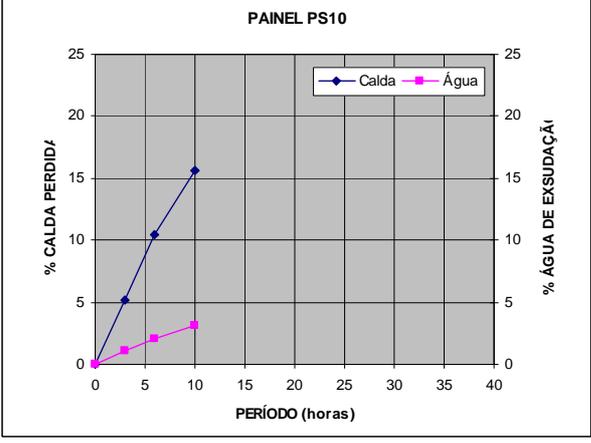
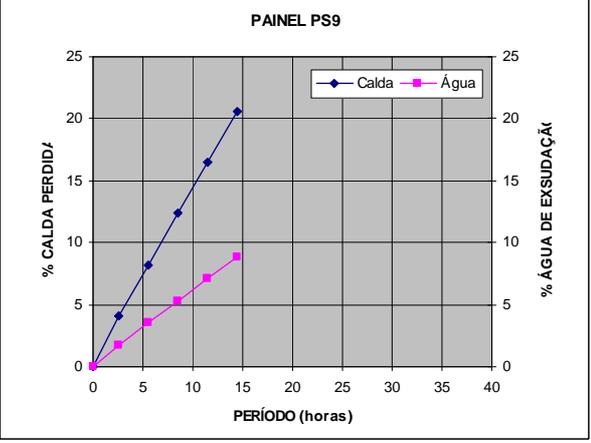
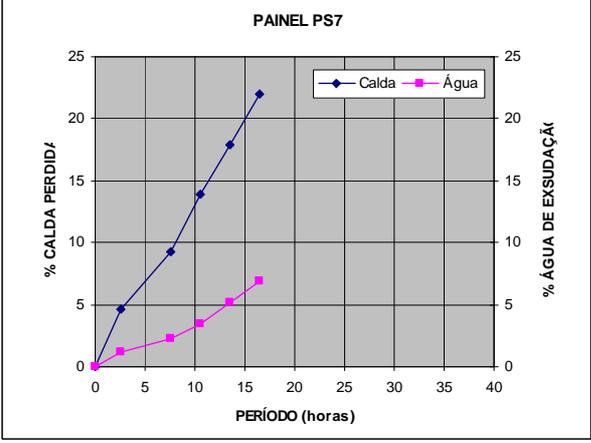
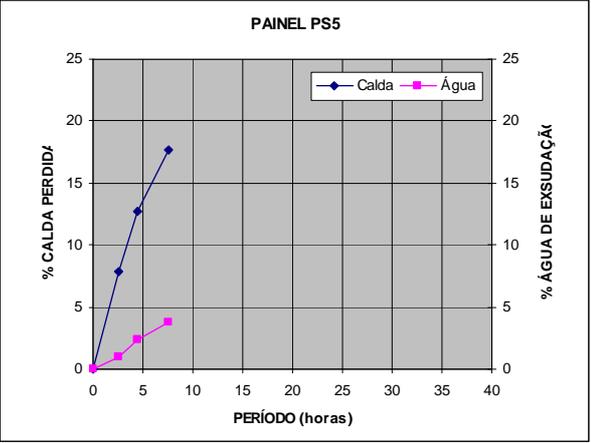
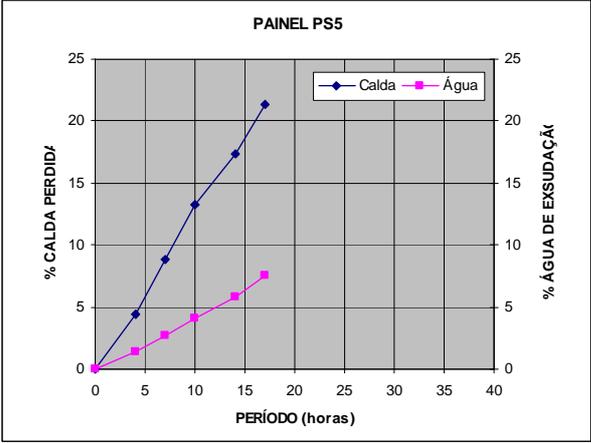
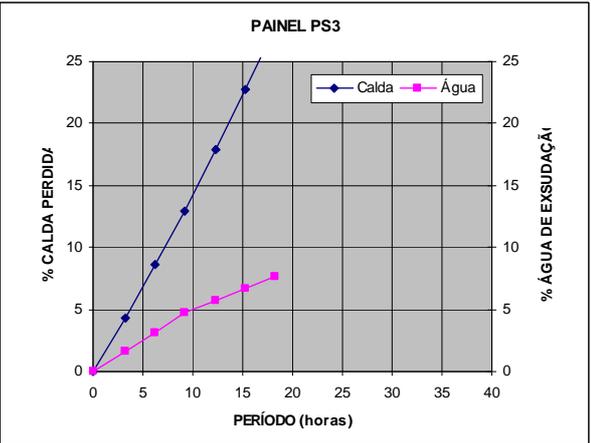
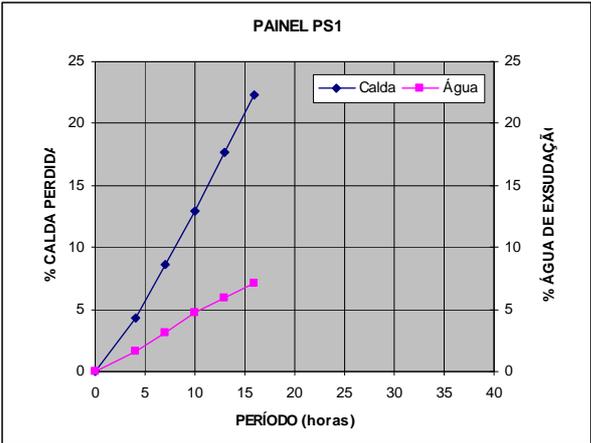


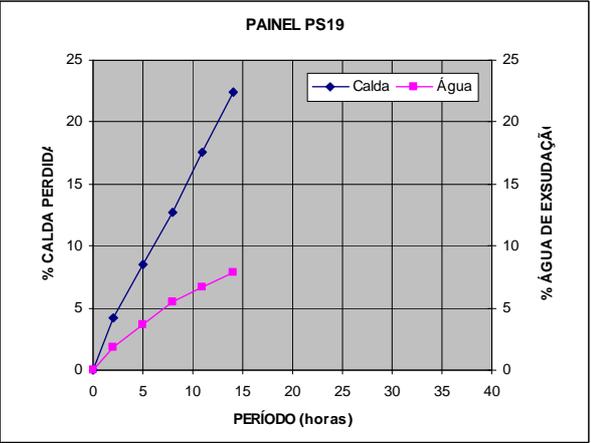
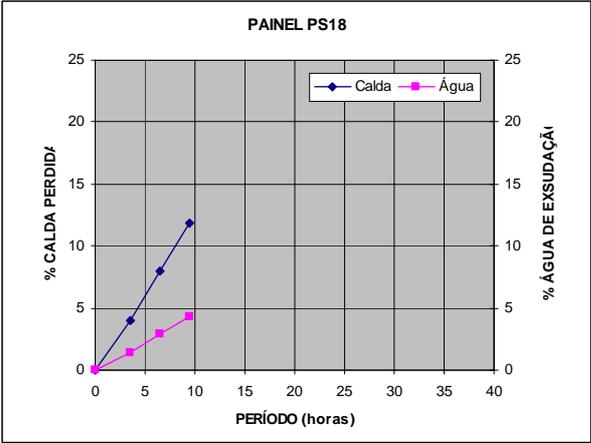
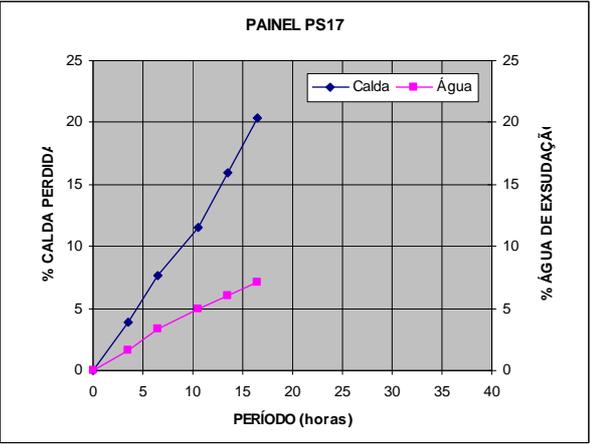
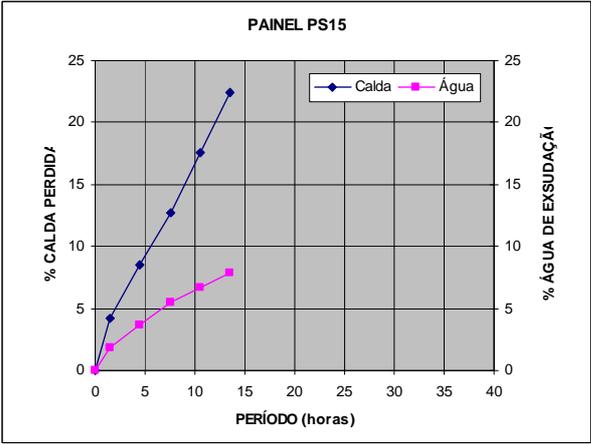
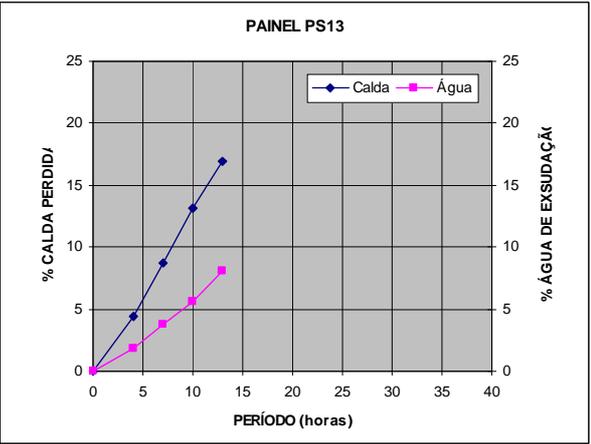
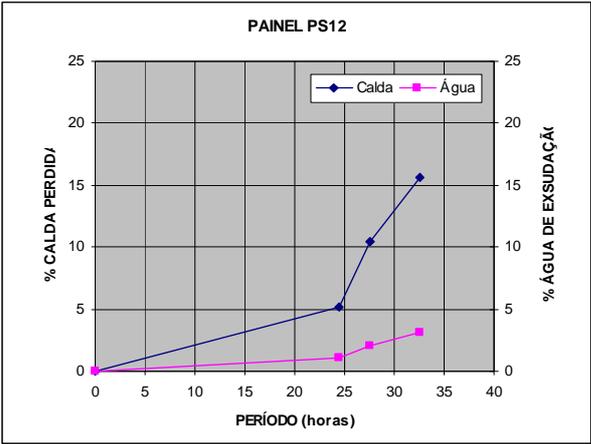


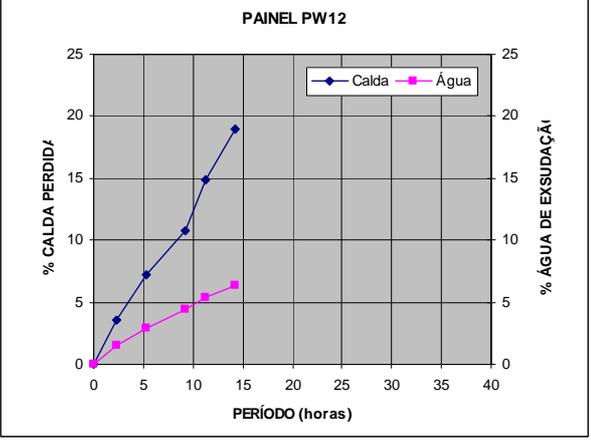
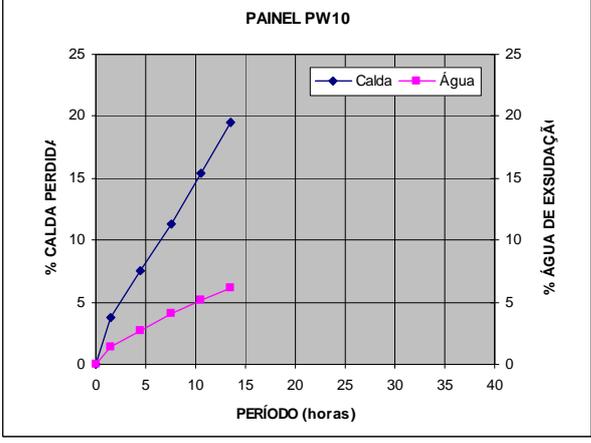
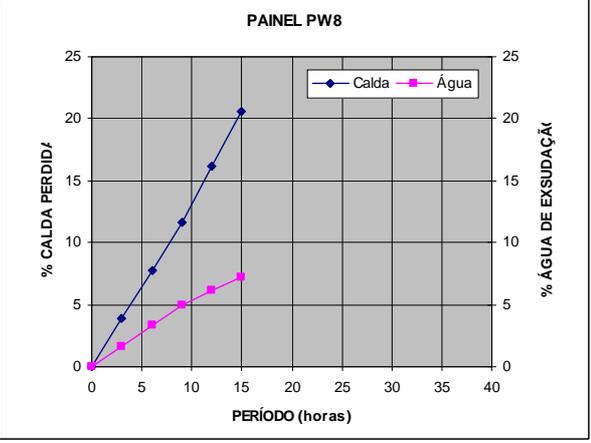
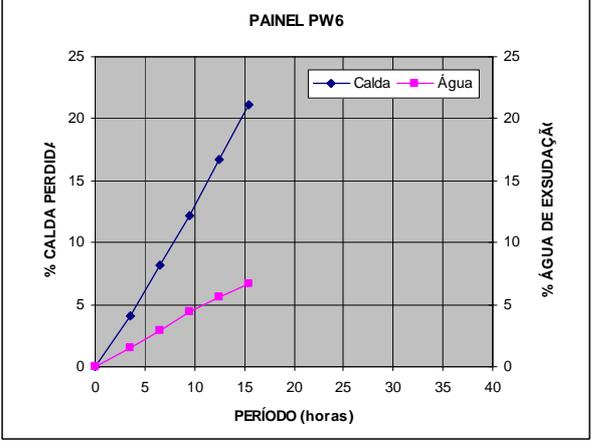
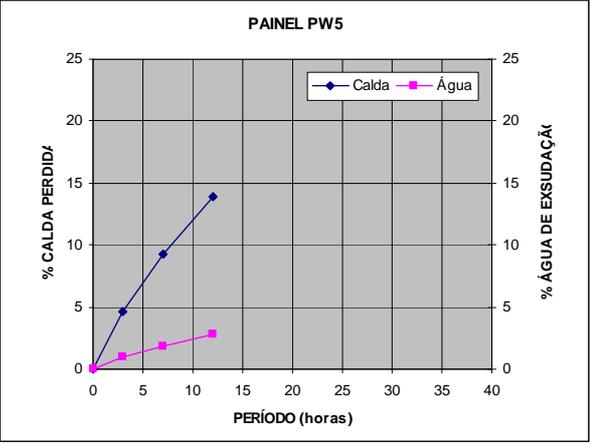
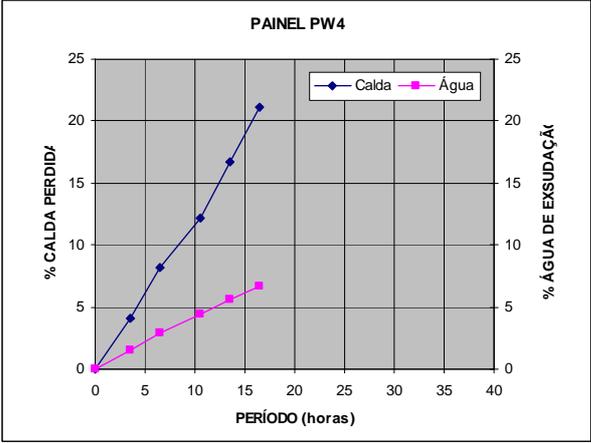
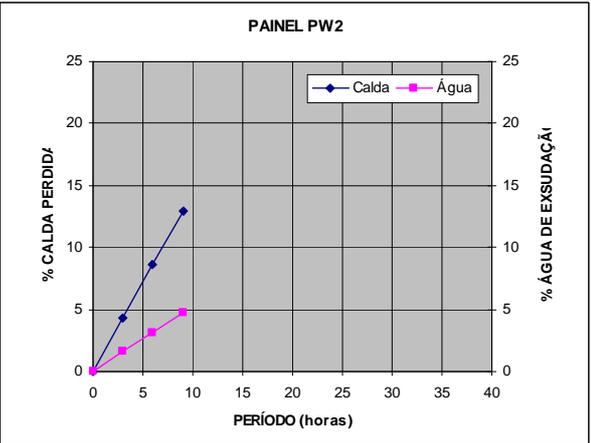
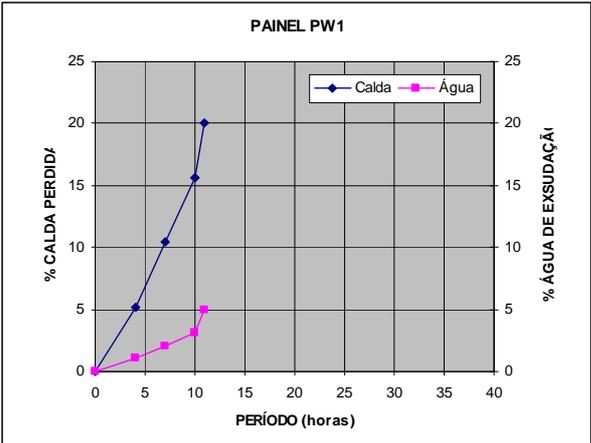


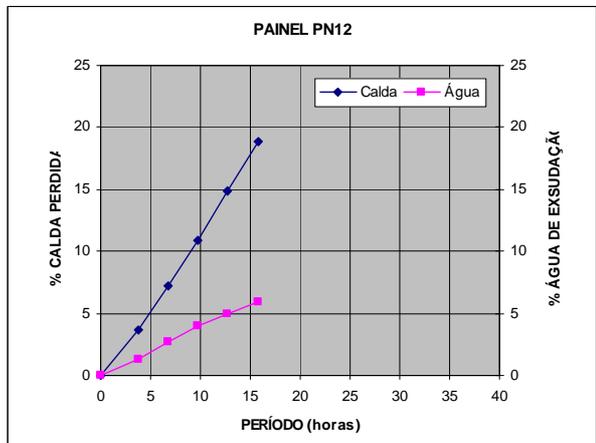
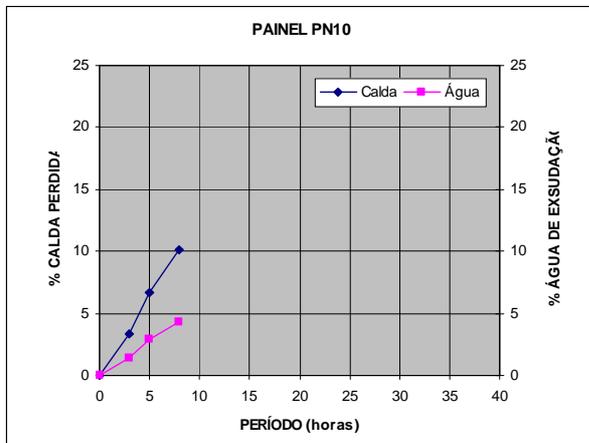
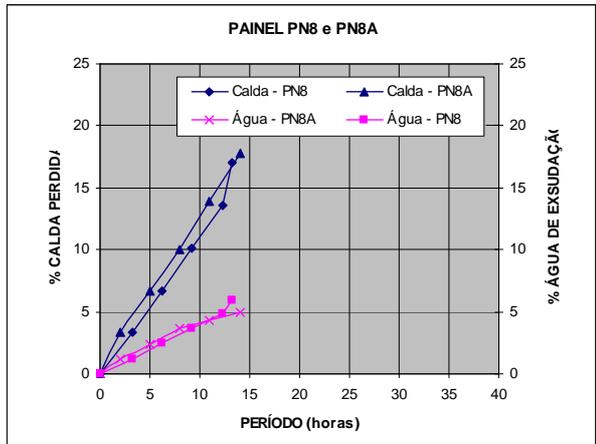
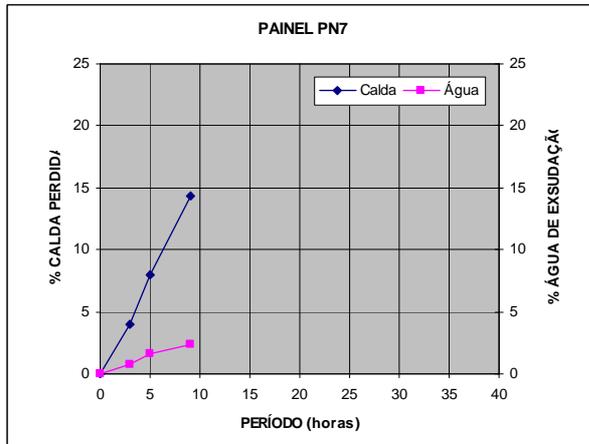
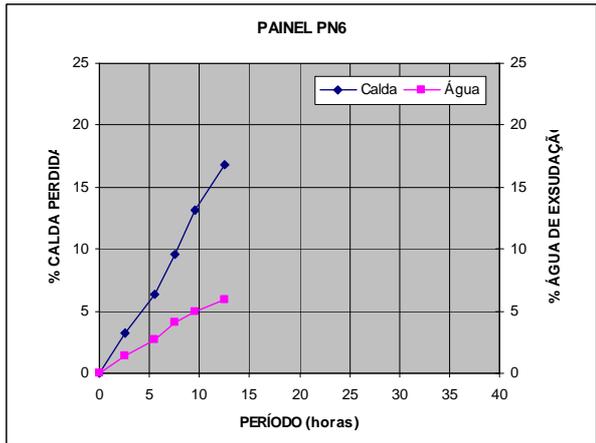
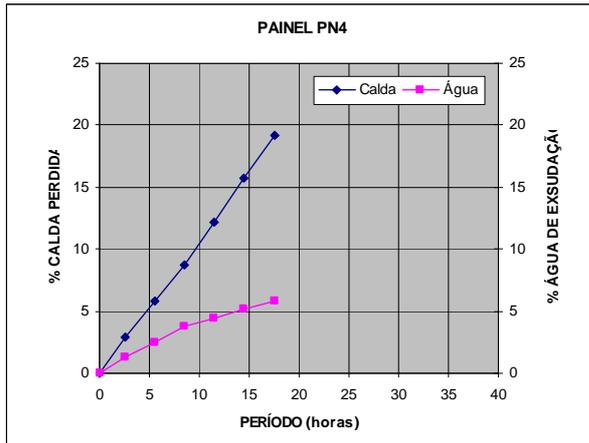
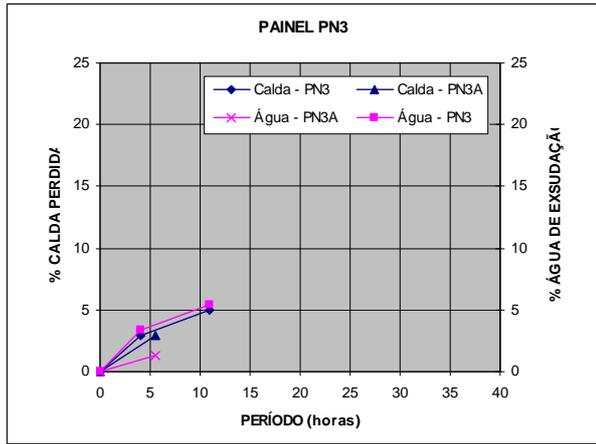
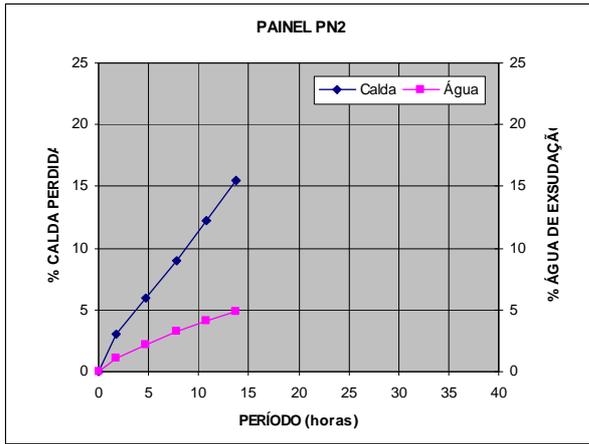


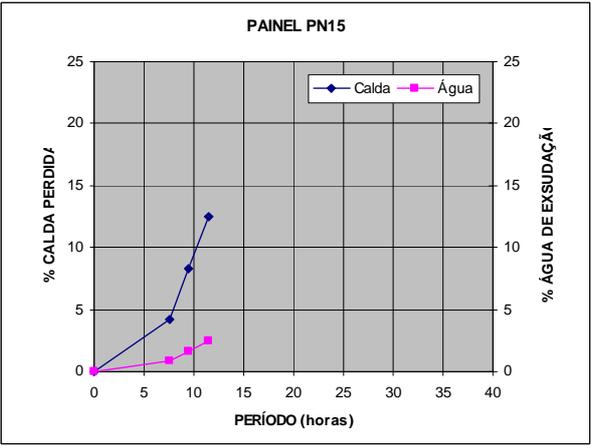
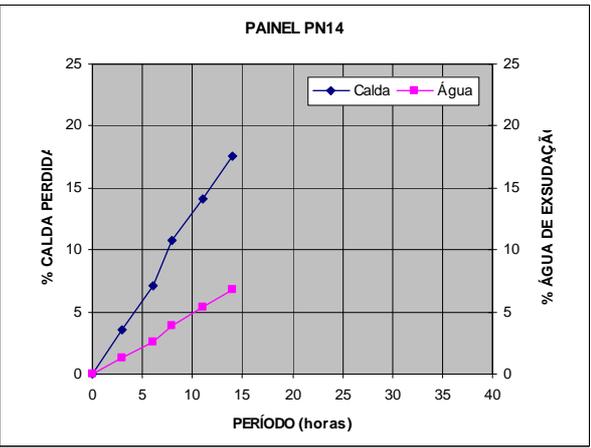
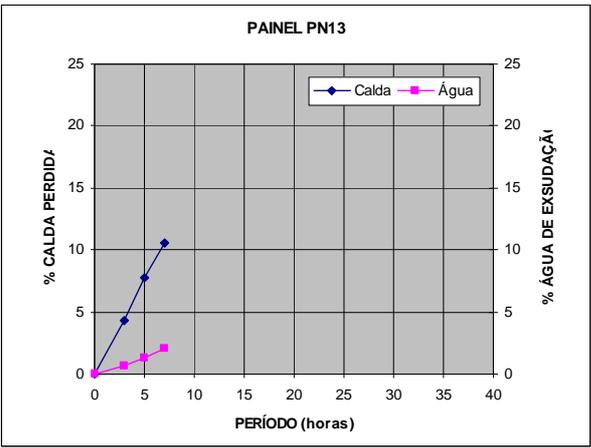


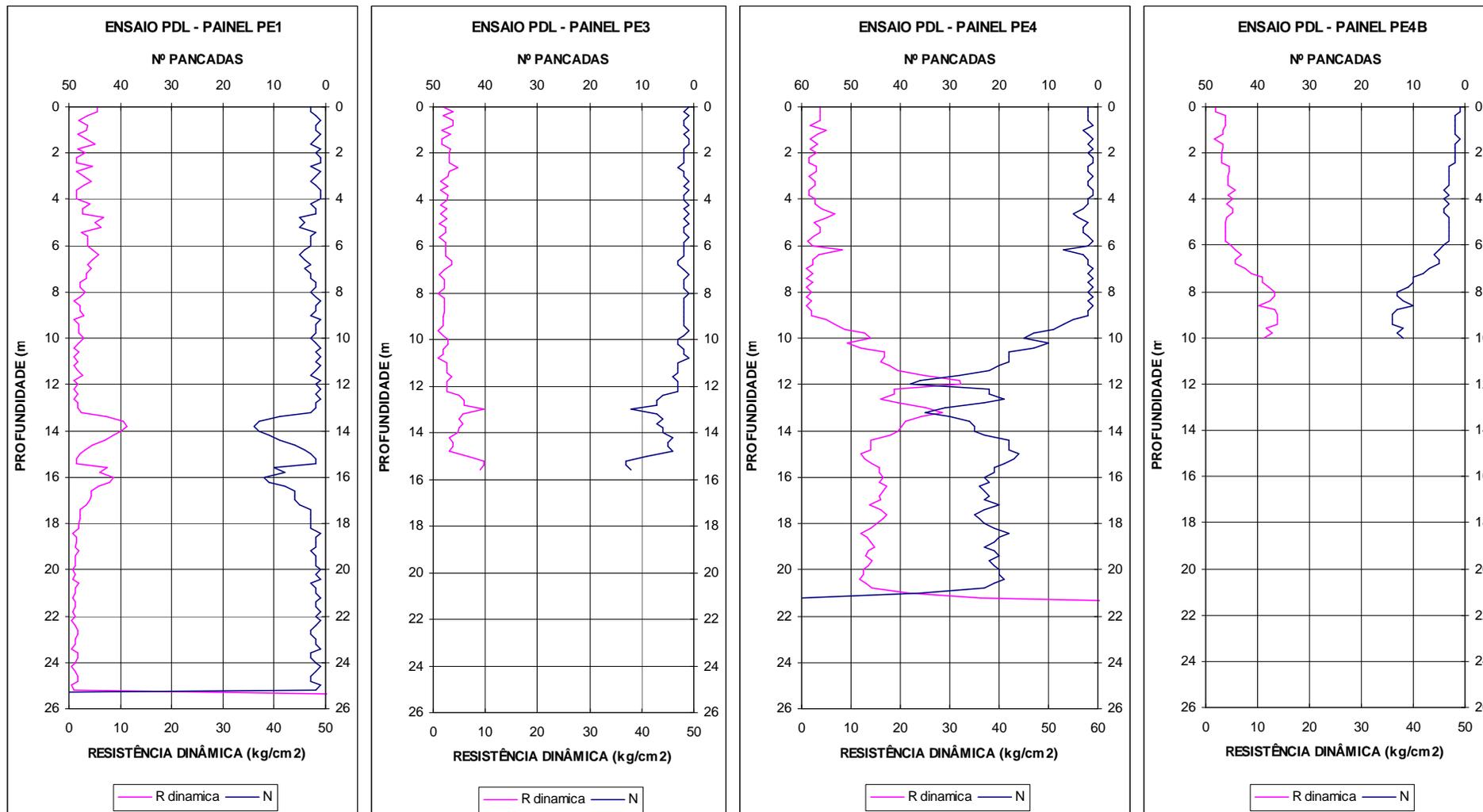












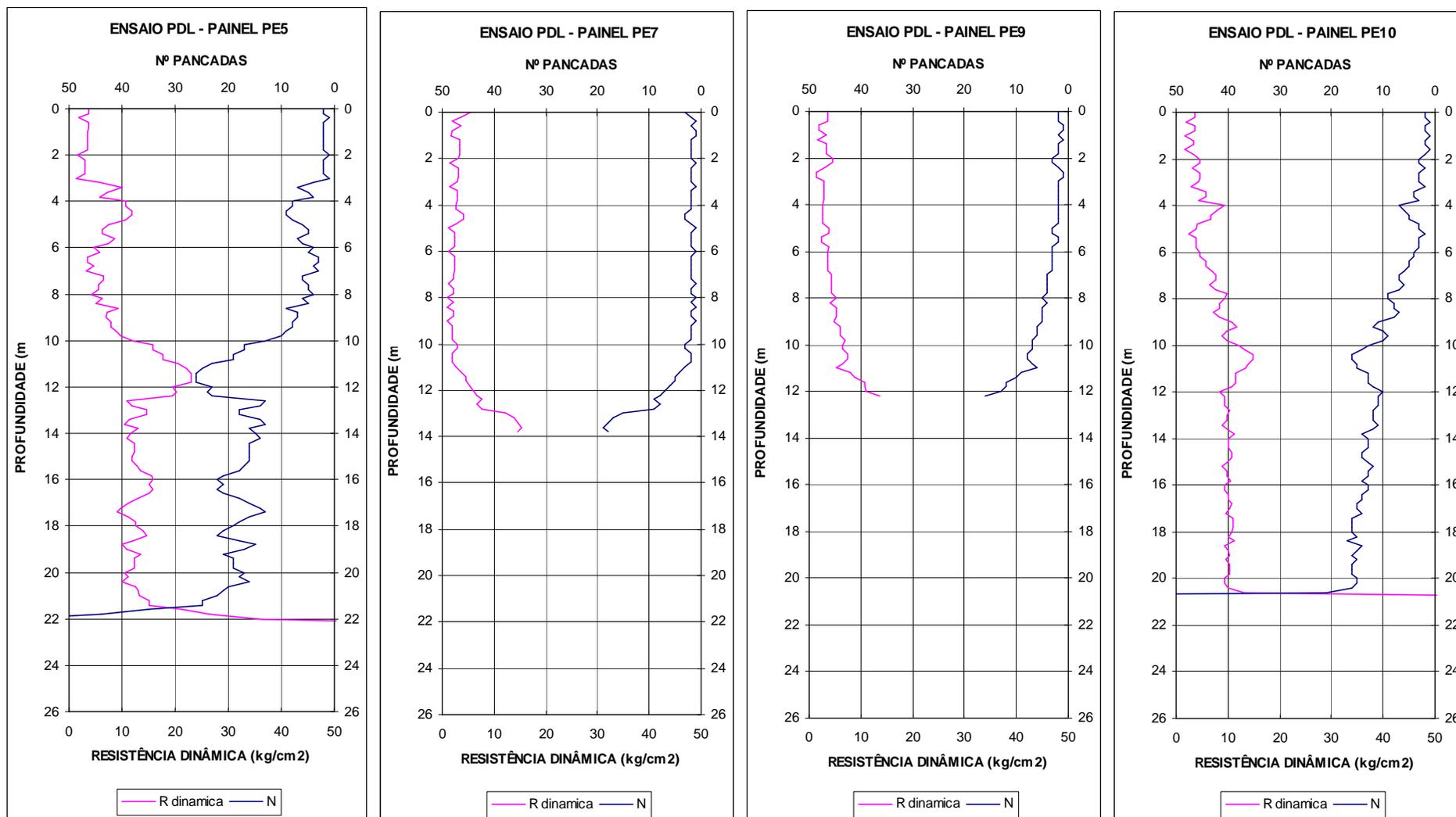
91 dias

112 dias

126 dias

164 dias

Fig. A1 – Resultados dos ensaios PDL efectuados nos painéis PE1, PE3, PE4 e PE4B.



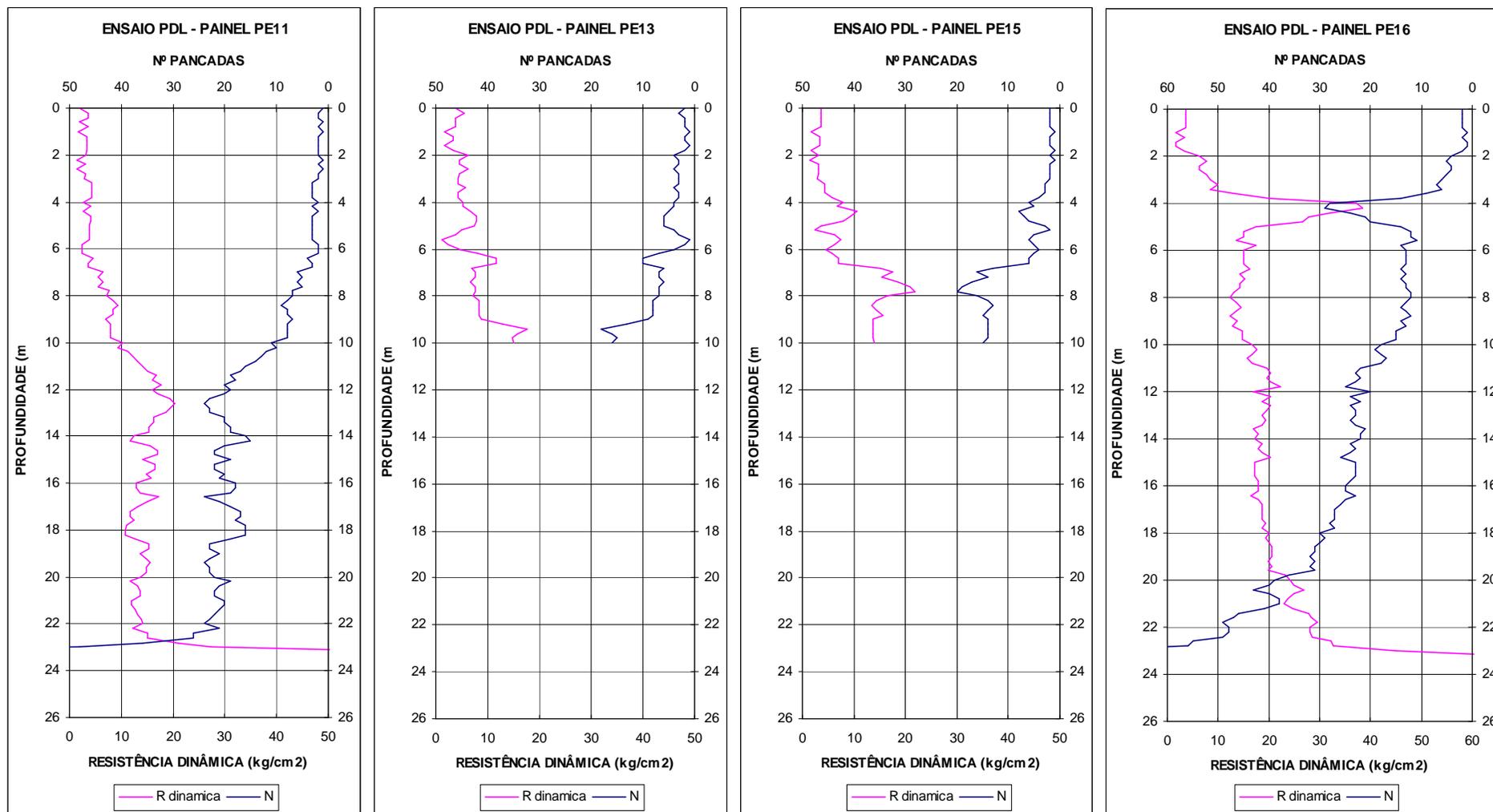
114 dias

131 dias

131 dias

167 dias

Fig. A2 – Resultados dos ensaios PDL efectuados nos painéis PE5, PE7, PE9 e PE10.



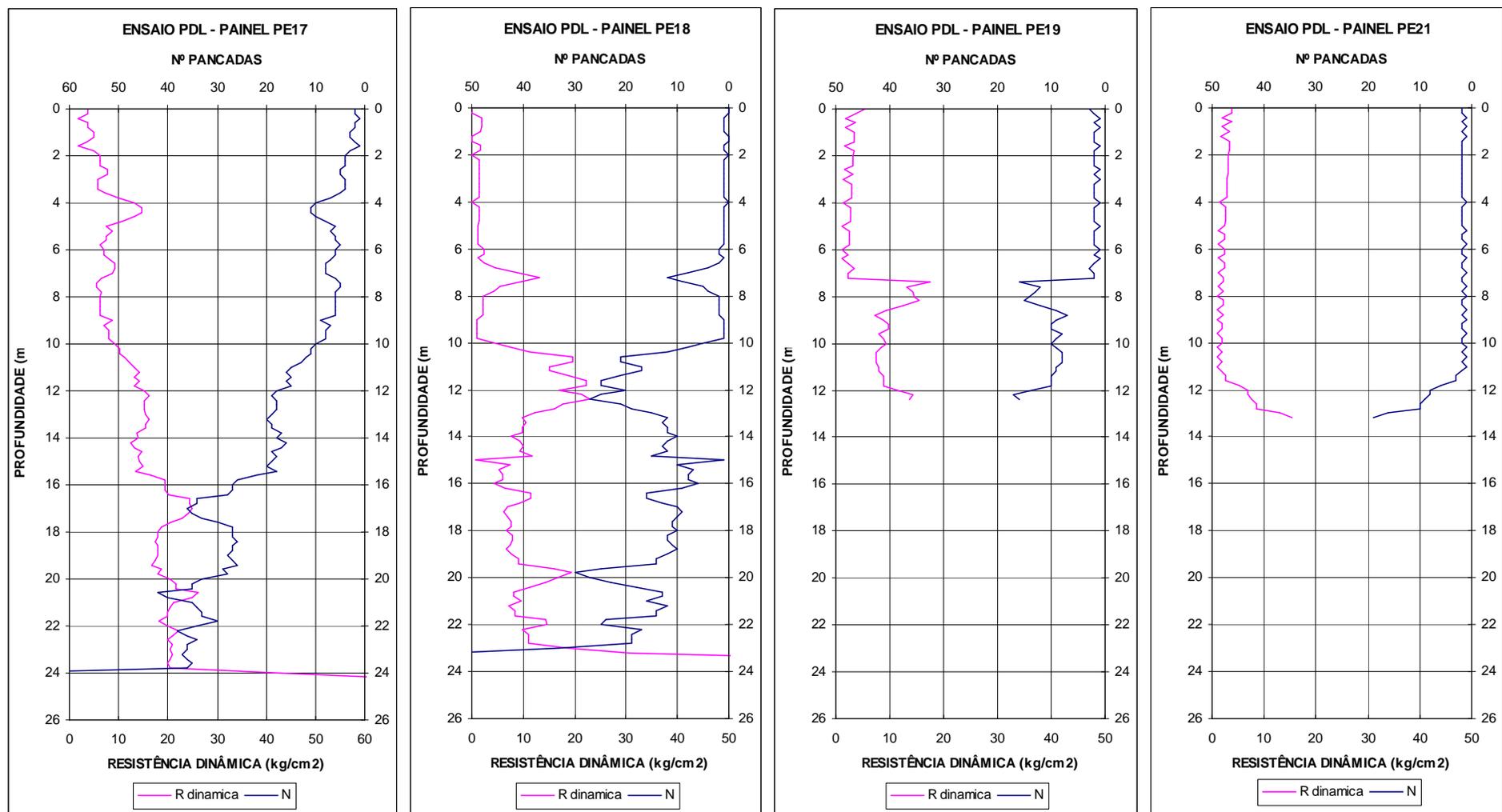
116 dias

134 dias

135 dias

157 dias

Fig. A3 – Resultados dos ensaios PDL efectuados nos painéis PE11, PE13, PE15 e PE16.



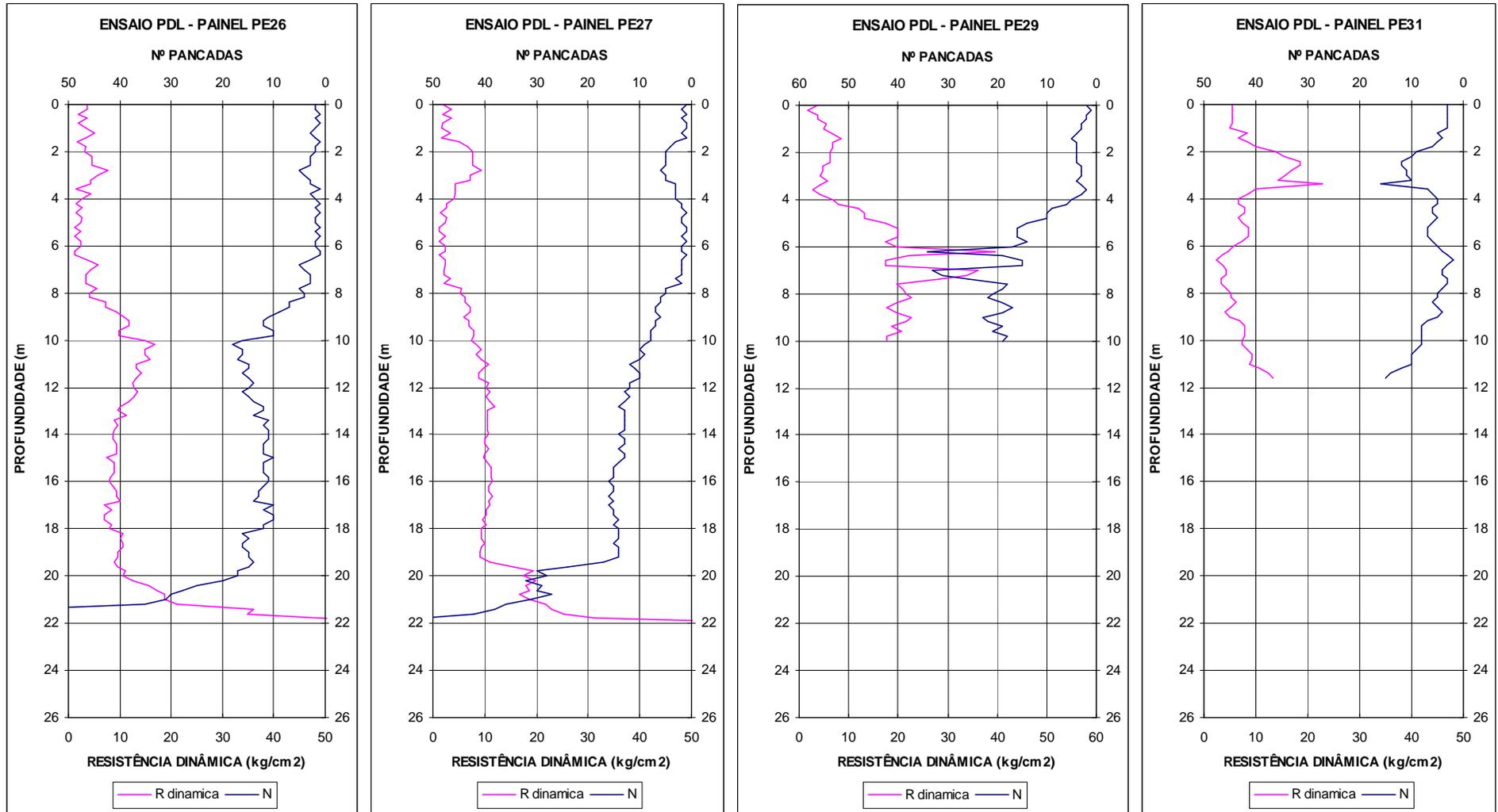
103 dias

74 dias

140 dias

139 dias

Fig. A4 – Resultados dos ensaios PDL efectuados nos painéis PE17, PE18, PE19 e PE21.



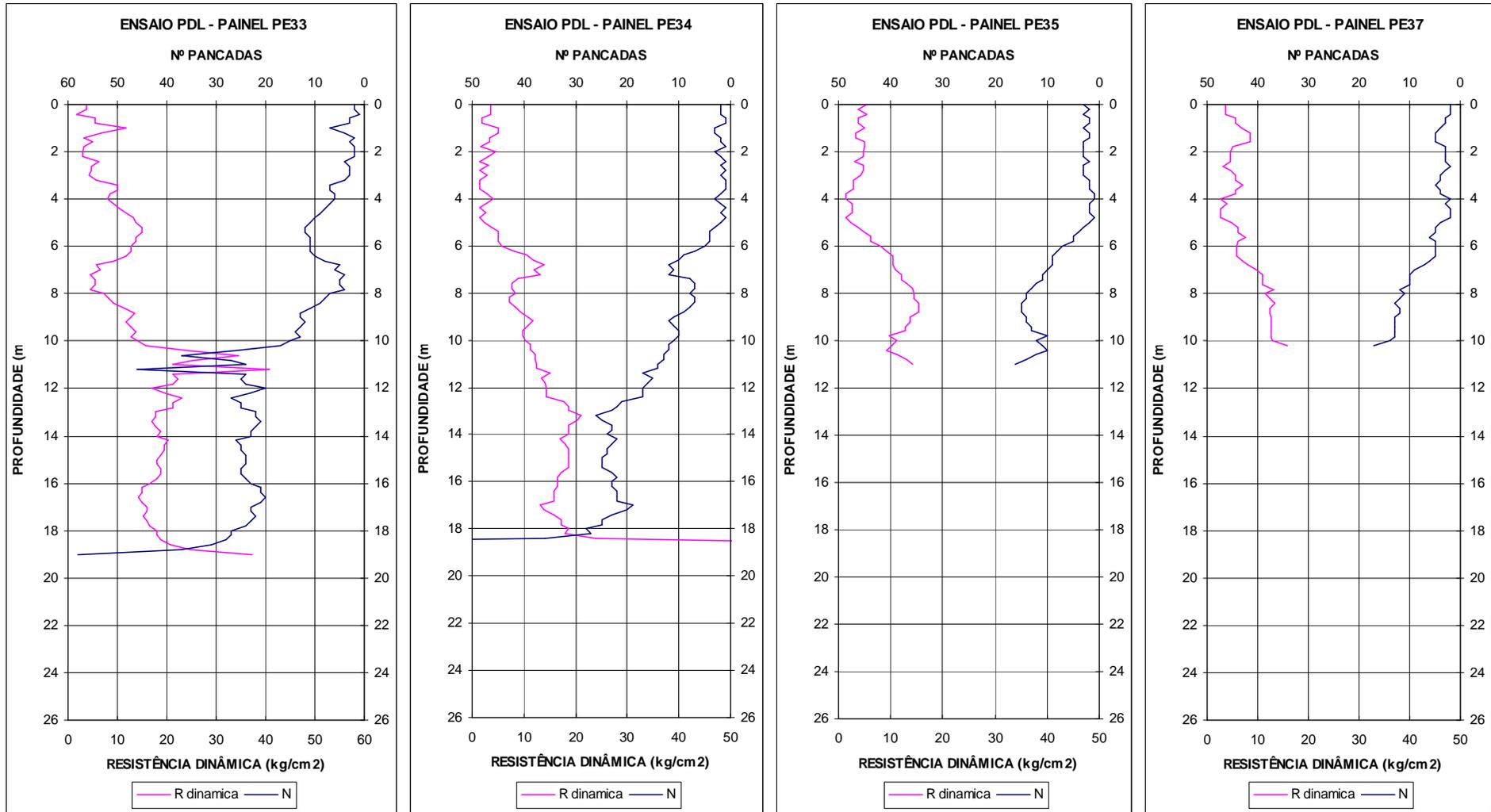
152 dias

100 dias

119 dias

121 dias

Fig. A6 – Resultados dos ensaios *PDL* efectuados nos painéis PE26, PE27, PE29 e PE31.



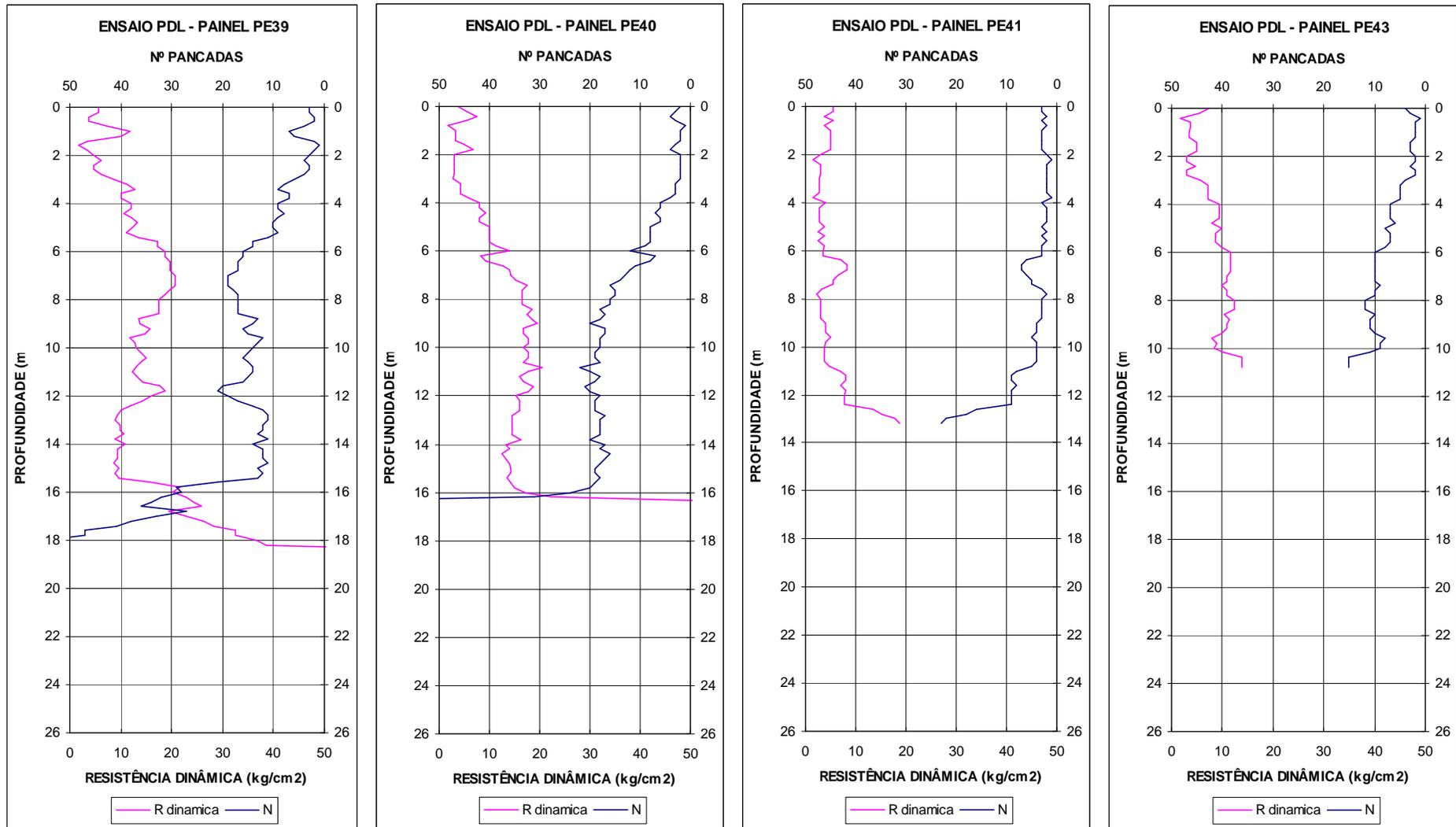
106 dias

153 dias

121 dias

122 dias

Fig. A7 – Resultados dos ensaios *PDL* efectuados nos painéis PE33, PE34, PE35 e PE37.



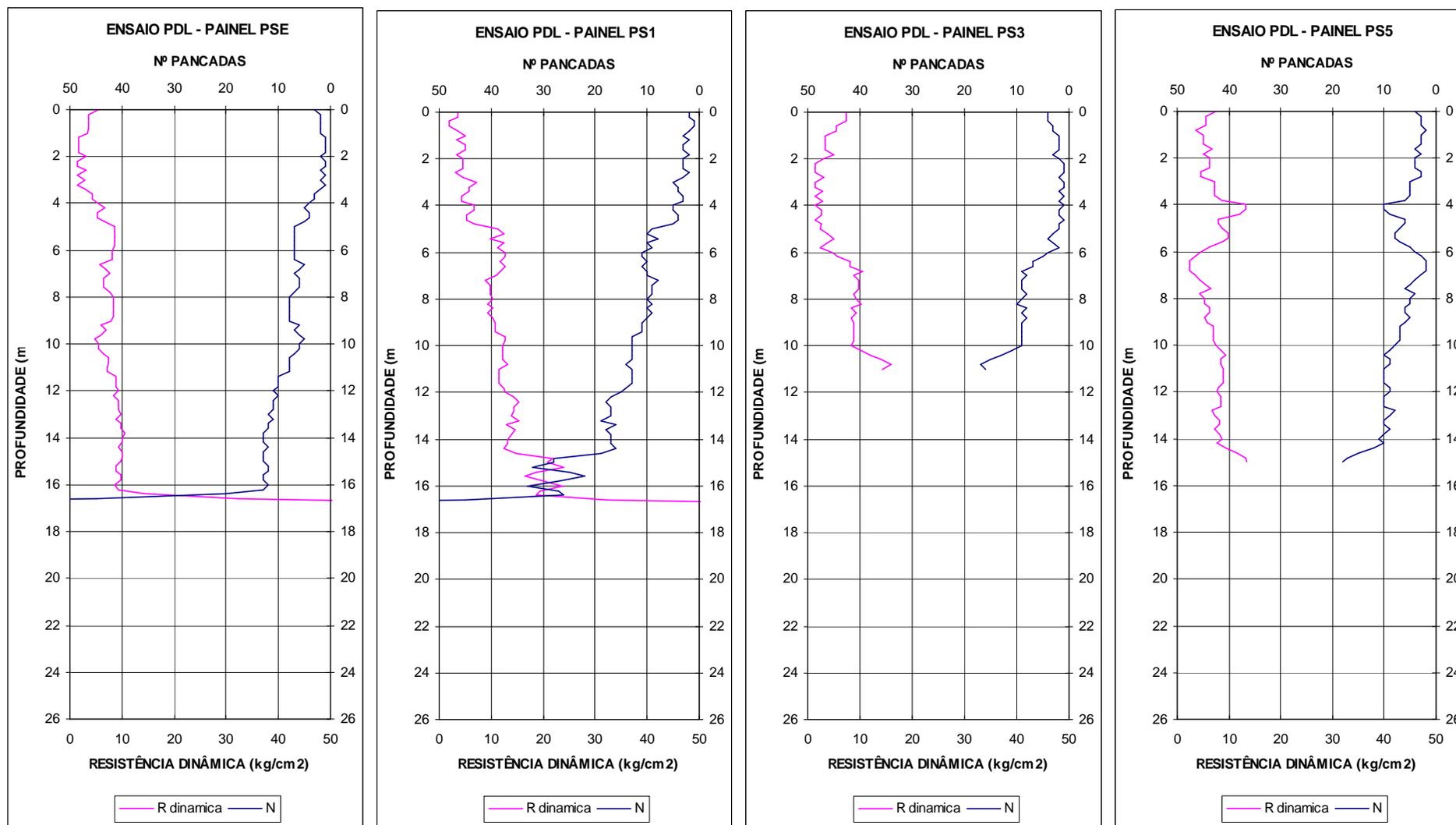
107 dias

147 dias

123 dias

129 dias

Fig. A8 – Resultados dos ensaios *PDL* efectuados nos painéis PE39, PE40, PE41 e PE43.



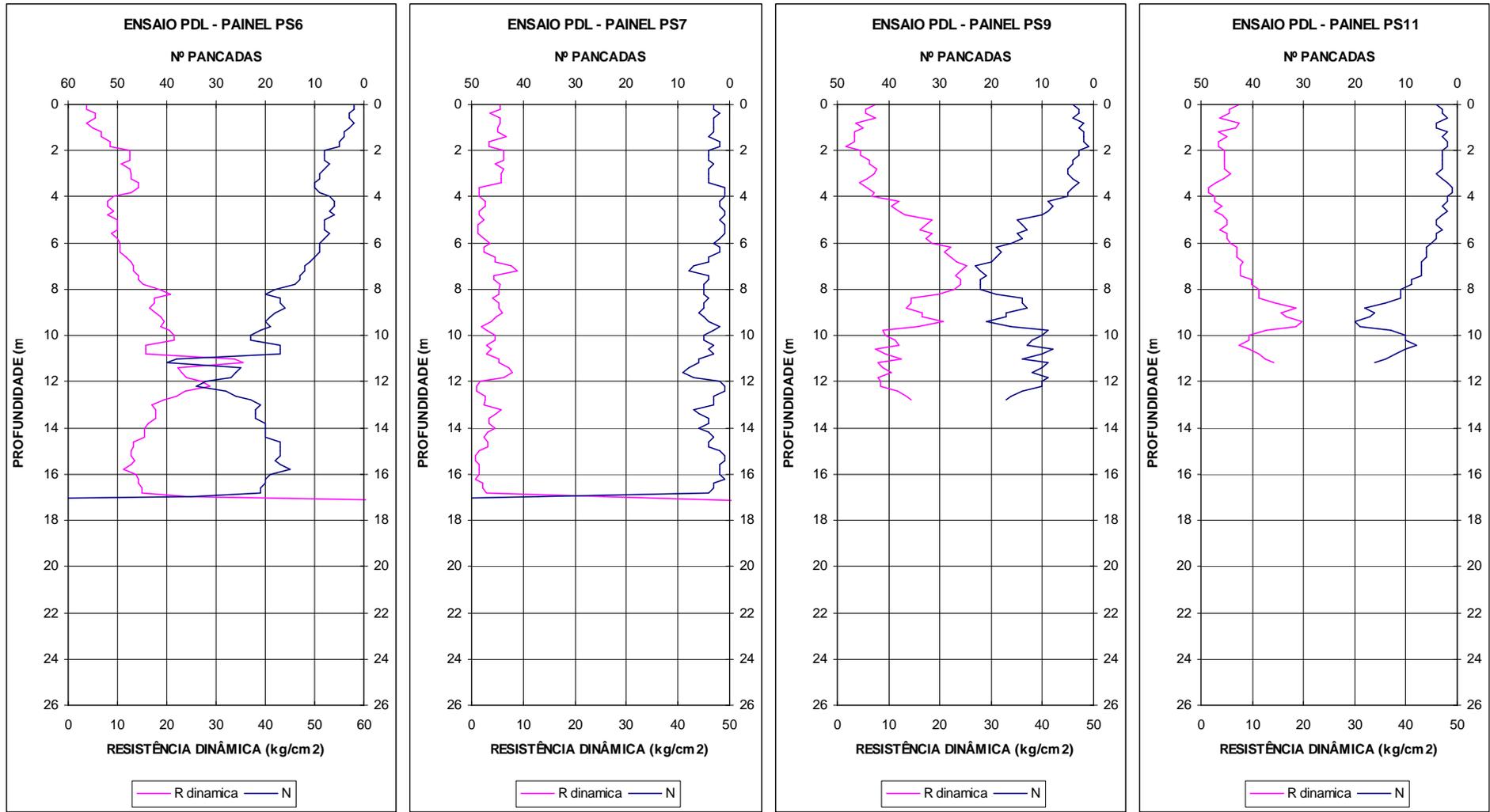
140 dias

119 dias

137 dias

139 dias

Fig. A9 – Resultados dos ensaios PDL efectuados nos painéis PSE, PS1, PS3 e PS5.



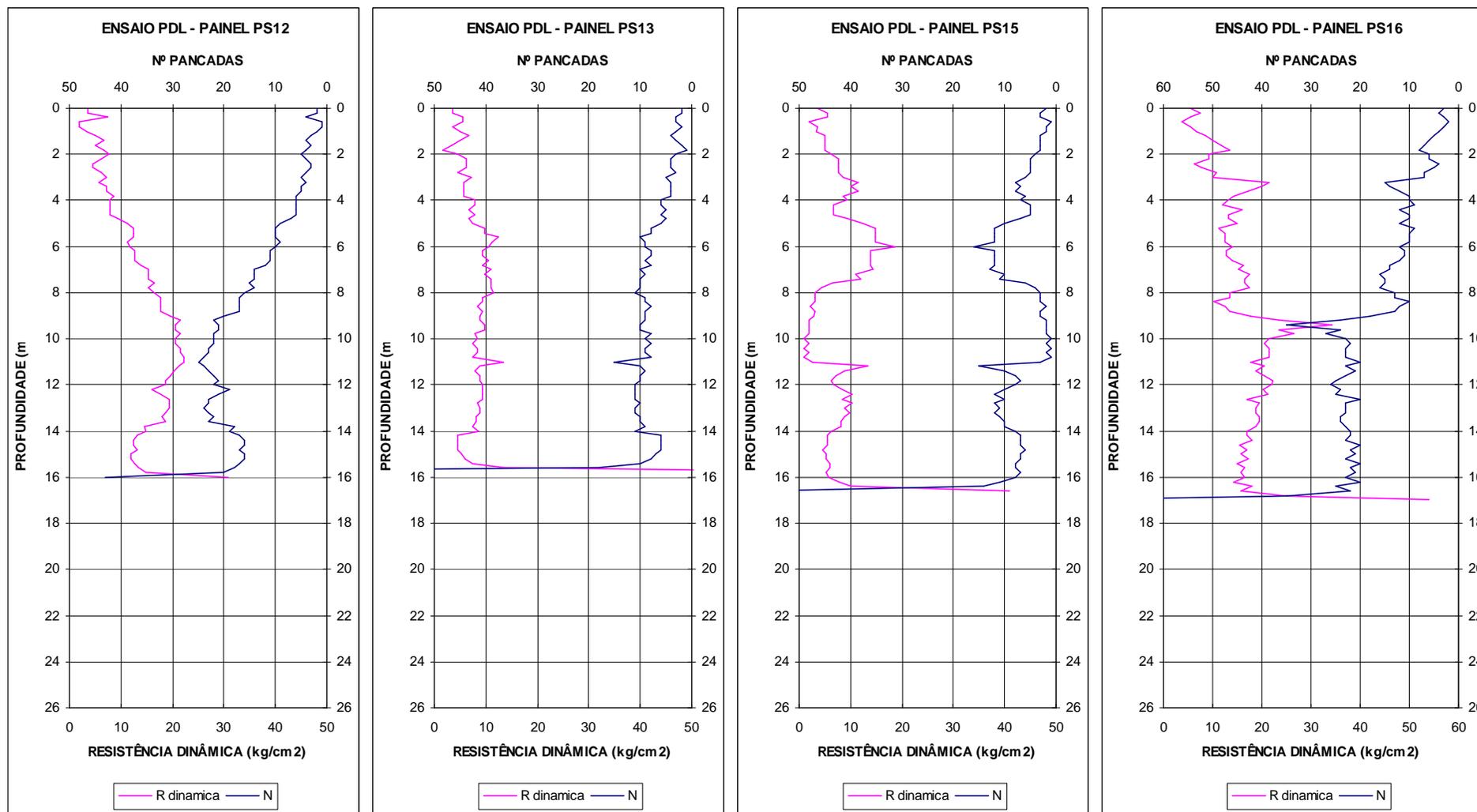
152 dias

122 dias

136 dias

136 dias

Fig. A10 – Resultados dos ensaios *PDL* efectuados nos painéis PS6, PS7, PS9 e PS11.



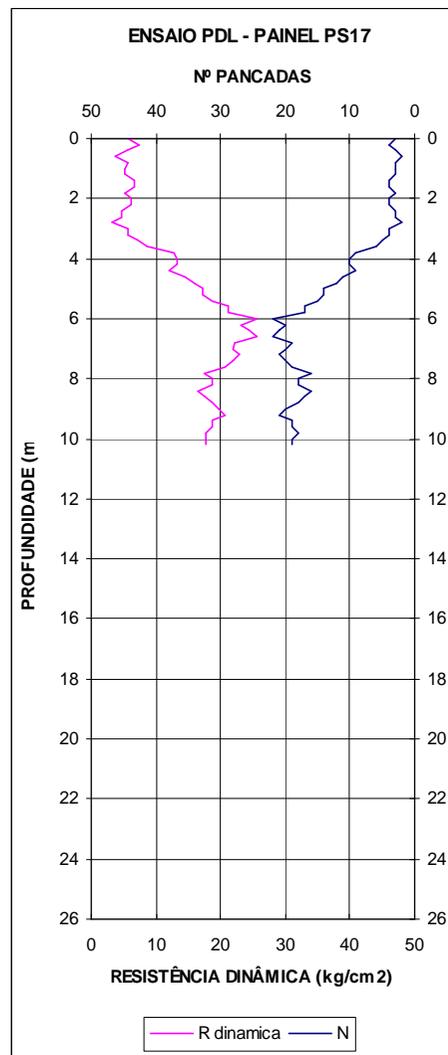
136 dias

118 dias

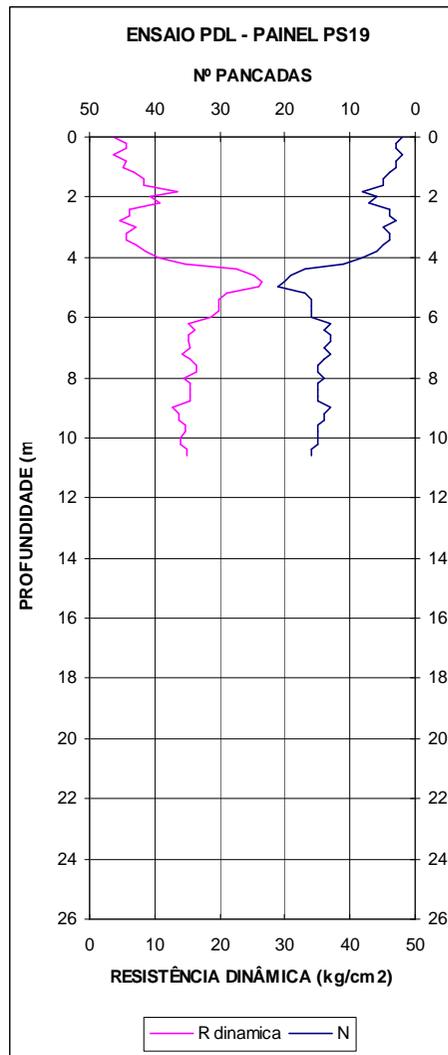
118 dias

138 dias

Fig. A11 – Resultados dos ensaios *PDL* efectuados nos painéis PS12, PS13, PS15 e PS16.

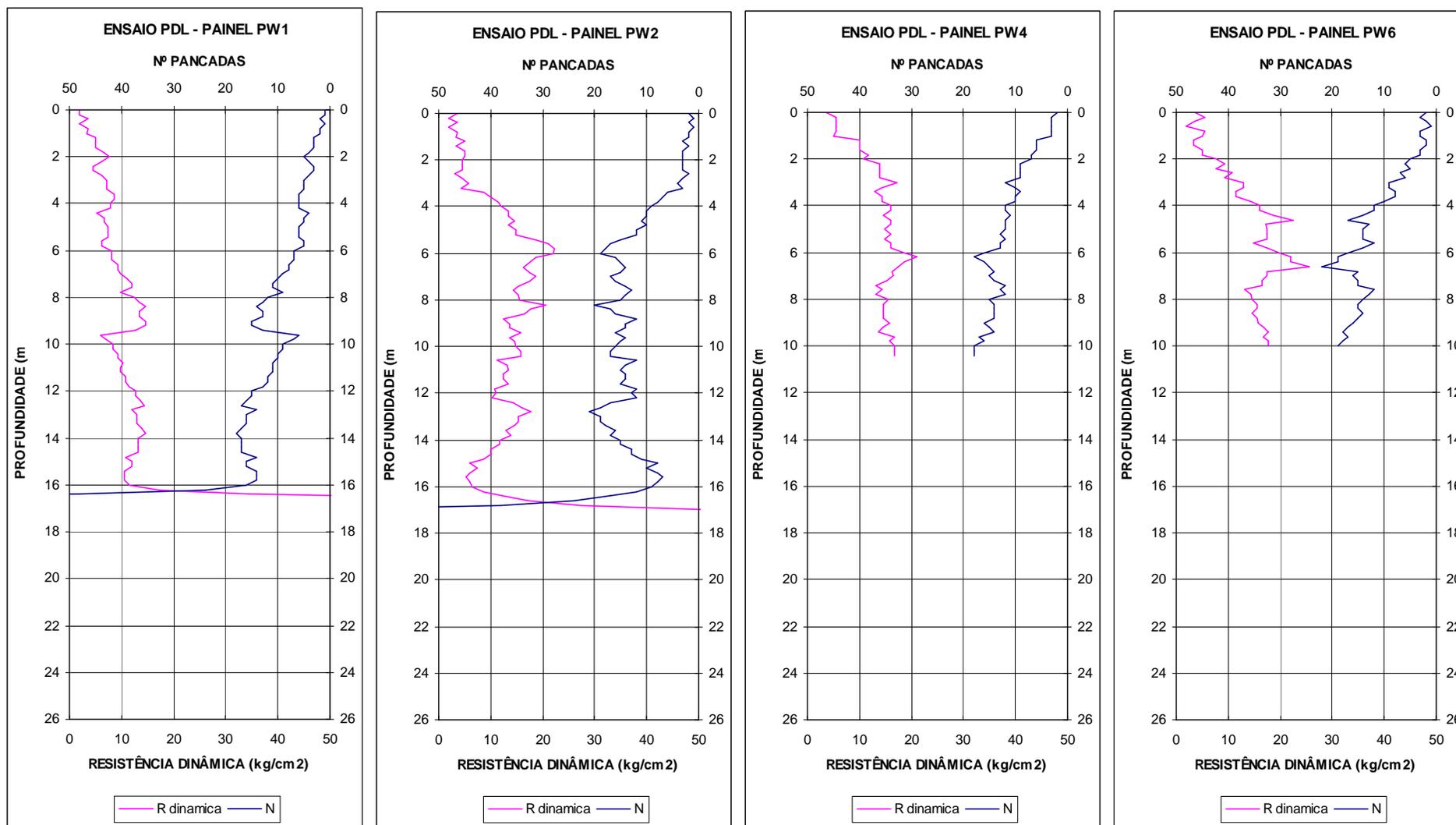


126 dias



124 dias

Fig. A12 – Resultados dos ensaios PDL efectuados nos painéis PS17 e PS19.



128 dias

110 dias

132 dias

131 dias

Fig. A13 – Resultados dos ensaios *PDL* efectuados nos painéis PW1, PW2, PW4 e PW6.

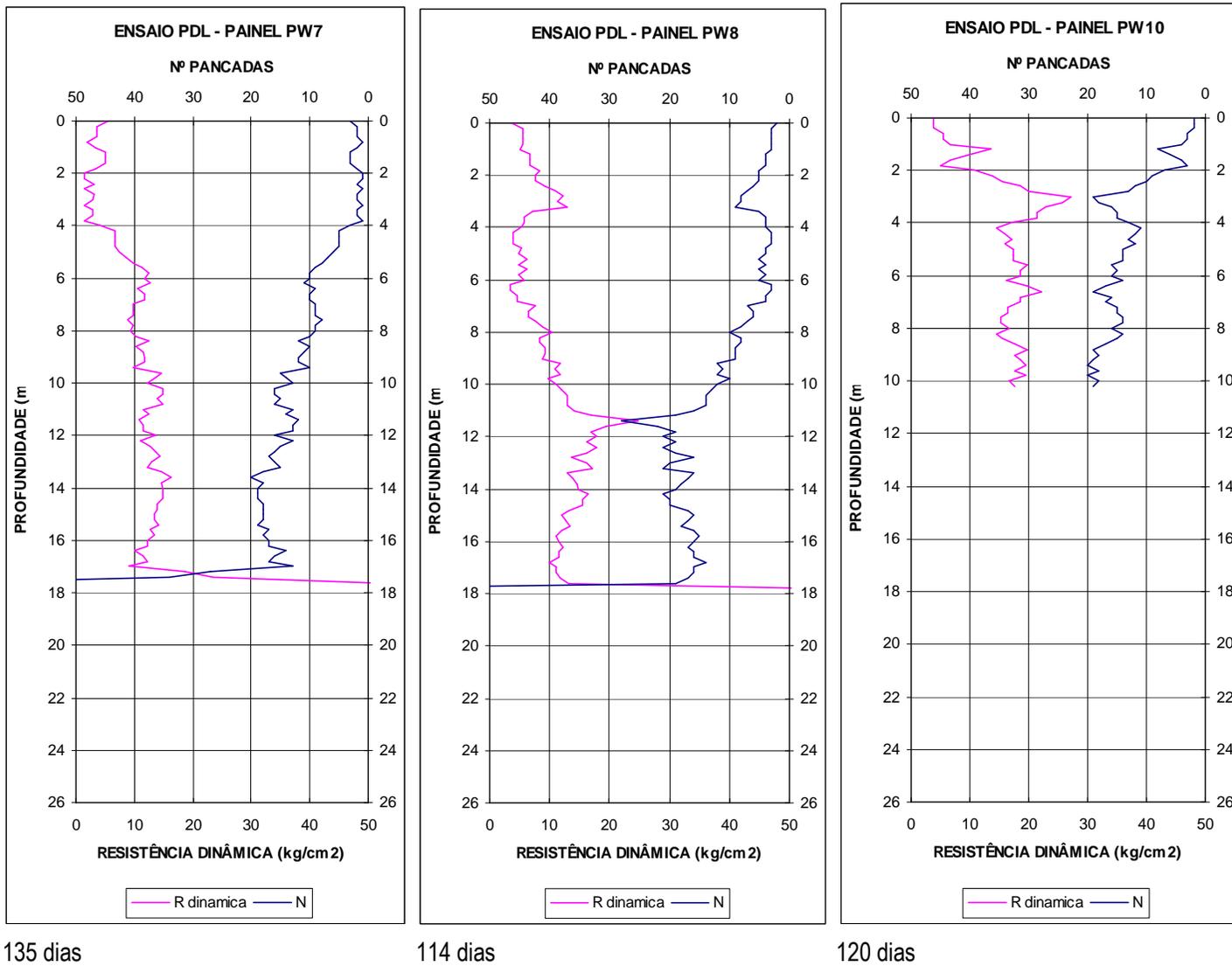
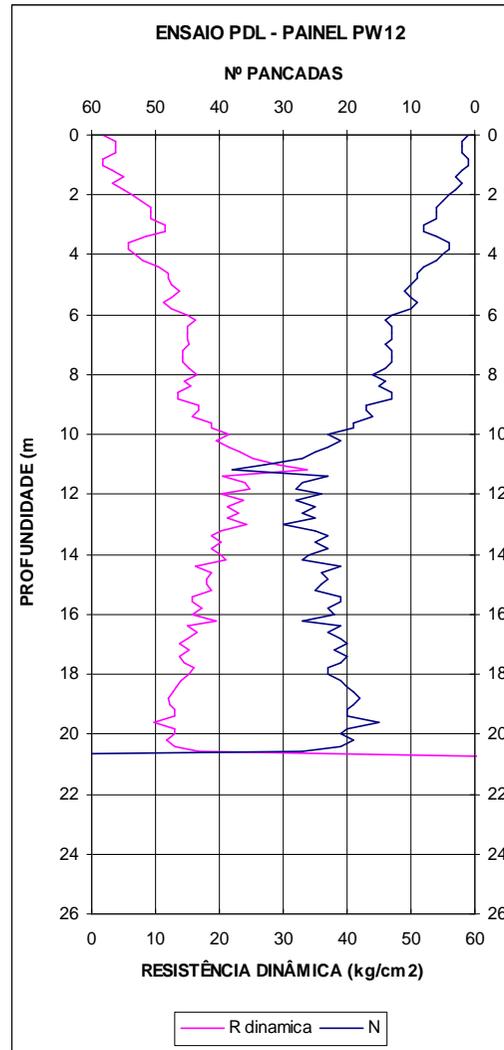
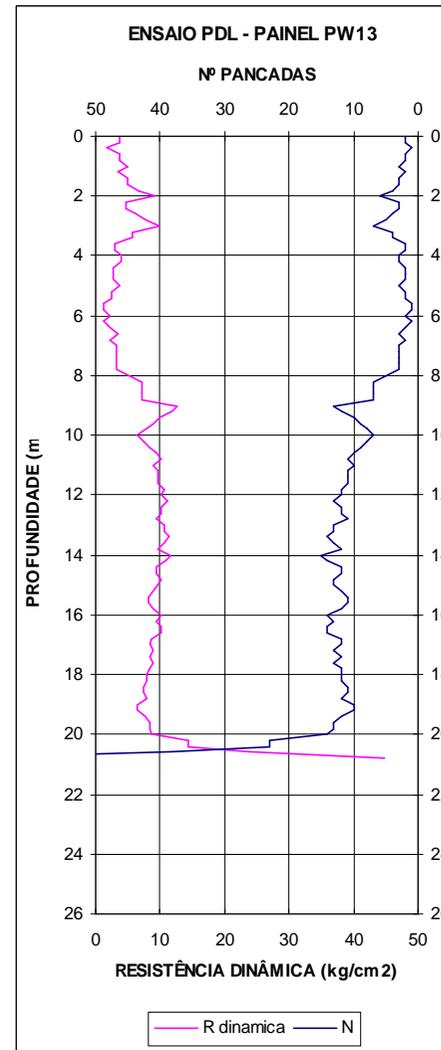


Fig. A14 – Resultados dos ensaios *PDL* efectuados nos painéis PW7, PW8 e PW10.

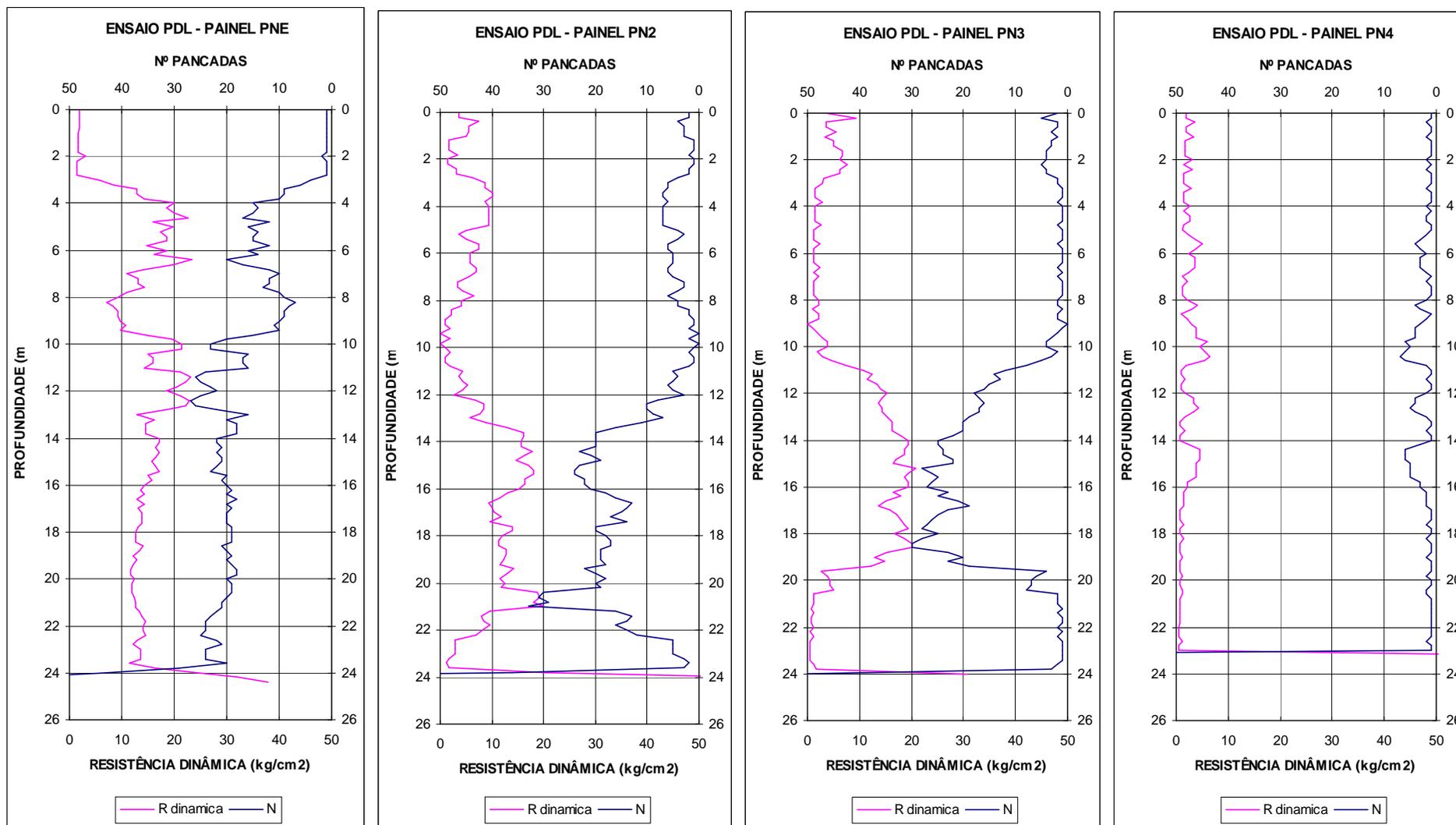


108 dias



127 dias

Fig. A15 – Resultados dos ensaios PDL efectuados nos painéis PW12 e PW13.



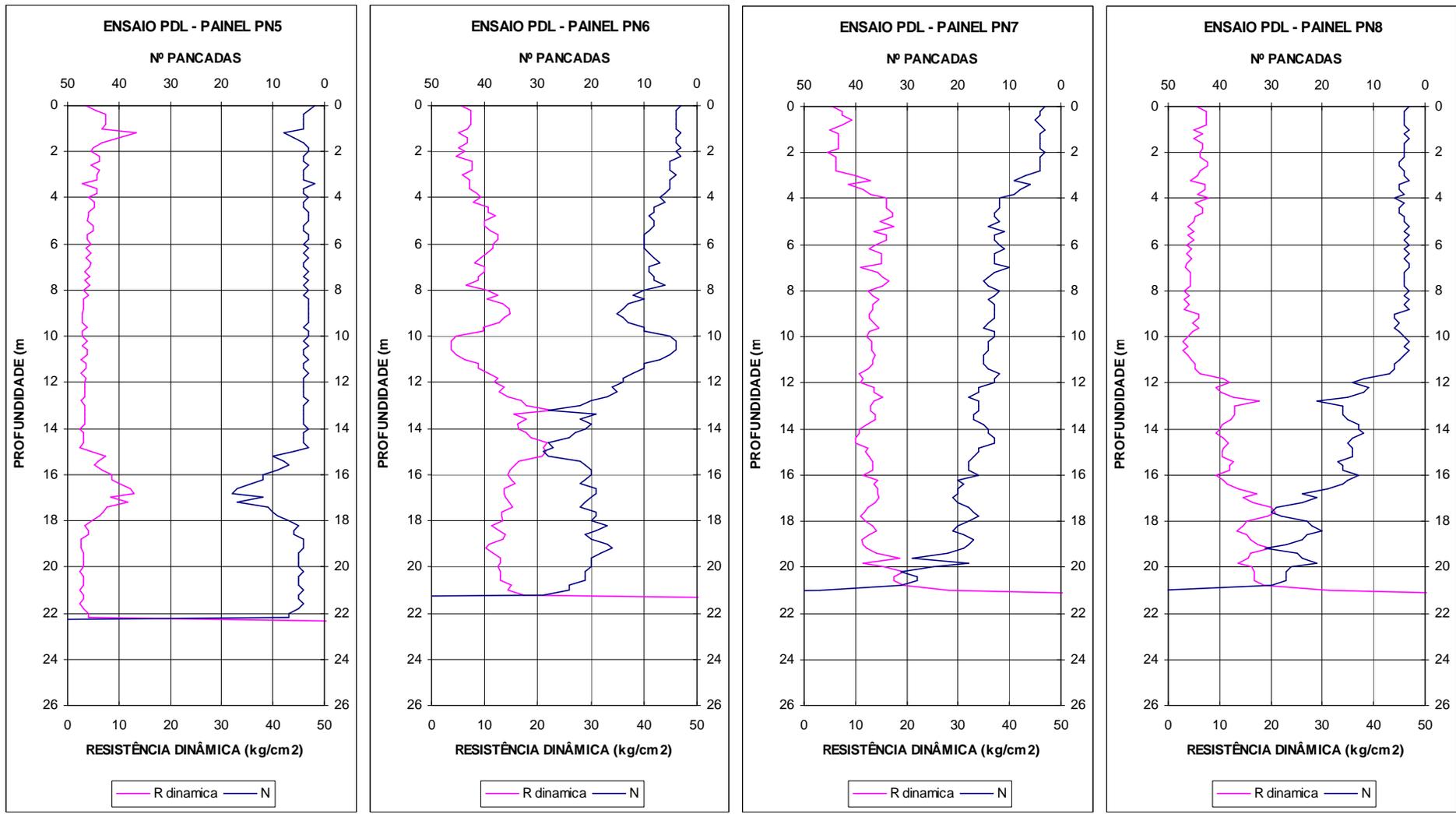
125 dias

92 dias

140 dias

93 dias

Fig. A16 – Resultados dos ensaios PDL efectuados nos painéis PNE, PN2, PN3 e PN4.



?

95 dias

127 dias

88 dias

Fig. A17 – Resultados dos ensaios PDL efectuados nos painéis PN5, PN6, PN7 e PN8.

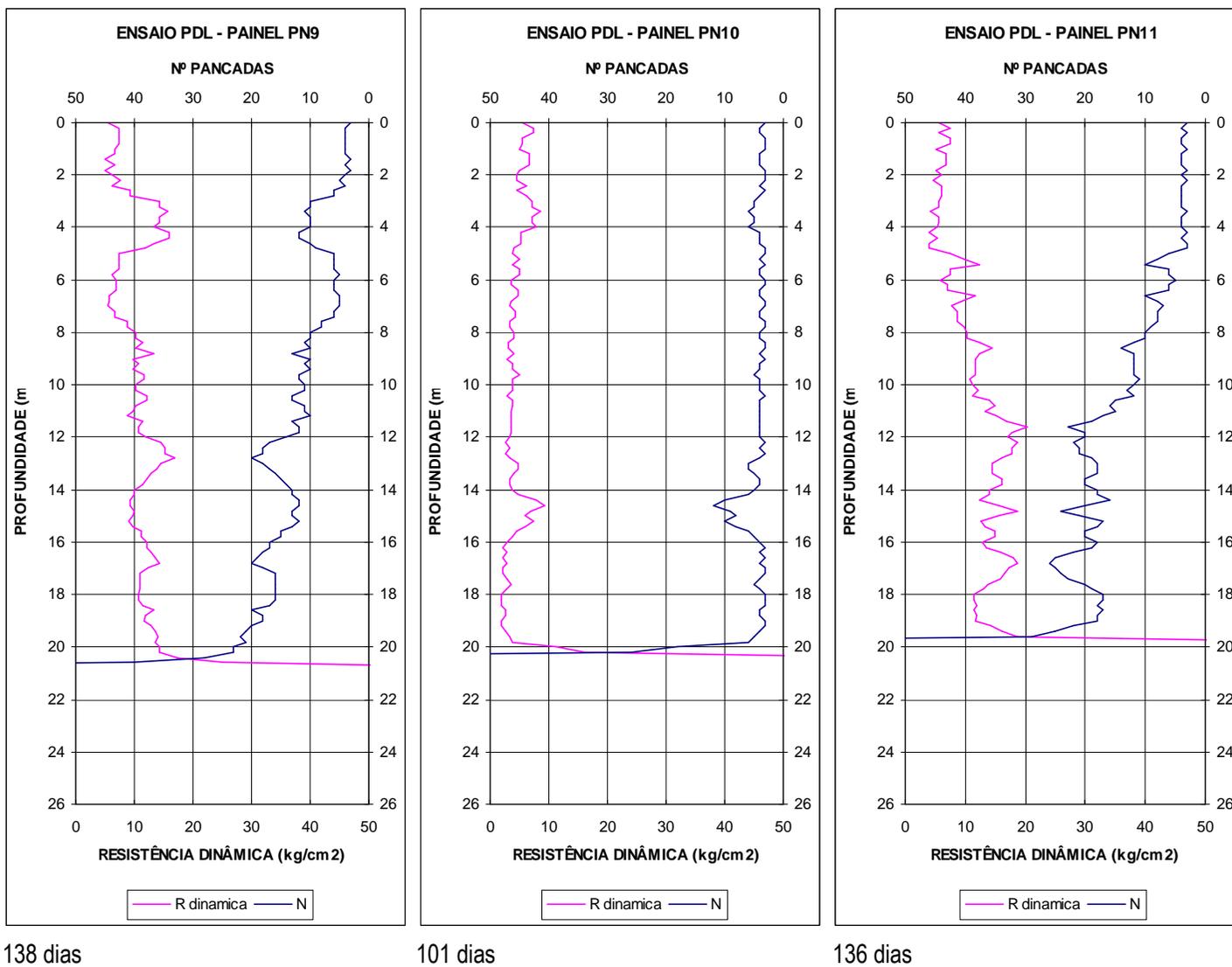
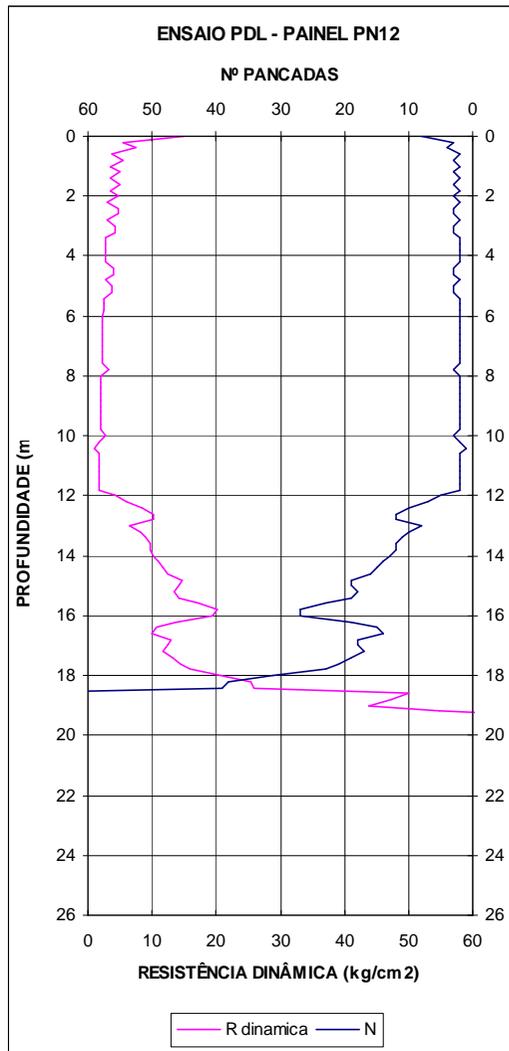
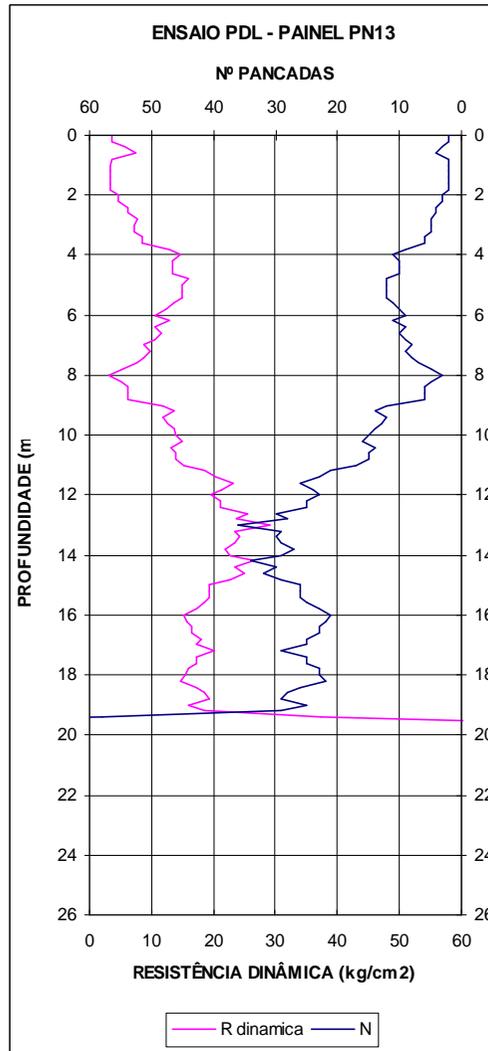


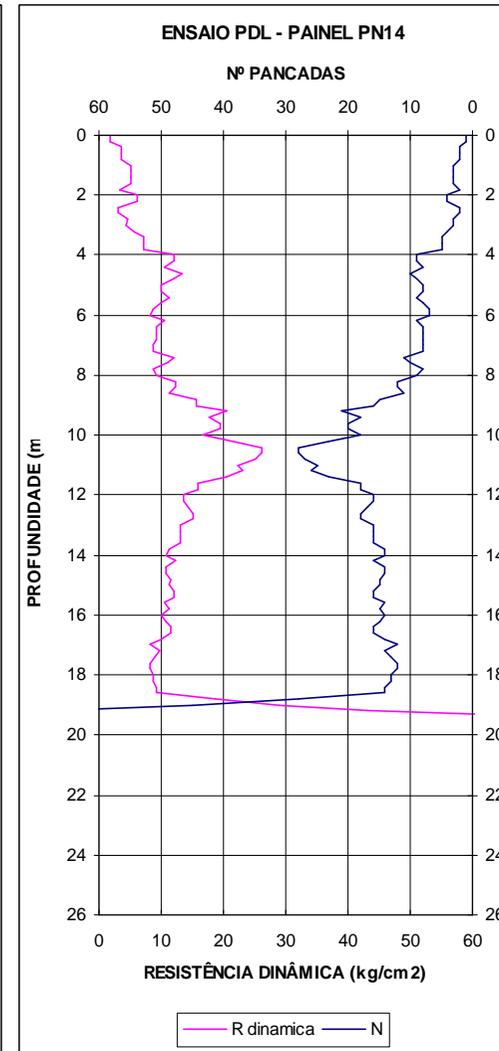
Fig. A18 – Resultados dos ensaios *PDL* efectuados nos painéis PN9, PN10 e PN11.



97 dias



133 dias



104 dias

Fig. A19 – Resultados dos ensaios PDL efectuados nos painéis PN12, PN13 e PN14.

