



Universidade de Évora - Escola de Ciências e Tecnologia

Mestrado em Engenharia Geológica

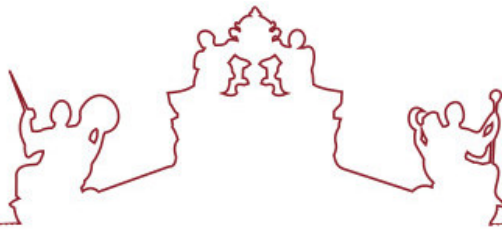
Relatório de Estágio

**Aspectos geotécnicos da obra subterrânea 807 da Linha 15
Sul do metro de Paris.**

Liane Pereira Constantino

Orientador(es) | Isabel Maria Ratola Duarte
Alexandre Guy-Daniel Mopsus

Évora 2021



Universidade de Évora - Escola de Ciências e Tecnologia

Mestrado em Engenharia Geológica

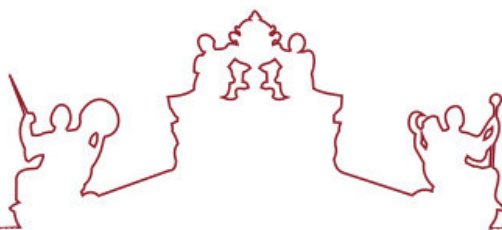
Relatório de Estágio

**Aspectos geotécnicos da obra subterrânea 807 da Linha 15
Sul do metro de Paris.**

Liane Pereira Constantino

Orientador(es) | Isabel Maria Ratola Duarte
Alexandre Guy-Daniel Mopsus

Évora 2021



O relatório de estágio foi objeto de apreciação e discussão pública pelo seguinte júri nomeado pelo Diretor da Escola de Ciências e Tecnologia:

Presidente | Luís Lopes (Universidade de Évora)

Vogais | António Bastos de Pinho (Universidade de Évora) (Arguente)
Isabel Maria Ratola Duarte (Universidade de Évora) (Orientador)

Agradecimentos

A realização deste Relatório de Estágio de Mestrado é o resultado de um longo percurso de formação superior que não teria sido possível sem o apoio de todos aqueles que, tanto dentro, como fora da Universidade de Évora, contribuíram para tal, e a quem deixo aqui os meus mais sinceros agradecimentos:

À professora e orientadora Professora Doutora Isabel Duarte, pelo acompanhamento ao longo de todo o percurso académico, e especialmente pela sua orientação, partilha de conhecimento e disponibilidade na realização deste Relatório de Estágio.

Ao Laboratório HERCULES e ao Departamento de Geociências da Escola de Ciências e Tecnologia da Universidade de Évora, em especial à Sandra Velez, Ana Tsoupra e ao Professor Dr. José Mirão, pelo apoio na realização dos ensaios laboratoriais.

À empresa Atlas Fondations que me cedeu a oportunidade de realização deste estágio e todos os dados necessários à realização desta investigação.

Aos meus pais, pelo incentivo e apoio incondicional em todos os momentos.

E finalmente, um sincero obrigado, a todos aqueles que aqui não foram mencionados, mas que de alguma forma contribuíram para a realização deste Relatório de Estágio.

Resumo

A obra abordada neste trabalho, surge da necessidade de melhorar as ligações entre os subúrbios e o centro parisiense. Nesse sentido, faz-se uma contextualização sumária deste projeto, que é atualmente o maior projeto de infraestruturas da Europa.

A empresa Atlas Fondations teve como missão a realização de 42 paredes moldadas, sendo a metodologia empregue na realização das mesmas amplamente abordada neste relatório, assim como os meios humanos e técnicos envolvidos e os problemas encontrados durante e após empreitada.

Para enquadrar geotecnicamente o local da obra, foram recolhidos quatro testemunhos de sondagens a diferentes profundidades, a partir de diferentes estratos geológicos, para estudar as características geológicas e geotécnicas.

Finalmente, discute-se os resultados obtidos e a forma como as características químicas e mineralógicas dos solos amostrados podem influenciar as características físicas e geotécnicas, assim como, em que medida as características geotécnicas do solo condicionam a tipologia e dimensão das fundações da obra.

Palavras-chave: Geotecnia; paredes moldadas; obras subterrâneas; geologia; Paris

Abstract

Geotechnical aspects of underground work 807 of Line 15 South of the Paris subway

The construction covered in this work, arise from the need to improve the links between the Paris center and the suburbs. In the first step we will summarise the context of the metro's Paris, which is currently the largest infrastructure project in Europe.

The company Atlas Fondations, had the mission of making 42 pillar's foundation and the methodology employed in making them will be widely discussed in this thesis as well as, human and technical resources involved and the problems meted during the contract.

To define the geotechnical parameters of this job site, we collect samples at different depths (and in different geological lithology), to study the geotechnical characteristics.

Finally, we discussed the results obtained in the laboratory tests and how the physical and chemical characteristics of the samples can affect each other, and the typology and dimension of the foundations of a construction.

Keywords: Paris metro, underground work, foundations, geotechnical constructions, geology

Índice

| | |
|---|----|
| Agradecimentos | 1 |
| Resumo | 2 |
| Abstract | 3 |
| Índice de figuras | 6 |
| Índice de Tabelas | 9 |
| Índice de Anexos | 9 |
| Acrónimos, abreviaturas e simbologia | 10 |
| Capítulo I – Introdução | 1 |
| 1.1. Enquadramento da Obra – <i>Grand Paris Express</i> | 1 |
| 1.2. Objetivos | 4 |
| 1.3. Estrutura do Relatório de Estágio | 5 |
| Capítulo II - Enquadramento do projeto | 6 |
| 2.1. Linha 15 Sul | 6 |
| 2.2. Obra Sentier des Marins (Obra 807) | 8 |
| Capítulo III – Enquadramento Regional | 9 |
| 3.1. Localização Geográfica | 9 |
| 3.2. Geologia Regional | 10 |
| 3.3. Caracterização Geotécnica | 13 |
| Capítulo IV - Paredes Moldadas com fluído estabilizador | 16 |
| 4.1. Recursos | 17 |
| 4.1.1. Equipamentos e ferramentas | 17 |
| 4.1.2. Materiais | 18 |
| 4.1.3. Mão de obra | 19 |
| 4.2. Processo de execução | 20 |
| 4.2.1. Implantação dos painéis | 20 |

| | |
|---|----|
| _____ | 23 |
| 4.2.2. Lamas bentoníticas _____ | 23 |
| 4.2.3. Furação dos painéis _____ | 29 |
| Capítulo V – Metodologia _____ | 42 |
| 5.1. Trabalhos de campo e amostragem _____ | 42 |
| 5.2. Ensaio expeditos _____ | 43 |
| 5.2.1. Testes táctil e visual _____ | 43 |
| 5.3 Ensaio de laboratório _____ | 43 |
| 5.3.1. Granulometria por peneiração húmida _____ | 44 |
| 5.3.2. Limites de consistência (ou de Atterberg) _____ | 46 |
| 5.3.3. Ensaio de expansibilidade _____ | 50 |
| 5.3.4. Ensaio de densidade das partículas _____ | 52 |
| 5.3.5. Propriedades químicas e mineralógicas _____ | 53 |
| Capítulo VI – Apresentação e discussão dos resultados _____ | 56 |
| 6.1 Ensaio expeditos _____ | 56 |
| 6.2 Propriedades físicas _____ | 58 |
| 6.2.1. Granulometrias _____ | 58 |
| 6.2.2 Limites de consistência _____ | 61 |
| 6.2.3 Expansibilidade e expansão das amostras _____ | 61 |
| 6.2.4 Determinação da densidade de partículas _____ | 64 |
| 6.2.5 Síntese dos resultados obtidos das propriedades físicas _____ | 65 |
| 6.3. Composição química e mineralógica _____ | 67 |
| Capítulo VII – Considerações finais _____ | 74 |
| Referências bibliográficas _____ | 77 |
| Anexos _____ | 80 |

Índice de figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1 Traçado da primeira fase (2020/2021) do metro de Paris, que corresponde ao prolongamento da linha 14 Norte. Fonte: SGP _____ | 1 |
| Figura 2 Traçado da segunda fase (2024/2025) do projecto, com prolongamento das linhas: 14 Sul, 15, 16 e 17. Fonte: SGP _____ | 2 |
| Figura 3 Traçado da terceira fase (2027) do projecto, com prolongamento das linhas 17 e 18. Fonte: SGP _____ | 3 |
| Figura 4 Traçado da quarta fase (2030) do projecto com os prolongamentos das linhas 15, 16, 17 e 18. Fonte: SGP _____ | 4 |
| Figura 5 Traçado da Linha 15 Sul do metro de Paris. Fonte: Atlas Fondations _____ | 6 |
| Figura 6 Vista aérea da geometria da obra em estudo. Fonte: Atlas Fondations _____ | 7 |
| Figura 7 Vista aérea da obra. 1 - zona de escavação e construção das paredes moldadas; 2 - via de circulação pedonal no interior da obra; 3 – Entrada com rampa de acesso à obra; 4 - área de produção e stock das lamas bentoníticas. Fonte: SGP _____ | 8 |
| Figura 8 Localização geográfica da obra em estudo: a) França, b) cidade de Paris, c) localização da obra destacada a azul. Fonte: Google Earth _____ | 9 |
| Figura 9 Enquadramento Geográfico da área de estudo: imagem do topo - França; imagem do centro - cidade de Paris; imagem de baixo - localização da obra destacada a azul. Fonte: Google Earth. _____ | 10 |
| Figura 10 a) Corte geológico expedito com as formações geológicas intersectadas pela sondagem efectuada no interior da obra, b) Plano da obra com a localização da sondagem efectuada. Fonte: Atlas Fondations _____ | 16 |
| Figura 11 Zona de armazenamento e fabrico de lamas bentoníticas: 2 reservatórios a cinzento que armazenam a bentonite para escavação, 2 silos brancos que armazenam a argila para a produção de bentonite. _____ | 18 |
| Figura 12 Organigrama do pessoal na obra 807. Fonte Atlas Fondations _____ | 19 |
| Figura 13 Execução de muros guia com parte da armadura visível e outra parte já betonada e preenchida de terra. Fonte: Atlas Fondations. _____ | 22 |
| Figura 14 Esquema do muro guia tipo na obra 807: têm uma altura de 1,2 metros e uma espessura de 0,4 metros, terminando a 1,2 metros de profundidade com espessura de 0,3 metros. A plataforma de trabalho tem uma espessura de 20 cm. Fonte: Atlas Fondations_ | 23 |
| Figura 15 Central de tratamento de lamas: a) Central de desareamento e reciclagem; b) Fossa de material proveniente do desareamento _____ | 25 |
| Figura 16 a) laboratório portátil para ensaios de teste de bentonite; b) Balança de lamas. _____ | 27 |

| | |
|--|----|
| Figura 17 a) Funil de Marsh (a vermelho) para determinação da viscosidade; b) Colocação de água na proveta até ao ponto "water here" para realização do teste para determinação do teor de areia; c) Decantação da areia para determinação do teor em areia presente na bentonite ensaiada _____ | 28 |
| Figura 18 a) Teste de pH; b) Equipamento para efectuar a compactação; c) Espessura do "cake". _____ | 29 |
| Figura 19 Processo de escavação por 3 troços a), b) e c). Fonte: SGP _____ | 30 |
| Figura 20 Sistema de escavação por baldes de maxilas "Benne" _____ | 31 |
| Figura 21 Sistema de escavação por fresa – MC96 da Bauer _____ | 32 |
| Figura 22 Problemas devido a falta de verticalidade no painel, em relação a direcção em Y: a) Painéis com as armaduras expostas (indicado com os quadrados vermelhos); b) "boça" de betão (consumo excessivo de betão, indicado pelo círculo verde). _____ | 34 |
| Figura 23 Junta colocada na vala com ligeira inclinação como se pode ver pela bolha do inclinómetro. _____ | 35 |
| Figura 24 Lacuna no betão devido à falta de adesão do betão às armaduras, armadura aparente com vazio na parede moldada _____ | 36 |
| Figura 25 Junta CWS: Círculo a vermelho corresponde ao <i>waterstop</i> (filamento a preto em borracha). _____ | 38 |
| Figura 26 Elevação da armadura pelas alças de suspensão (indicado a verde). _____ | 38 |
| Figura 27 Círculo a amarelo corresponde ao encaixe entre o 1º módulo de armadura e o 2º módulo, através do fishplate. Círculo a azul que corresponde às alças de posicionamento que mantêm o 1º módulo de armadura suspenso para o encaixe do 2º módulo de armadura _ | 38 |
| Figura 28 Círculos a laranja representam os espaçadores colocados na armadura _____ | 38 |
| Figura 29 Suporte em ferro para arrumo dos tubos que constituem a coluna de betão ____ | 39 |
| Figura 30 Posicionamento das duas colunas de betonagem, nas extremidades do painel, com o funil no topo seguro pelo suporte (círculo a vermelho) _____ | 39 |
| Figura 31 Processo de betonagem do painel que ocorre da base até ao topo como ilustrado no esquema (adaptado de Azzi, 2015) _____ | 40 |
| Figura 32 Ensaio do Slump: a) Realização do ensaio colocando o 5 pás de betão no cone; b) 9 provetes para testes de qualidade do betão a enviar ao laboratório; c) Medição do resultado do ensaio=21cm _____ | 41 |
| Figura 33 Descofragem: a) Primeira etapa – escavação do troço ao longo da junta; b) benne com as "mãos" de descofragem colocadas para descofrar; c) Remoção da junta através da grua. Fonte: Atlas Fondations _____ | 42 |

| | |
|---|----|
| Figura 34 a) Perfuradora que efectuou a carotagem; b) caixa com os testemunhos da sondagem realizada. _____ | 43 |
| Figura 35 Realização do ensaio de granulometria por via húmida: a) Empilhamento dos crivos da maior malha (crivo 7) até ao crivo de menor malha (crivo 1) com o fundo e o escoador de sedimento; b) amostras depois de secas obtidas do ensaio. _____ | 45 |
| Figura 36 a) amostra com o teor de água ideal para realizar o ensaio; b) colocação da amostra na concha de Casagrande; c) amostra com o sulco e pronta a ser ensaiada; d) amostras depois de secas na estufa. _____ | 47 |
| Figura 37 a) amostra pronta a ser ensaiada; b) amostra em forma de esfera; c) filamento depois da rotura. _____ | 49 |
| Figura 38 Ensaio de expansibilidade: a) Amostra colocada no expansímetro para ; b) Execução do ensaio; c) Amostras depois de ensaiadas. _____ | 51 |
| Figura 39 Ensaio de densidade de partículas: a) Amostras preparadas a repousar; b) Picnómetros em ebulição; c) Medição da temperatura da amostra. _____ | 53 |
| Figura 40 a) preparação das amostras para DRX; b) lâminas depois de secas. _____ | 55 |
| Figura 41 Esquema de um difractor de fonte linear. Fonte: Carvalho (2008). _____ | 55 |
| Figura 42 Amostra A1: a) amostra no saco; b) amostra desagregada _____ | 56 |
| Figura 43 Amostra A2: a) amostra intacta no saco; b) amostra desagregada _____ | 57 |
| Figura 44 Amostras A3 e A4: a) Amostras A3 e A4 intactas dentro do saco; b) Amostra A3 _____ | 57 |
| Figura 45 Amostra A4 desagregada _____ | 58 |
| Figura 46 Curva granulométrica da amostra A1 _____ | 58 |
| Figura 47 Curva granulométrica da amostra A2 _____ | 59 |
| Figura 48 Curva granulométrica da amostra A3 _____ | 60 |
| Figura 49 Curva granulométrica da amostra A4 _____ | 60 |
| Figura 50 Gráfico com os resultados da expansibilidade das amostras A1, A2, A3 e A4 durante o período do ensaio _____ | 62 |
| Figura 51 Gráfico com os resultados da expansão das amostras A1, A2, A3 e A4 ao longo do tempo _____ | 62 |
| Figura 52 Gráfico da DRX da amostra A1 _____ | 70 |
| Figura 53 Gráfico da DRX da amostra A2. _____ | 70 |
| Figura 54 Gráfico da DRX da amostra A3. _____ | 71 |
| Figura 55 Gráfico da DRX da amostra A4. _____ | 72 |

Índice de Tabelas

| | |
|--|----|
| Tabela 1 Propriedades das lamas bentoníticas. Norma EN 1538-2000 | 25 |
| Tabela 2 Resultados dos ensaios de limites de consistência das quatro amostras..... | 61 |
| Tabela 3 Resultados obtidos no ensaio para determinação da densidade de partículas da amostra A1..... | 64 |
| Tabela 4 Resultados obtidos no ensaio para determinação da densidade de partículas da amostra A2..... | 64 |
| Tabela 5 Resultados obtidos no ensaio para determinação da densidade de partículas da amostra A3..... | 64 |
| Tabela 6 Resultados obtidos no ensaio para determinação da densidade das partículas da amostra A4..... | 65 |
| Tabela 7 Síntese dos resultados obtidos nos ensaios laboratoriais. | 65 |
| Tabela 8 Resultados obtidos da espectrometria de fluorescência de raios-X..... | 67 |
| Tabela 9 Minerais presentes nas amostras..... | 72 |

Índice de Anexos

| | |
|---|----|
| Anexo 1 Plano das paredes moldadas da obra 807. Fonte: Atlas Fondations, SGP. | 80 |
| Anexo 2 Relatório a preencher pelo centralista com os resultados dos testes sobre a qualidade de bentonite..... | 81 |
| Anexo 3 Gráfico com os parâmetros de verticalidade (em X e Y) de um painel. | 82 |
| Anexo 4 Exemplo de curva de betonagem. | 83 |
| Anexo 5 Análises granulométricas das amostras A1, A2, A3 e A4..... | 84 |
| Anexo 6 Determinação dos limites de liquidez, de plasticidade e índice de plasticidade das amostras A1, A2, A3 e A4. | 86 |
| Anexo 7 Tabelas com o registo da expansibilidade obtida para as amostras A1, A2, A3 e A4 | 90 |
| Anexo 8 Resultados obtidos da Difraccção RX no Laboratório Hercules para as amostras A1, A2, A3 e A4..... | 94 |
| Anexo 9 Resultados obtidos dos ensaios de fluorescência de RX nas amostras A1, A2, A3 e A4..... | 98 |

Acrónimos, abreviaturas e simbologia

A.A.S.H.T.O - American Association of State Highway and Transportation Officials

LNEC - Laboratório nacional de Engenharia Civil

NP - Norma Portuguesa

ASTM - American Society for Testing and Materials

ABNT - Associação brasileira de normas técnicas

USCS - Sistema Unificado de Classificação dos Solos

FRX - Fluorescência de raios-X

DRX - Difracção de raios-X

LL ou w_L - Limite de liquidez em %

LP ou w_P - Limite de plasticidade em %

IP - Índice de plasticidade

Ref. - Referência

SGP - Société du Grand Paris

NGF - nível geral francês

Esq. - Esquerda

Drt. - Direita

S - expansibilidade em %

w - teor em água em %

Δh - variação da altura do provete em mm

h_0 - altura inicial do deflectómetro

m_s – massa do solo seco em gramas

m_w – massa de água no solo em gramas

Capítulo I – Introdução

1.1. Enquadramento da Obra – *Grand Paris Express*

O *Grand Paris Express* é atualmente o maior projeto de infraestruturas da Europa, com custos na ordem dos 35,6 mil milhões de euros. Este projeto visa melhorar a ligação entre Paris e os subúrbios (e vice-versa), através da construção de: 68 estações, 200 Km de linhas aéreas e subterrâneas e 7 centros técnicos.

A realização dos 200 Km de linhas vai expandir a dimensão da rede de metro atual, construída maioritariamente no final do século passado. O objetivo é expandir as 5 linhas: 14 (Norte), 15 (Sul, Este e Oeste), 16, 17 e 18. Este projeto definido em 2010 pelo ex-presidente Nicolas Sarkozy irá prolongar-se até 2030 e será realizado em 4 fases principais:

F1 - 2020/2021: A primeira fase do projeto passa por realizar o prolongamento da linha 14 Norte. Esta linha tem atualmente 8,6 Km, que faz a ligação entre Olympiades à Saint-Lazare e, o objetivo é que até 2021, esta última estação se ligue a Marie de Saint Ouen, perfazendo assim um total de 4 novas estações e um centro de manutenção (Fig.1).

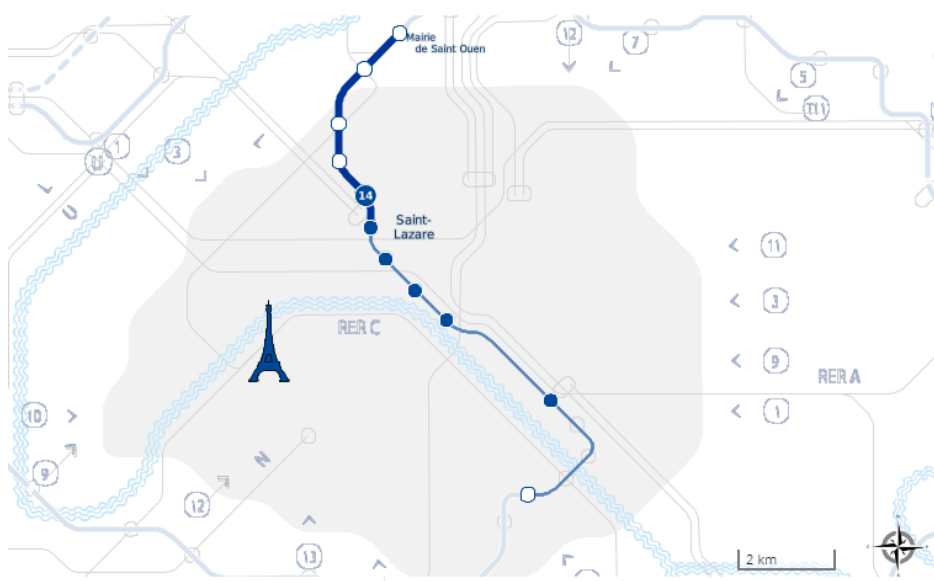


Figura 1 Traçado da primeira fase (2020/2021) do metro de Paris, que corresponde ao prolongamento da linha 14 Norte. Fonte: SGP

F2 - 2024/2025: Fim da linha 14 Norte com a estação Saint-Denis Pleyel que servirá de ligação entre as linhas 15, 16 e 17. Construção da linha 14 Sul com ligação entre Olympiades e o aeroporto de Orly, onde termina, perfazendo 14 Km de túnel subterrâneo.

O prolongamento da linha 15 Sul, com um total de 33 Km e de 16 estações de metro, que ligará Pont de Sèvres a Noisy-Champs para assim fazer a correspondência com as linhas 11 e 16, em torno de Paris (Fig. 2). Mais adiante, será descrita em detalhe a linha 15 Sul, pois é onde se situa o caso de estudo.

Realização de parte da linha 16, entre a estação Saint-Denis Pleyel (fim da linha 14, já referida) até Clichy-Montfermeil, perfazendo 7 estações.

Início da linha 17 com a estação de Le Bourget RER até ao aeroporto de Bourget.



Figura 2 Traçado da segunda fase (2024/2025) do projecto, com prolongamento das linhas: 14 Sul, 15, 16 e 17.
Fonte: SGP

F3 - 2027: Continuação da linha 17 em direção ao aeroporto Charles de Gaulle.

Início da linha 18 que parte do aeroporto de Orly e vai até CEA Saint-Aubin, através da construção de 6 estações.

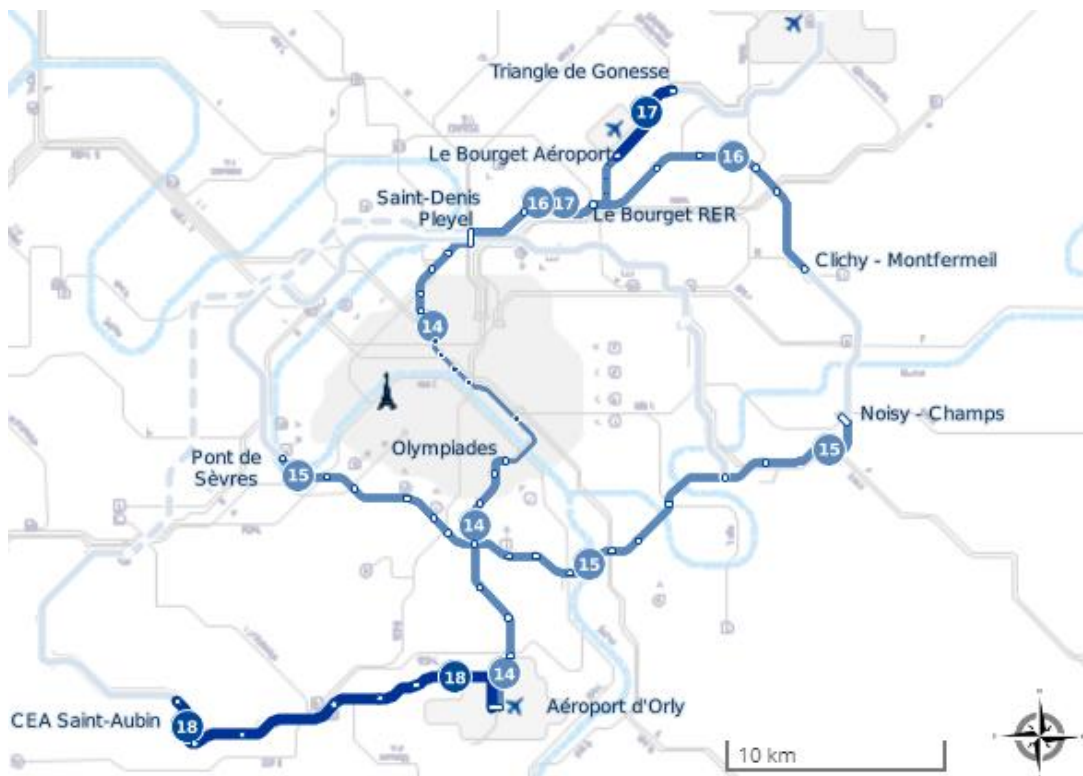


Figura 3 Traçado da terceira fase (2027) do projecto, com prolongamento das linhas 17 e 18. Fonte: SGP

F4 - 2030: Construção de 20 Km de ferrovia e de 11 estações da linha 15 Oeste.

Construção de 23 Km de ferrovia e 12 estações da linha 15 Este.

Finalização dos 29 Km de ferrovia e das 3 estações que restavam da linha 16, perfazendo um total de 10 estações.

A linha 17 ligará assim os 2 aeroportos (aeroporto militar de Bourget e aeroporto de Roissy Charles de Gaulle) e termina na estação Le Mesnil-Amelot, que é a estação mais a norte deste complexo de linhas. Um total de 27 Km de ferrovia, dos quais 6 Km são linhas aéreas e irá dispor de 9 estações.

A linha 18 que ligará o aeroporto de Orly a Versalhes ficará com 10 estações e 35 Km de ferrovia dos quais 14 Km serão não subterrâneas.

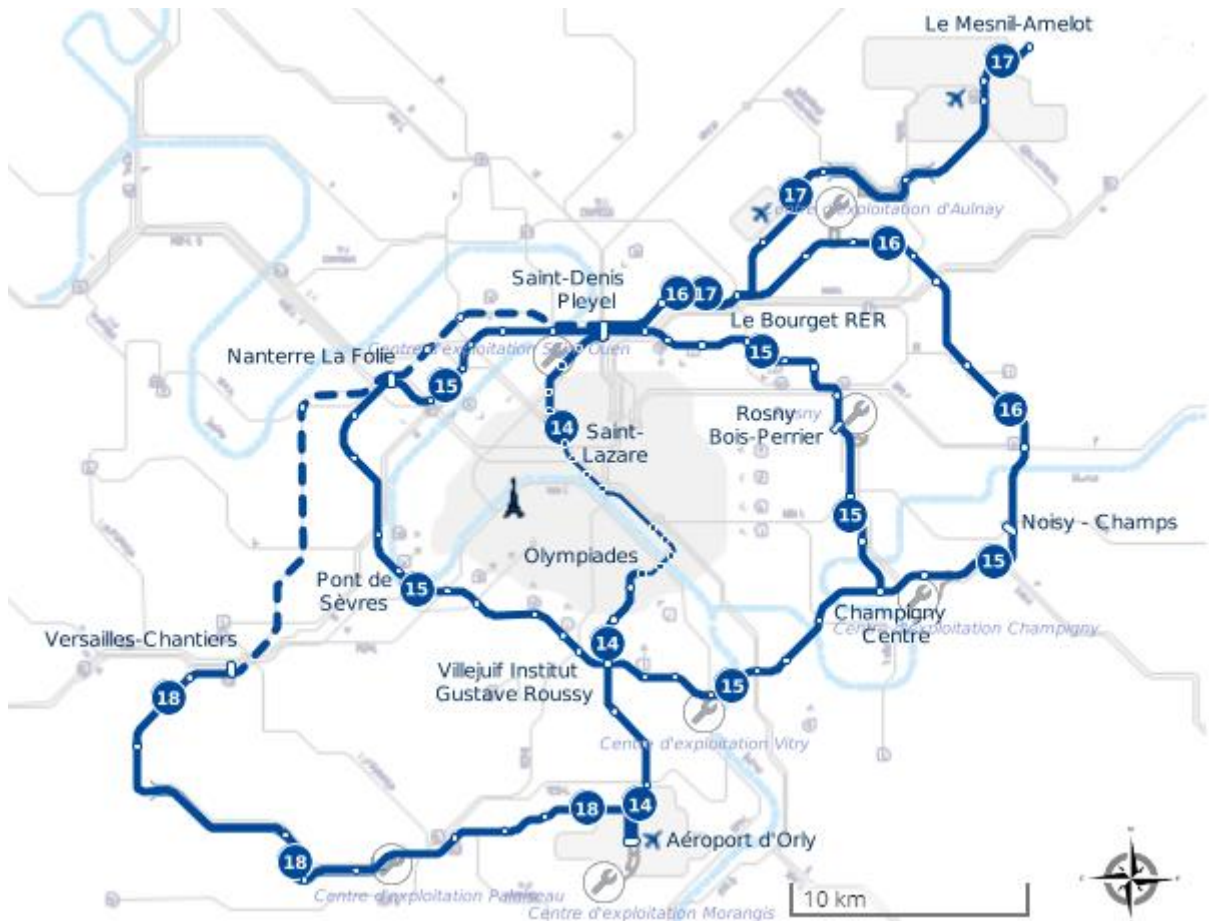


Figura 4 Traçado da quarta fase (2030) do projecto com os prolongamentos das linhas 15, 16, 17 e 18. Fonte: SGP

1.2. Objetivos

Este trabalho tem como objetivos:

- A descrição detalhada das metodologias aplicadas para a construção das paredes moldadas nesta obra, inserida no projeto do *Grand Paris Express*.
- Coleta de amostras de solo no seio da obra a fim de estudar as características físicas, químicas e mineralógicas dos solos.
- Apresentar os resultados obtidos em relação às características químicas, mineralógicas e físicas dos solos em estudo.
- Discussão dos resultados obtidos e análise da forma como os mesmos influenciam as características geotécnicas do terreno.

1.3. Estrutura do Relatório de Estágio

Neste relatório foi aplicada uma metodologia tendo como base os seguintes tópicos:

- **Introdução**, onde se faz um enquadramento geral do projeto de infraestruturas do metro de Paris, bem como a síntese dos vários objetivos pretendidos com este trabalho.
- **Enquadramento do projeto**, que faz a contextualização da linha do metro onde se insere a obra, bem como características da mesma.
- **Enquadramento regional**, que visa localizar geograficamente a obra em foco, bem como fazer uma descrição geológica e geotécnica da mesma.
- **Paredes moldadas com fluído estabilizador**, este capítulo versa sobre o procedimento e execução de paredes moldadas aplicadas a esta obra, assim como a produção de lama bentonítica como fluído estabilizador no decorrer da escavação.
- **Metodologia** utilizada para a colheita de amostras e execução dos ensaios laboratoriais.
- **Apresentação e discussão de resultados**, nesta fase apresenta-se os resultados obtidos a partir dos ensaios laboratoriais e a sua correlação com as características *in situ* do terreno.
- **Considerações finais** resume-se os principais resultados obtidos, bem como a sua interpretação e tecem-se as conclusões retiradas do trabalho realizado, quer no estaleiro (obra), quer no laboratório.

Capítulo II - Enquadramento do projeto

2.1. Linha 15 Sul

Na Fig. 5 estão representadas todas as obras que estão a ser realizadas pela empresa onde a candidata trabalha, portanto apenas 2 das obras vão corresponder a estações, que estão nas extremidades do mapa, que são as obras 802 (futura estação de Noisy-Champs) e a obra 813 (futura estação Bry-Villiers-Champigny). Sendo assim, as obras 803, 804, 805, 806, 808, 810 e 811 são pontos de apoio que existem de 800m em 800m, servindo de locais de acesso ao túnel em casos de emergência e podem também ter a função de promover a ventilação da área subterrânea.

Por outro lado, a obra em estudo – 807, terá grande importância pois será o ponto onde se vão encontrar as linhas (Fig. 5 – quadrado rosa) que vêm da obra 802 (correspondente à estação Bry-Villiers-Champigny), e da obra SMR (que corresponde ao centro de manutenção e reparações de Champigny).

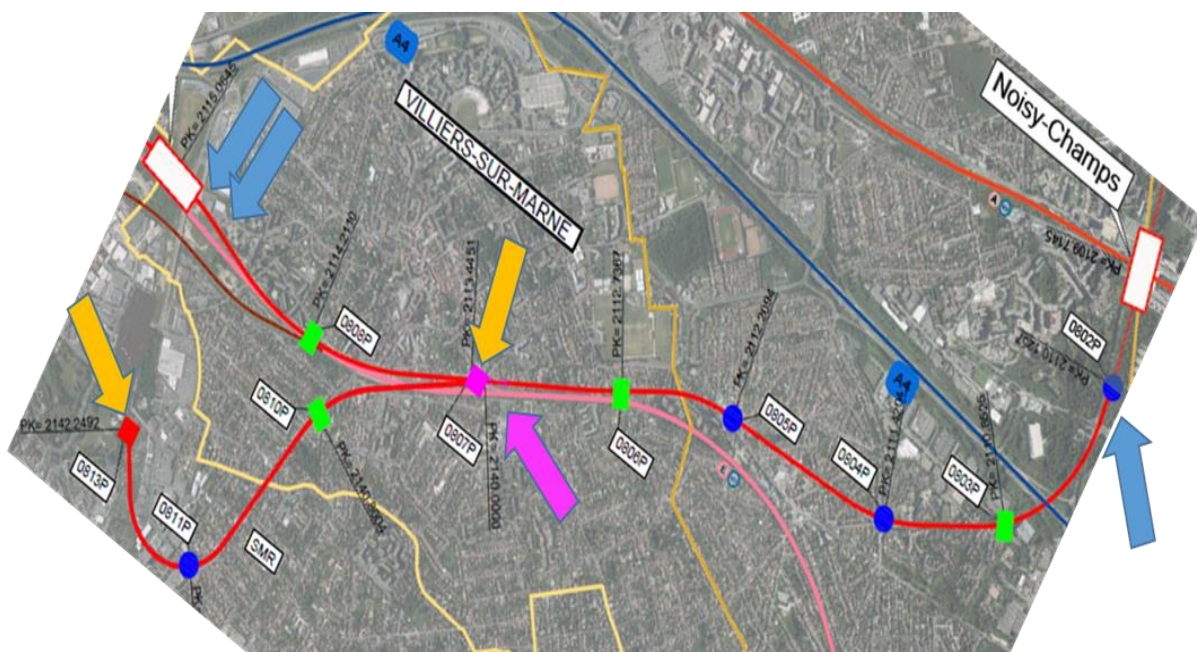


Figura 5 Traçado da Linha 15 Sul do metro de Paris. Fonte: Atlas Fondations

Quer isto dizer que as 2 tuneladoras responsáveis pela escavação dos túneis irão cruzar-se neste ponto-chave, a obra 807 (Fig. 5): uma TBM que iniciou a perfuração a partir da obra 802 (estação de Noisy-Champs) e fará todo o túnel até à estação final (correspondente à obra 813 – Bry-Villiers-Champigny), e a outra tuneladora que parte do centro de reparações de Champigny (obra SMR) terminando a sua trajetória nesta mesma obra, sendo depois retirada deste troço e colocada na linha 17. A primeira tuneladora é do tipo TBM EPB (Earth Pressure Balance), tem 9,8m de diâmetro e vai perfurar a uma profundidade média de 20m em rochas pouco consolidadas e terrenos moles, geralmente margas. A segunda TBM multi-mode com 9,8m de diâmetro teve o início da sua perfuração na obra 813 para terminar na obra 807, onde atravessará calcários heterogêneos com a presença de nódulos de sílex a uma profundidade média de 25m. Assim a obra 807 é um ponto de apoio para estas TBM's, sendo que a primeira TBM irá passar neste ponto e, caso seja necessário, fazer algum reajuste, será feito neste ponto, enquanto a segunda tuneladora irá terminar os trabalhos de perfuração neste mesmo ponto.

Pelos motivos expostos, a obra 807 é de dimensões maiores que as outras mencionadas anteriormente e tem também características geométricas diferentes, pois todas as obras 803, 804, 805, 806, 808, 810 e 811 são obras circulares realizadas a profundidades médias de 44 metros, ao passo que a obra 807 em estudo é quadrangular (Fig. 6) com uma profundidade média de 50,5 metros.



Figura 6 Vista aérea da geometria da obra em estudo. Fonte: Atlas Fondations

2.2. Obra Sentier des Marins (Obra 807)

A obra 807 – Sentier des Marins dispõe-se paralelamente à linha de metro de superfície e tem uma área de construção de 2000 m², sendo a área total de 4959 m² e um perímetro de 401 metros; é dividida em duas áreas de funcionamento (Fig. 7: 1 - zona de construção das 42 paredes moldadas; 4 - zona de fabrico e stock de bentonite e reciclagem das lammas bentoníticas). Na área de fabrico de bentonite existem 3 tanques de stock de lammas e 3 desarenadoras, bem como uma fossa associada a estas. Como esquematizado na Figura 7: um tanque tem as lammas bentoníticas utilizadas na limpeza do furo (depois da escavação) e, os outros dois tanques têm as lammas utilizadas no decorrer da escavação. Nesta área existe ainda um silo com capacidade para 65 toneladas de argila (bentonite) e um misturador de lammas para fabricar bentonite (mistura de argila fina com água potável e aditivos).

Na área à esquerda da rampa de acesso (Fig. 7 – 3) existe todo o equipamento necessário para a execução das paredes moldadas: 2 hidrofresas, 2 escavadoras com baldes de maxilas e 1 grua de manutenção; existe ainda todo o material de manutenção e limpeza das máquinas, bem como contentores para stock do material.

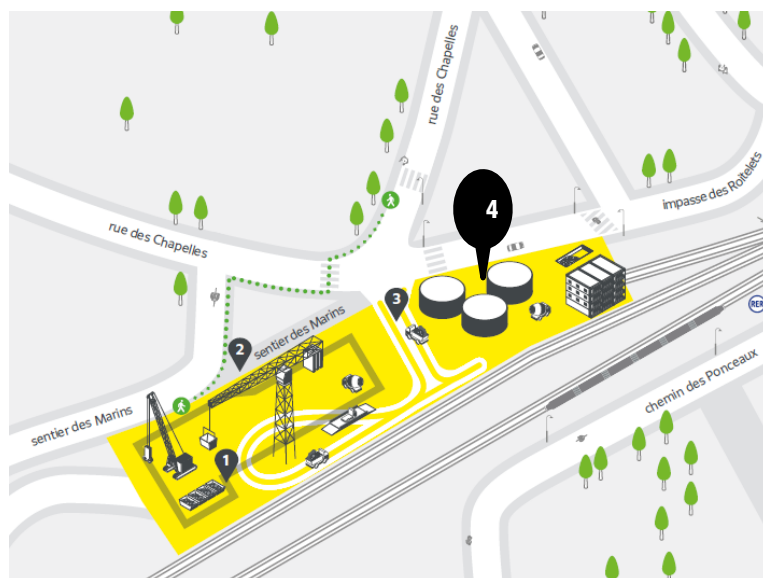


Figura 7 Vista aérea da obra. 1 - zona de escavação e construção das paredes moldadas; 2 - via de circulação pedonal no interior da obra; 3 – Entrada com rampa de acesso à obra; 4 - área de produção e stock das lammas bentoníticas. Fonte: SGP

Capítulo III – Enquadramento Regional

3.1. Localização Geográfica

O caso de estudo situa-se em França, na região administrativa de Paris, na região de Val-de-Marne, no município de Villiers-Sur-Marne, que tem uma área de 4,33Km², localiza-se a 15Km a Leste de Paris, fazendo fronteira a Sul com Champigny-Sur-Marne, a Este com Noisy-Le-Grand e a Norte com Bry-Sur-Marne (Fig.8).

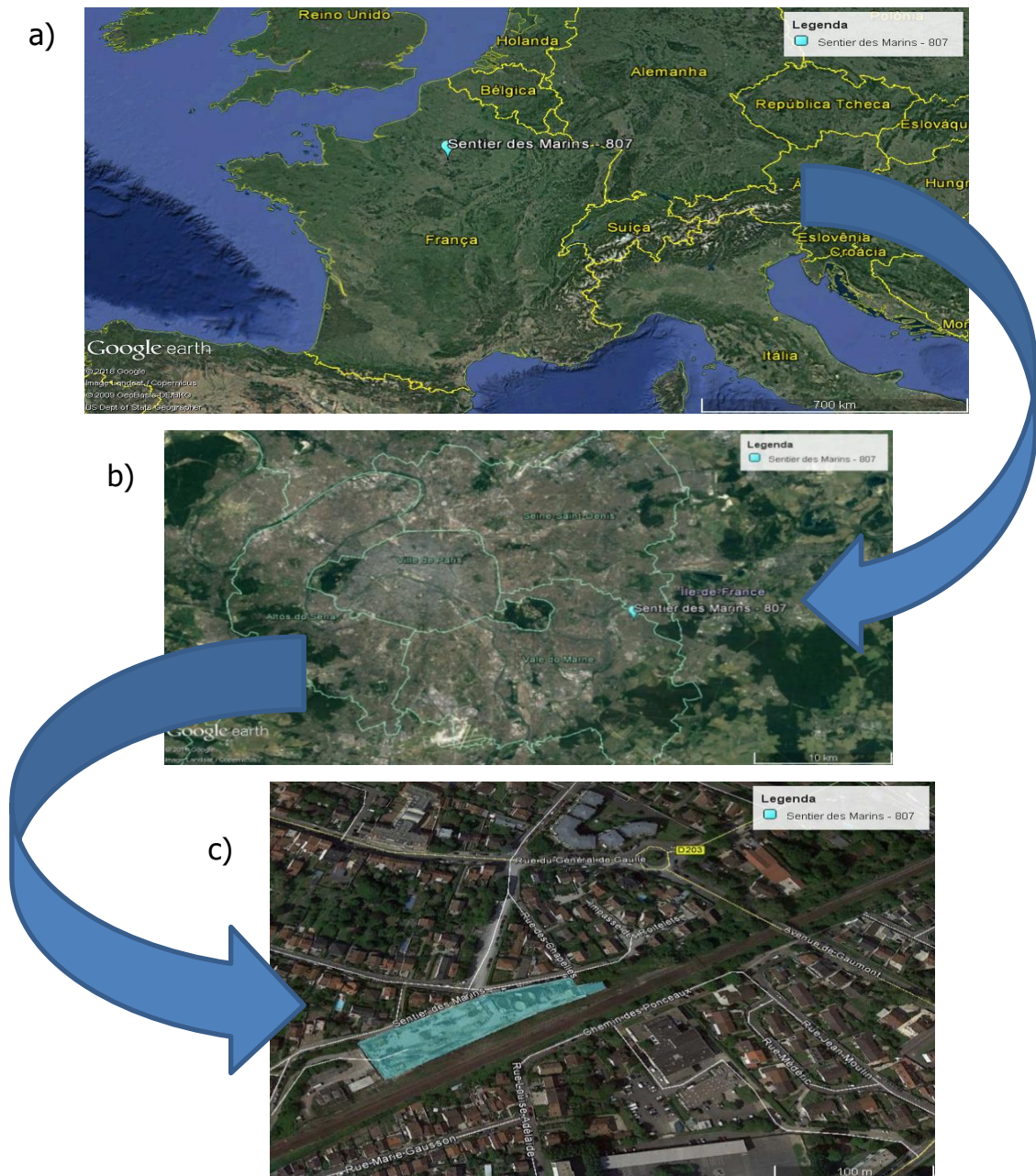


Figura 8 Localização geográfica da obra em estudo: a) França, b) cidade de Paris, c) localização da obra destacada a azul. Fonte: Google Earth

3.2. Geologia Regional

A área de estudo (Fig. 9) insere-se na carta geológica de Lagny (148) à escala 1/50 000 (Soyer e Lemoine, 1958). As formações geológicas encontradas na área de estudo apresentam idades compreendidas entre o fim do Paleozóico até ao Cenozóico, são depósitos de origem marina, lacustre e lagunar que se foram depositando ao longo do tempo no soco Hercínico, através de episódios de transgressão e regressão que proporcionaram as condições para a formação da *bacia de Paris*.



Figura 9 Enquadramento Geológico da área de estudo. Carta de Lagny (148) à escala 1/50 000 (Soyer e Lemoine, 1958)

Legenda

| | |
|--|--|
| | Localização da obra em estudo |
| | Limons de plateaux (LP) |
| | Calcaire de Brie (g1b) |
| | Argiles Vertes e Glaises à Cyrènes (g1a) |
| | Marnes Blanche de Pantin (e7b) |
| | Calcaire de Champigny (e7ac) |
| | Calcaire de Saint-Ouen (e6d) |

Apesar das deformações devidas à orogenia alpina e das variações eustáticas do nível médio do mar que esteve na origem de inúmeras transgressões e regressões, o máximo de acumulação sedimentar e subsidência ocorreu na região central desta

bacia, uma vasta depressão grosseiramente circular rodeada por antigas formações variscas. Esta bacia contém na sua zona central cerca de 2500 metros de espessura de formações sedimentares, de idade Mesozóica e Cenozóica (Soyer e Lemoine, 1958).

De seguida procede-se à descrição das formações geológicas, na área de estudo, da formação mais recente (Limens des Plateaux) para a mais antiga (Calcaire de Saint-Ouen).

Holocénico

Limens de plateaux (LP). Esta designação abrange um complexo de formações que diferem entre si, quanto à sua origem e composição. São depósitos heterogéneos que compreendem formações residuais, cascalho e lodos.

Os lodos, que se encontram na zona Norte da carta de Lagny (148) estão depositados sobre os Calcários de Saint-Ouen. A sua espessura é variável entre 2 a 3 metros. Eles são formados por materiais muito finos, silto-argilosos, de cor castanha avermelhada com numerosos fragmentos de calcários. Contudo as formações que cobrem os lodos de Briard são mais heterogéneas, que variam de argila e areias quartzosas a concreções calcárias ou ferruginosas. Estas formações compreendem entre si outras camadas de areias, correspondentes aos depósitos residuais das areias de Fontainebleau, bem como fragmentos de *sillex*. Lateralmente ou em sobreposição, os lodos de Plateaux passam a formações resultantes da descalcificação dos Calcários de Brie, resultando numa argila cinzenta a acastanhada.

Oligocénico Inferior

Calcaire de Brie (g1b). Estes calcários são raramente visíveis, pois resultam de uma alteração profunda do depósito lacustre. Na sua base são formados por camadas margosas brancas intercaladas por níveis argilosos e arenosos; no topo, esta formação apresenta-se gradualmente mais branca e composta por calcários

compactos siliciosos a margosos. Devido à ação da erosão, atualmente afloram apenas blocos dos calcários siliciosos revestidos de argilas cinzentas residuais.

Argiles Vertes e Glaises à Cyrènes (g1a). Tipicamente de cor verde forte, estas argilas constituem um notório horizonte, compostas principalmente por ilite e esmectite, aparecendo caulinite pontualmente. Quando as argilas se encontram secas depositam-se em pequenos blocos, quando estão húmidas apresentam um comportamento plástico. As bancadas de margas esbranquiçadas tem espessura entre 30 e 40 metros, já a espessura das argilas verdes varia entre 6 e 7 metros.

As *Glaises à Cyrènes* estão dispostas sobre estas mesmas argilas verdes, com uma espessura de 1 a 2 metros. Devido à baixa consistência destas formações, o que facilita a formação de fissuras, permitindo o aparecimento das margas subjacentes, formou-se um complexo argilo-margoso que recobre o terreno com espessuras na ordem dos 10 metros.

Eocénico Médio a Superior:

Marnes Blanche de Pantin (e7b). São calcários margosos, cinzentos a esverdeados na base, e esbranquiçados no topo, que devido à cristalização, os silicatos apresentam-se com fracturação ortogonal e depositados em blocos prismáticos com durezas variáveis. Estes constituem a base de um pequeno aquífero, que graças às fissuras existentes favorecem a circulação de água.

No topo da formação existe uma camada de gipsite cristalina de forma prismática e rosácea, correspondente à gipsite de Marabet, mais frequente a Oeste, sendo que este nível nem sempre aflora; à diferentes profundidades surgem oólitos de cor esbranquiçada a rósea, dos quais os mais importantes encontram-se a 2,5 m do limite superior. A Oeste, esta formação apresenta-se com uma componente mais argilo-arenosa, com presença de hidróxidos de ferro. Pontualmente, existem nódulos de calcário silicioso e folhelhos de gipsite e argila.

Calcaire de Champigny (e7ac). Sob a camada de Briard, as massas de gipsite vão perdendo expressão, sendo substituídas por calcários lacustres, siliciosos ou margosos. Intercalados entre Margas Supragipsitas e as Margas Pholadomyes, o Calcário de Champigny corresponde às três primeiras massas de gipsite e tem espessura variável entre 15 e 40 metros, aumentando em direção ao Sul. A zona de transição é difícil de identificar, mas sabe-se que é coincidente com a depressão das Margas que foram erodidas posteriormente ao Eocénico médio. As fácies do Calcário de Champigny evoluem lateralmente de Oeste para Este, a partir das margas argilosas. Em corte, é possível verificar as várias alternâncias entre margas-calcárias, calcários margosos siliciosos, característicos de uma sedimentação lacustre muito instável.

Calcaire de Saint-Ouen (e6d). Contemporâneo da transgressão marinha a NW da *Bacia de Paris*, estes calcários correspondem assim ao episódio laguno-lacustre na parte oriental da bacia. Estes são constituídos por margas e calcários de cor creme, rosácea a cinzenta. Nestas bancadas de calcário existem níveis de margas argilosas de cor acastanhada, intercaladas com argilas magnesianas. Esta formação tem uma espessura variável entre os 7 e os 20 metros.

3.3. Caracterização Geotécnica

Neste item, procede-se essencialmente à caracterização das litologias intersectadas (Fig. 10 a) pela sondagem mecânica realizada no ponto identificado no mapa (Fig. 10 b) realizada durante a fase de projeto da obra. Deste modo, apresenta-se o log de sondagem:

- Aterros com espessura variável de 0 metros a 2,7 metros de profundidade; estes aterros são constituídos por fragmentos de margas verdes e sílex de várias dimensões granulométricas.
- Argilas Verdes, esta formação tem uma espessura de cerca de 1 metro aos 2,7 metros de profundidade e são constituídas por argilas margosas de cor esverdeada.

- Margas de Patin, com espessuras máximas de 6 metros, são margas de cor bege com forte componente argilosa e calcária, com comportamento muito plástico.
- Margas de Argenteuil, têm características variáveis ao longo da profundidade: nos 3 primeiros metros de profundidade, estas margas apresentam uma forte componente argilosa de cor cinzenta a esverdeada; entre os 14,5 metros e os 20 metros de profundidade apresenta-se como uma argila margosa de cor verde acinzentada a cinzento escuro; na base (entre os 19,3 metros e 20 metros de profundidade) são mais alaranjadas, devido aos veios de oxidação e também apresentam uma considerável componente arenosa.
- Calcários de Champigny, ocorrem entre os 20 metros a 41,1 metros de profundidade de forma bastante heterogénea:
 - 20 metros – 22,7 metros, estes calcários apresentam-se mais margosos com passagens de muito baixa resistência, apresentando minerais ferrosos de dimensões máximas de 1mm.
 - 22,7 metros – 23 metros, margas de maior dureza, de cor branca a creme, com elementos de calcário duro de dimensões máximas de 2,5 cm e também ocorrências de sílex de dimensões aproximadas a 3,5 cm.
 - 23 metros – 26 metros, margas duras, de cor branca a creme, com elementos de sílex entre os 23,7 m e os 24 m de profundidade (com dimensões em torno dos 4,5 cm) e ainda um bloco de sílex de 25,15 metros à 25,5 metros, portanto de dimensão superior a 20 cm.
 - 26 metros – 34,2 metros, margas de maior dureza, de cor azul-cinza a acastanhado, com vários elementos de sílex e com horizontes de veios de sílex cimentados; entre os 30 m e os 31,2 m, esta marga passa a calcário com um RQD de 29 %; na base voltam a surgir margas que se apresentam menos duras, mas com numerosos elementos de sílex disseminados, com dimensão máxima de 2,5 cm.
 - 34,2 metros – 41,1 metros, voltam a surgir argilas margosas, inicialmente de cor cinzenta a negra, alternando com um fino horizonte de argila cinzenta a bege e, nos últimos 4 metros, esta argila apresenta-se menos margosa e de cor cinzenta clara.

- Areia verde, com espessura de 0,5 metros a 1 metros, situada entre 41,1 metros e 42,2 metros, esta é uma areia argilosa de cor verde forte.
- Calcários de Saint-Ouen, situa-se entre 42,2 metros e 51,3 metros de profundidade, esta litologia apresenta RQD entre 34% e 45%. Trata-se de um calcário margoso e duro, de tonalidade variável, começando no verde forte a cinzento e a terminar em cinzento claro a bege, na base desta formação existe um horizonte silicioso de 0,2 metros de espessura, entre os 50 metros e os 51,3 metros de profundidade, onde deixa de ser calcário para dar lugar a areias margosas e argilosas de cor verde a negra.
- Areias de Bouchamps, situadas entre os 52,3 metros e 53 metros de profundidade (fim da sondagem); estas caracterizam-se por ser argilas ligeiramente margosas de cor verde-escuro, com veios de calcários a partir dos 52,6 metros de profundidade.

Em termos de ambiente hidrogeológico, existem 2 aquíferos principais: um à cota média de 62 NGF (nível geral francês – nível altimétrico utilizado em território francês), atravessando as margas de Patin, este aquífero encontra-se superiormente confinado, devido à presença das argilas verdes; o outro aquífero é livre e está a 85 NGF atravessando os calcários de Champigny.

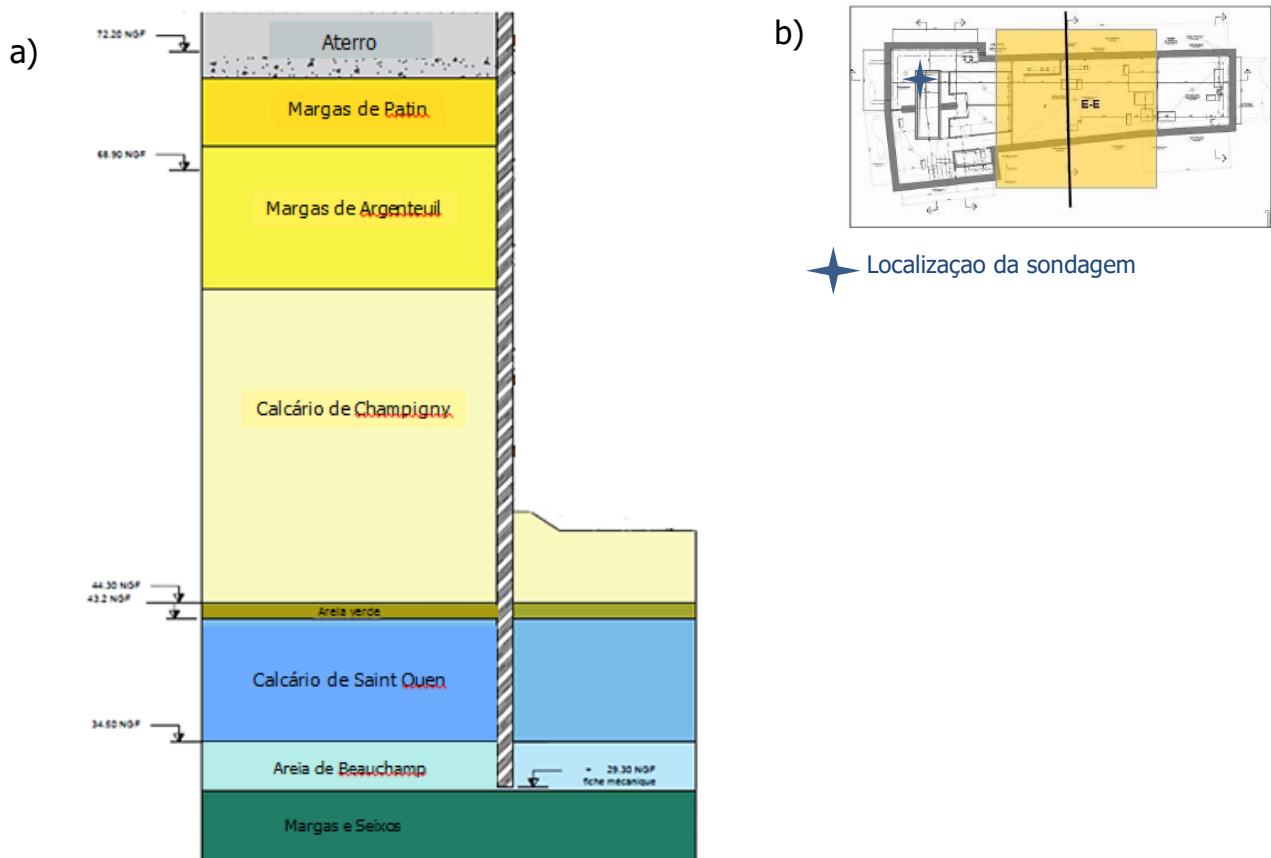


Figura 10 a) Corte geológico expedito com as formações geológicas intersectadas pela sondagem efectuada no interior da obra, b) Plano da obra com a localização da sondagem efectuada. Fonte: Atlas Fondations

Capítulo IV - Paredes Moldadas com fluido estabilizador

Para a execução das escavações necessárias para esta obra utilizou-se a técnica das paredes moldadas que tem como finalidade manter as paredes das escavações estáveis até ao momento da betonagem, tendo as mesmas sido realizadas até 51 metros de profundidade em betão armado. Para manter a escavação de forma estável utilizaram-se lamas com argilas bentoníticas, que sustentaram as paredes do furo ao longo da escavação. Este efeito estabilizador das lamas é proporcionado pelas propriedades tixotrópicas da mesma e pelas cargas elétricas das micelas dos minerais de argila que produzem uma fina película – “cake” em torno das paredes do terreno.

4.1. Recursos

4.1.1. Equipamentos e ferramentas

Os equipamentos e ferramentas presentes na obra, segundo as suas funções, foram:

Na operação de furação, dependendo do material encontrado, utiliza-se a HS 8130 (Liebherr) escavadora com balde de maxilas (também designado por *benne* ou *grab*) para os materiais de menor dureza; para as formações mais resistentes recorre-se a fresa hidráulica ou também designada por hidrofresa - MC 96 (BAUER). Nas laterais da furação são colocadas juntas com *waterstop*, e para a descofragem das juntas é frequente recorrer-se às "mãos", que são umas pás, que são soldadas na *benne* para desagregar o betão e o terreno em torno da junta.

Durante a betonagem utilizou-se uma grua auxiliar (Sarens), com uma flecha de 89 metros, para a colocação das armaduras e das colunas de betão. Fora do estaleiro existe uma central de produção de betão (BSM) responsável pela produção e envio de betão através de camiões.

Na zona do estaleiro onde é produzido o fluído estabilizador (lamas bentoníticas) existem 2 tanques de mistura e 1 tanque com bentonite "nova", isto é, bentonite que é apenas utilizada na limpeza do furo. Existem 2 bombas de membranas para enviar e receber a bentonite do painel, dois desarenadores com uma fossa associada onde é colocado o material retirado da escavação do furo. À medida que se avança na escavação os materiais são aspirados pela hidrofresa e enviados para reciclagem no estaleiro através de tubagens ligadas à mesma. Por fim, existe uma fonte de água potável e dois reservatórios de argila em pó (Fig. 11).



Figura 11 Zona de armazenamento e fabrico de lamas bentoníticas: 2 reservatórios a cinzento que armazenam a bentonite para escavação, 2 silos brancos que armazenam a argila para a produção de bentonite.

4.1.2. Materiais

O betão utilizado na obra obedece a especificações pré-estabelecidas segundo as características da obra e possíveis solicitações na mesma. Assim o tipo de betão que foi utilizado é o BPS MP EN 206/CN com uma resistência à compressão de 35/45MPa. No total foram utilizados 18 523 Kg de betão.

Foram utilizados 1 371 toneladas de armadura, sendo que esta massa compreende os tubos de carotagem e de auscultação (cuja finalidade é realizar testes através de uma sonda para determinar se o betão está são). Nas zonas onde irá passar o túnel são colocadas as armaduras em fibra verde acopladas entre as armaduras em ferro, de maneira a facilitar a passagem da tuneladora no momento da escavação do túnel.

A bentonite utilizada é do tipo C2 (bentonite sódica de alto rendimento) tipicamente utilizada em escavações onde seja necessário estabilizar e impermeabilizar o terreno de forma a evitar o colapso das paredes no decorrer da escavação do furo ou túnel. A bentonite em pó é misturada com água numa dosagem entre 25 e 35 Kg/m³. As bentonites atendem a diferentes parâmetros de qualidade dependendo da sua função; pode também ser necessário adicionar bicarbonato de sódio para diluir as lamas.

4.1.3. Mão de obra

De maneira a explicar a sequência e organização dos vários postos de trabalho, apresenta-se de seguida o organigrama aplicado na obra em estudo (Fig. 12). Sendo que, os elementos constituintes das várias equipas dependem da fase da obra, bem como do plano de trabalhos previsto para a semana em questão.

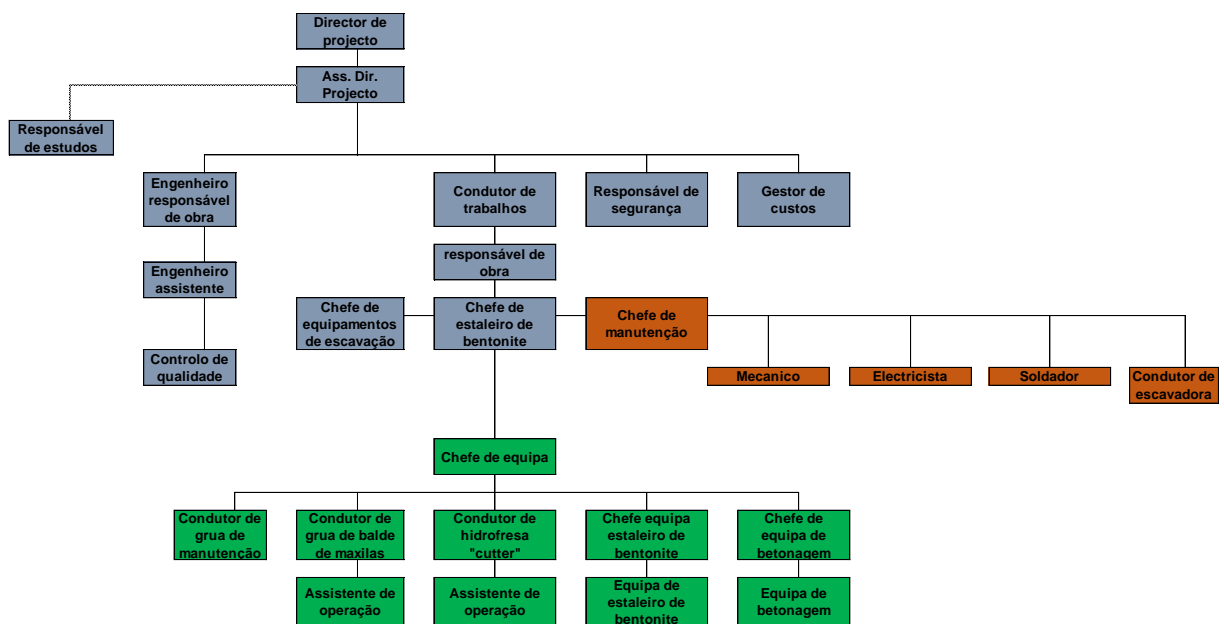


Figura 12 Organigrama do pessoal na obra 807. Fonte Atlas Foundations

4.2. Processo de execução

4.2.1. Implantação dos painéis

Esta obra é dividida nas zonas A e B (anexo 1), constituídas por 42 painéis, todos com 1,5 metros de espessura, com comprimentos compreendidos entre 49,25 metros e 50,8 metros, e as armaduras que são colocadas nos painéis têm todas 1,350 metros de espessura. Assim, consoante a geometria dos painéis temos:

- 2 painéis (4 e 35) em forma de "T", com largura menor de 2,8 metros e largura maior aproximada de 5,5 metros; estes painéis levam 2 tipos de armadura, uma maior de 2,9 metros de largura e outra menor de 1,6 metros de largura.
- 2 painéis (11 e 19) em forma de "+", com as mesmas larguras, 2,8 metros x 2,8 metros, estes levam apenas uma armadura de 1,9 metros de largura.
- 3 painéis (5, 29 e 31) triplos, isto é, são painéis com largura suficiente para colocação de 3 armaduras; essa disposição é recorrente quando existe uma ligeira mudança na direção do alinhamento de painéis, então estes servem como 'quebra' nesse alinhamento (anexo 1). Em todos estes painéis foram colocados 2 conjuntos de armaduras de largura 1,3 metros e, a terceira armadura nos painéis 29 e 30 tem 1,6 metros de largura, ao passo que no painel 5 a terceira armadura tem uma largura de 2 metros.
- 4 painéis (1, 10, 25 e 38) em forma de "L", sendo que apenas o painel 10 utiliza 2 armaduras, uma de 2,15 metros e outra de 2 metros; os restantes painéis em "L" utilizam combinação de 3 armaduras com larguras variáveis entre 1,3 metros e 2 metros.
- 13 painéis (12-18, 20, 22, 27 e 40-42) unitários, isto é, utilizou-se apenas uma armadura de 2,8 metros de largura. Estes painéis foram escavados de uma só vez, ou seja, tem apenas 1 troço de escavação.

- 18 painéis (2, 3, 6-9, 21, 23, 24, 26, 28, 30, 33, 34, 36, 37 e 39) duplos, como o próprio nome indica, estes levam 2 conjuntos de armaduras com larguras variáveis entre 6,8 metros e 7,39 metros, dependendo da largura do painel.

Além destas características geométricas dos painéis, e consoante a ordem de execução da escavação dos mesmos, tem de se "rodar" o sentido da junta, obtendo-se, de acordo com o posicionamento das juntas: 21 painéis intermédios (ou de continuidade), 10 painéis secundários (ou de fecho) e 11 primários (iniciais), conforme retratados no anexo 1.

4.2.1.1. Muros-guia

Segundo Brito e França (1999), com base no projeto de uma obra, é implantado no terreno a parede moldada ao longo de todo o perímetro da construção, depois faz-se uma vala de eixo coincidente com o da parede (Fig. 13). Ao proceder-se à escavação da vala deve-se evitar remexer desnecessariamente o terreno para não prejudicar a fundação dos muros. Na obra em estudo, a largura da vala é então igual à espessura prevista para as paredes (1,5 metros), acrescentando 5 cm de folga de maneira a facilitar a entrada do equipamento de escavação, bem como das armaduras. Os muros são assim betonados contra o terreno com uma espessura na ordem dos 0,15 metros a 0,20 metros e, a altura de 0,80 metros a 1,50 metros, consoante a consistência do terreno, sendo fracamente armados. A altura dos muros deve garantir que o nível superior das lamas varie entre a cota superior e inferior dos mesmos, pois se as lamas transbordarem haverá perdas para a parte exterior da escavação e, no caso contrário, se estas descerem abaixo dos muros, pode ocorrer desmoronamento do terreno e conseqüente contaminação das lamas.



Figura 13 Execução de muros guia com parte da armadura visível e outra parte já betonada e preenchida de terra. Fonte: Atlas Foundations.

De acordo com Brito e França (1999), os muros-guia servem para guiar o equipamento de escavação, suportar as cargas e resistir aos impactos causados pelos equipamentos no momento da sua introdução; permitem também apoiar as armaduras à medida que são introduzidas nas fundações, e por fim, servem ainda de apoio para a colocação das juntas que farão a divisão entre cada painel.

A forma de execução dos muros-guia é bastante simples: consiste na abertura de uma vala com a largura e profundidade pré-definida, onde depois é feita a cofragem/molde conforme as características dos painéis a implantar; a cofragem é feita com recurso à colocação de divisórias em madeira ao longo da largura do muro-guia e depois preencher de betão a parte exterior e colocar cascalho na parte interior (Fig. 13).

Depois da implantação dos muros-guia, faz-se o preenchimento em betão da plataforma, esta tem de apresentar uma resistência tal que suporte todo o peso que lhe será acrescido no decorrer da obra, é ainda obrigatório a passagem de um topógrafo para verificar o nivelamento da plataforma.

Atendendo às características de grande envergadura desta obra, e tal como se pode verificar na Figura 14, os muros-guia têm uma altura de 1,2 metros e uma espessura de 0,4 metros, terminando a 1,2 metros de profundidade com espessura de 0,3 metros. A plataforma de trabalho tem uma espessura de 20 cm.

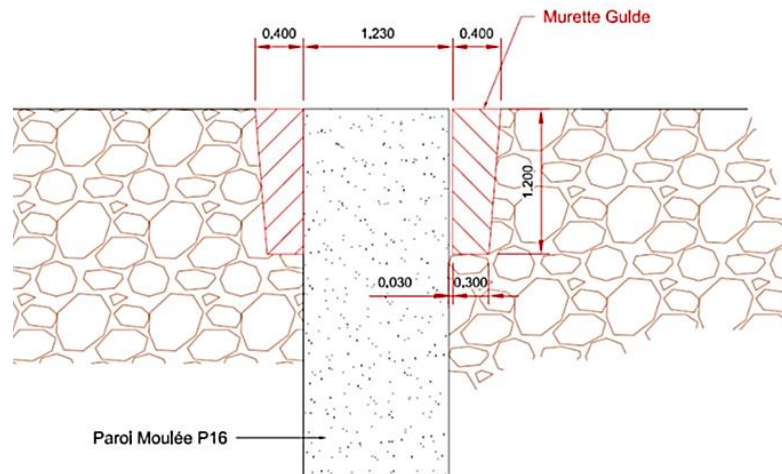


Figura 14 Esquema do muro guia tipo na obra 807: têm uma altura de 1,2 metros e uma espessura de 0,4 metros, terminando a 1,2 metros de profundidade com espessura de 0,3 metros. A plataforma de trabalho tem uma espessura de 20 cm. Fonte: Atlas Fondations

4.2.2. Lamas bentoníticas

De acordo com Guedes de Melo (1979), são várias as funções requeridas às lamas bentoníticas, e que devem cumprir satisfatoriamente, tais como:

- Suportar as paredes da escavação;
- Permanecer na escavação a um nível mais ou menos constante de maneira a perceber-se se ocorreram perdas para o interior do solo;
- Manter suspensos os detritos da escavação, impedindo a sua deposição no fundo da escavação; pelo que as lamas devem ser mais densas do que o terreno;

- Permitir uma fácil substituição pelo betão sem que reste no final qualquer camada ou bolsada de lama no interior do betão, assim a lama deve ser menos densa do que o betão;
- Permitir, por peneiração, sedimentação ou qualquer outro processo, a separação dos detritos de forma a tornar possível a sua posterior reutilização;
- Ser facilmente bombeada para dentro do painel e de volta para o estaleiro de tratamento das lamas;
- Impedir a entrada de água no furo.

Segundo Brito e França (1999), o sistema de preparação da mistura deve realizar-se em reservatórios com capacidade suficiente (recomenda-se, consoante os empreiteiros, um volume idêntico ao dobro do volume a escavar por dia). Deste modo, e no caso deste estaleiro, existem, 2 tanques de 500 m³ de capacidade com lamas bentoníticas reutilizadas e mais 1 tanque de 500 m³ com bentonite “fresca” (Fig. 11). No interior destes tanques são colocados os constituintes, onde são misturados com agitadores mecânicos para conseguir uma suspensão homogénea. A mistura é mantida em movimento até ao momento da bombagem para evitar a sua solidificação, face à sua propriedade intrínseca, a tixotropia.

De acordo com Ball Steetley *et al.* (2006), independentemente do sistema de escavação utilizado, existem sempre perdas significativas de lamas. Estas perdas acontecem, devido à sua penetração no terreno, também quando se utiliza a escavadora por balde de maxilas há sempre uma parte que é evacuada juntamente com o terreno escavado, e ainda devido a elevada contaminação por partículas de solo que impede a reutilização das lamas. O sistema de recuperação das lamas consiste em tanques, para onde são bombeadas as lamas que se tornam desnecessárias à escavação, nos quais se faz a separação dos detritos, geralmente sob a forma de areias (Fig. 15), através de crivos, vórtices e decantadores (Brito e França, 1999). Apesar destes esforços, estima-se uma média entre 20% a 25 % de perdas em termos de volume escavado.

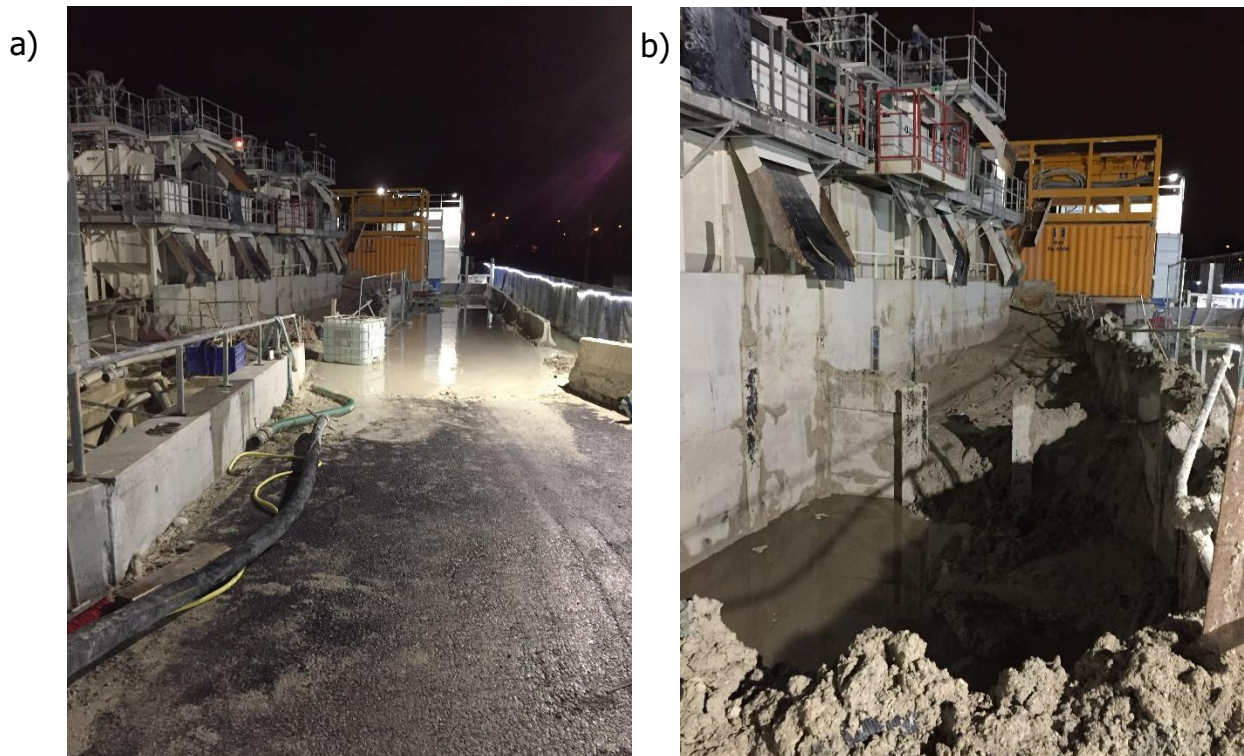


Figura 15 Central de tratamento de lamas: a) Central de desareamento e reciclagem; b) Fossa de material proveniente do desareamento

A reutilização da bentonite é possível mais do que uma vez, e deve inclusivamente ser uma medida a seguir devido aos elevados custos de produção. Mas para que tal seja possível é fundamental a monitorização dos parâmetros da lama bentonítica e proceder aos reajustes necessários no caso destes não se apresentarem de acordo com a norma EN 1538-2000 (Tabela 1).

Tabela 1 Propriedades das lamas bentoníticas. Norma EN 1538-2000

| Propriedades | Tipo de bentonite | | |
|----------------------|-------------------|-----------------------|------------------------------|
| | Bentonite "nova" | Bentonite reutilizada | Bentonite antes da betonagem |
| Densidade (g/ml) | < 1,10 | < 1,25 | < 1,15 |
| Viscosidade (s) | 32 - 50 | 32 - 60 | 32 - 50 |
| Perda de fluido (ml) | < 30 | < 50 | n.a |
| pH | 7 - 11 | 7 - 12 | n.a |
| Teor em areia (%) | n.a | n.a | < 4 |
| "Cake" (mm) | < 3 | < 6 | n.a |
| n.a - não aplicável | | | |

De acordo com Ball Steetley *et al.* (2006), para que seja possível a reutilização das lamas bentoníticas já utilizadas na escavação de um painel, pode ser necessário a adição de certos componentes para corrigir os valores testados. Assim, para reduzir o pH, utiliza-se bicarbonato de sódio; no entanto, quando se pretende aumentar o valor de pH, adiciona-se carbonato de sódio. Para a redução da viscosidade, utiliza-se diluentes orgânicos ou polifosfatos; quanto à redução do valor de perda de fluído aplica-se CMC (carboximetilcelulose).

O aumento de pH pode ocorrer durante o processo de betonagem e, a sua diminuição pode ser devido à presença de ácidos nos fluidos de circulação. Em ambos os casos, ocorre um aumento da viscosidade e de perda de fluído, contudo o valor a ser ajustado primeiramente é sempre o pH e só depois é que serão ajustados os outros parâmetros. Se a correção da densidade não for possível, devido à elevada presença de areias e siltes, estas lamas devem ser evacuadas através de camiões cisterna.

Os parâmetros das lamas bentoníticas são medidos todos os dias, várias vezes ao dia na obra, através de instrumentação adequada para o efeito (Fig. 16 a). De seguida, apresenta-se de forma resumida o tipo de testes realizados para verificar os valores para os vários parâmetros:

- Densidade – é o valor obtido através da balança de lamas (Fig. 16 b), esta é composta por uma haste graduada com um copo numa extremidade e o contrapeso na outra. Depois de se encher o copo (com a lama a testar), que é dotado de uma tampa com um furo no centro, por onde sai a lama em excesso, permitindo assim fixar o volume colocado, equilibra-se a balança com o peso móvel, e em seguida realiza-se a leitura através da escala graduada.

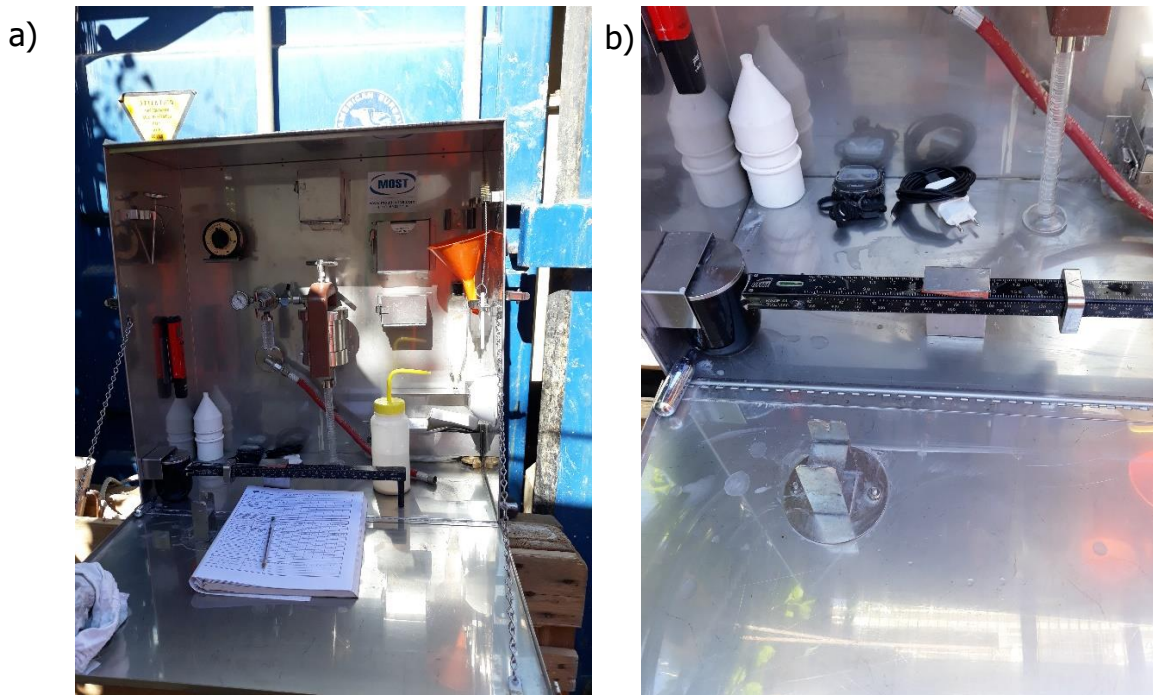


Figura 16 a) laboratório portátil para ensaios de teste de bentonite; b) Balança de lamas.

- Viscosidade – é medida a partir do funil de Marsh (Fig. 17 a). Tapa-se o fundo do funil com o dedo e preenche-se o mesmo até a marca correspondente a 1500 cm^3 de lamas, no topo do funil existe um crivo embutido com uma malha de abertura de $1/16''$, que detém os detritos mais grosseiros. Quando preenchido o funil até à marca, tira-se o dedo e conta-se o tempo necessário para escoar 946 cm^3 , o que corresponde à viscosidade aparente em segundos.

- Teor em areia – Enche-se a proveta com lama até à marca de MUD TO HERE e completa-se com água até à marca de WATER TO HERE. Depois agita-se bem, a mistura é deitada no funil com um crivo no topo, depois lava-se a areia retida. De seguida, encaixa-se o funil na boca da proveta graduada e inverte-se a mistura. Assim, a areia que havia ficado no crivo é feita passar para a proveta com o auxílio de jacto de água (Fig. 17 b). Depois de a areia assentar, regista-se a percentagem de areia no fundo da proveta (Fig. 17 c).

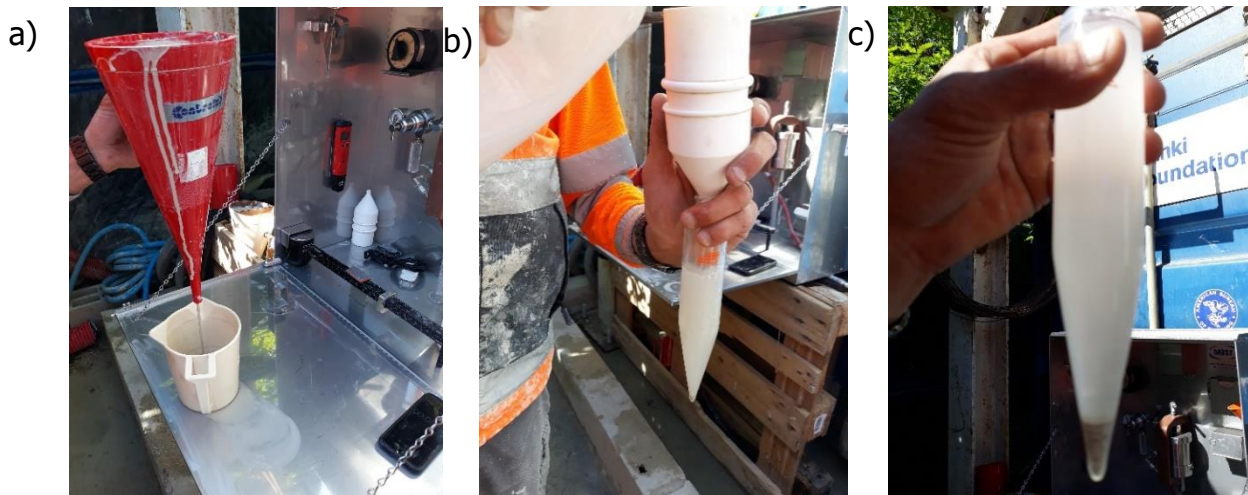


Figura 17 a) Funil de Marsh (a vermelho) para determinação da viscosidade; b) Colocação de água na proveta até ao ponto "water here" para realização do teste para determinação do teor de areia; c) Decantação da areia para determinação do teor em areia presente na bentonite ensaiada

- pH – Coloca-se a amostra de lama num recipiente e com o medidor de pH (Fig. 18 a) regista-se o valor depois de estabilizado.

- "Cake" e perda de fluído – utiliza-se um equipamento de compactação como indicado na Figura 18 b). Depois de se colocar a lama bentonítica dentro da célula de carga com um papel de filtro na base, coloca-se esta a uma pressão de 100 psi durante 27 minutos; se houver alteração de pressão devido à saída de fluído pela base da célula de carga, volta-se a estabilizá-la a 100 psi. O valor de perda de fluído é obtido pela quantidade de água libertada durante o ensaio, medida em ml, e marcada na proveta graduada, posicionada por baixo da célula de carga. O "cake" corresponde à espessura em mm obtida no papel de filtro no fim do ensaio (Fig. 18 c).

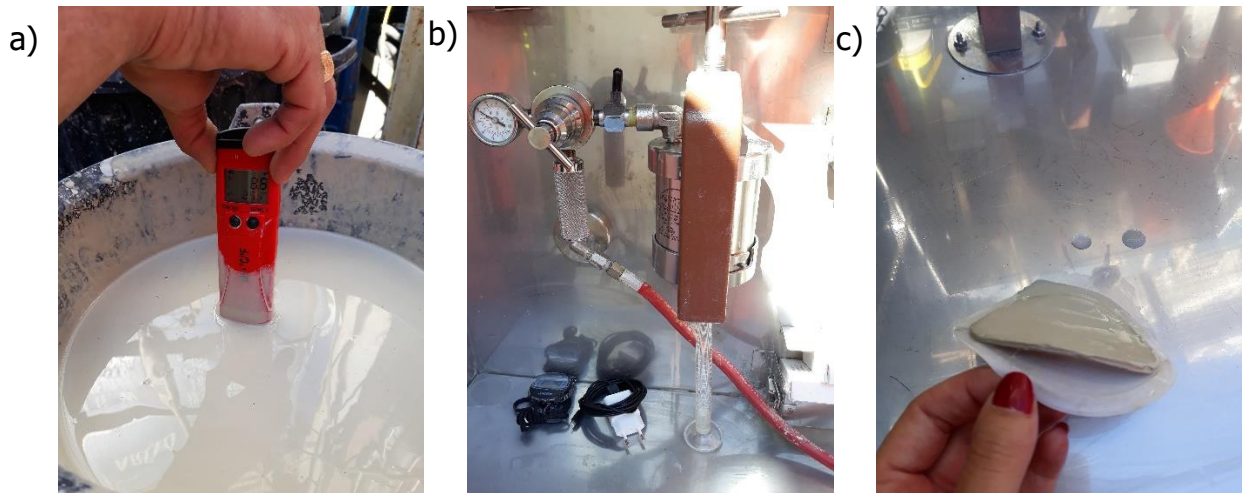


Figura 18 a) Teste de pH; b) Equipamento para efectuar a compactação; c) Espessura do "cake".

No anexo 2 encontra-se o exemplo de uma ficha de testes depois de preenchida.

4.2.3. Furação dos painéis

4.2.3.1. Dimensão dos painéis

Segundo Brito e França (1999), existem vários fatores a ter em conta no momento de definir a largura dos painéis, tais como: a geologia do terreno, a geometria em planta da contenção, a minimização do número de juntas, as cargas introduzidas pelo equipamento de escavação e pelas fundações das construções vizinhas, o peso das armaduras correspondente à totalidade do painel e as exigências de programação da obra.

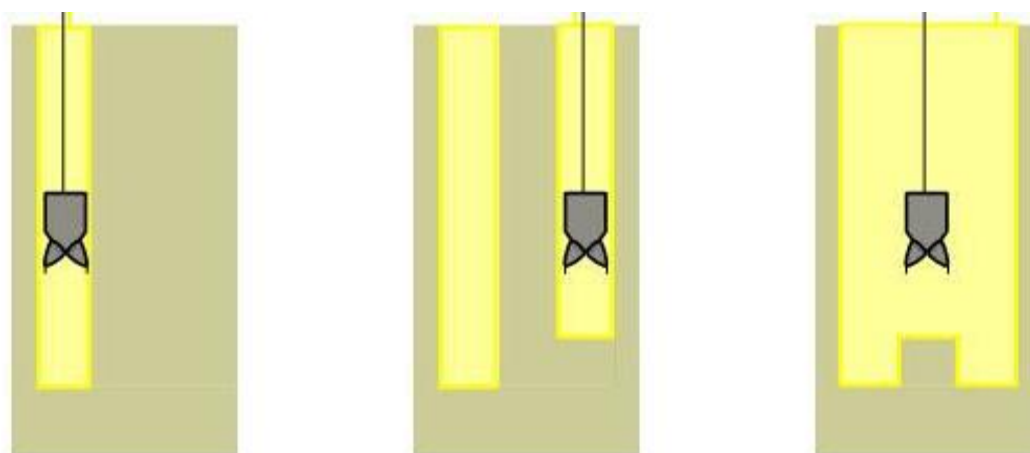
A realização da escavação tem de ser realizada por painéis de diferentes dimensões, pois, não obstante o efeito estabilizador fornecido pelas características tixotrópicas das lamas, o fator determinante para o dimensionamento dos painéis está associado às tensões atuantes no maciço no momento de retirada do solo.

O efeito de arco teorizado por Terzaghi (1943), explica que a distribuição das pressões causadas pelo maciço na estrutura causam deformações na mesma. Assim, de modo a tirar o maior partido do efeito do arco foi criado o método dos elementos finitos nos anos 60, o qual se baseia em que através da divisão de um meio contínuo

em partes mais simples, é possível calcular soluções aproximadas e, como consequência, ser capaz de modelar e calcular estruturas de suporte flexíveis, cada vez, com mais rigor. Esta crescente precisão permite não só projetar estruturas mais seguras, bem como, mais económicas (Fuentes, 2016).

O processo da betonagem deve ocorrer pouco tempo após o final da escavação, para minimizar a contaminação das lamias e do próprio betão pelo terreno, e minimizar o risco de colapso das paredes.

Outro fator ainda a ter em conta na largura dos painéis é a capacidade do equipamento de escavação. Os baldes de maxilas mais frequentemente utilizados, têm quando abertos, uma largura de 2.80 metros, a que corresponde a largura dos painéis unitários (anexo 1). Para os painéis de maior largura é necessário escavar o primeiro troço de 2,80 metros de largura, bem como o terceiro troço da mesma largura, e por fim o segundo troço (situado entre os dois já escavados) cuja largura vai variar consoante a largura total do painel (Fig. 19).



a) Escavação do primeiro troço de 2,8 m de largura.

b) Escavação do segundo troço de 2,8 m de largura.

c) Escavação do terceiro (e último) troço de largura variável, posicionado entre os 2 já escavados.

Figura 19 Processo de escavação por 3 troços a), b) e c). Fonte: SGP

Existem fundamentalmente dois métodos de escavação: por aspiração e por baldes. Nesta obra foi pré-definido o sistema de escavação a aplicar, com base nas características geológicas, ou seja, as cotas de terreno onde se escava com balde ou com hidrofresa. De modo geral, a escavação de um troço iniciou-se sempre pelo sistema de escavação por baldes, até cerca de 17 metros, que corresponde aos

terrenos desagregados colocados após a execução dos muros-guia e a margas de fraca resistência. Depois, coloca-se a hidrofresa entre os 17 metros e 33 metros, onde os calcários aqui presentes apresentam maior resistência e tem de ser triturados e depois aspirados pela mesma; de seguida, coloca-se de novo a "benne" entre os 33 metros e 44 metros onde existem calcários de menor resistência e um nível argiloso, e onde é altamente desaconselhável utilizar a hidrofresa devido ao possível entupimento das condutas. A partir dos 44 metros, correspondentes à formação dos calcários de Saint-Ouen, a escavação é totalmente realizada com recurso a hidrofresa, devido à boa resistência apresentada por esta formação.

4.2.3.2. Sistema de escavação por baldes de maxilas

No sistema de escavação por baldes de maxilas (Fig. 20), também designados por "grab" ou "Benne", o modelo da escavadora utilizada é HS 8130 (Liebherr). Esta tem

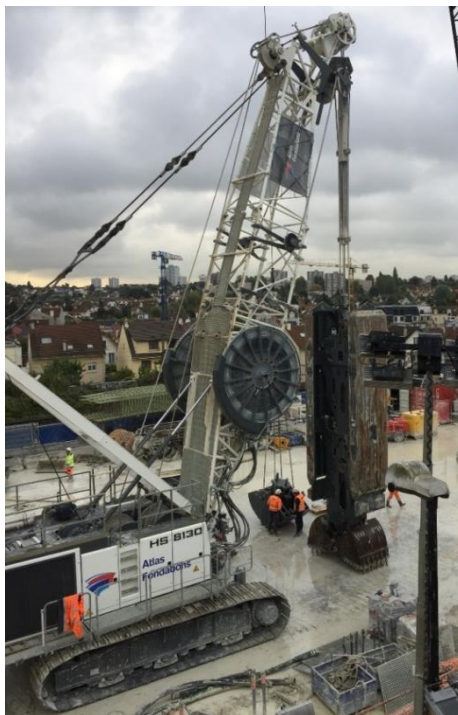


Figura 20 Sistema de escavação por baldes de maxilas "Benne"

o tipo de comando hidráulico e funciona por sistema de suspensão por cabos - por "encosto", permitindo maiores profundidades; neste caso, a "flecha" tem 53 metros de comprimento e uma capacidade de carga de 130 toneladas.

O processo de escavação decorre da seguinte forma: a lama bentonítica é bombeada para o interior da vala, o balde aberto é introduzido dentro da mesma e, ao fechar-se, traz consigo uma mistura de terreno, lamas e água. O balde é deixado a escorrer durante alguns instantes para minimizar as perdas de lamas, depois é trazido para fora da vala, as maxilas abrem-se e o terreno escavado é depositado diretamente no camião designado para transportar o material para o centro de tratamento.

4.2.3.3. Sistema de escavação por fresa hidráulica

No sistema de escavação por fresa hidráulica ou "hidrofresa" sobre carris, foi utilizada a MC 96 (BAUER) com um *Cutter* do tipo BC40 (Fig. 21), que tem o tipo de comando hidráulico com uma "flecha" que tem 46,4 metros de comprimento e uma capacidade de carga de 130 toneladas.



Figura 21 Sistema de escavação por fresa – MC96 da Bauer

Segundo Brito e França (1999), o processo de desagregação do terreno, ocorre do seguinte modo: o movimento de rotação das rodas de corte, suportadas por dois tambores automovidos hidraulicamente, de eixos paralelos e sentido de rotação

inverso, permitem o avanço da escavação através de movimento de circulação inversa, isto é, a lama é lançada por gravidade para dentro da escavação e é a sua sucção, através de uma bomba de aspiração, que permite retirar os produtos da escavação que estão misturados com a lama que, com o auxílio de uma outra bomba centrífuga especial, impulsiona a mistura contaminada até à central de recuperação.

4.2.3.4. Medição da verticalidade

Na hidrofresa existe um dispositivo fornecido pela empresa BAUER que permite ler a verticalidade do troço escavado. A verificação da verticalidade é fundamental por questões técnicas e também para respeitar as normas de qualidade impostas pelo cliente. Todas as empresas que realizam paredes moldadas no projeto do *Grand Paris*, não podem apresentar desvios de verticalidade superiores a 0,5% por metro (ou seja, 5 mm/metro de escavação) e na totalidade do troço o desvio não pode exceder os 20 cm a partir do eixo vertical.

A leitura da verticalidade pode ser realizada no decorrer da escavação, para o operador ter noção se está dentro dos limites impostos. Contudo, esta leitura tem erros associados, devido à vibração da máquina; assim, no final de cada trecho executado deve ser realizada uma leitura sem perturbações, que é registada numa *pendrive* e é exportada para o *software* de leitura que irá realizar os gráficos da verticalidade em X e Y (anexo 3). O gráfico do anexo 3 representa a verticalidade do painel 8 do troço da direita (P8 pd) entenda-se os desvios em X como para a direita – desvio positivo em direção ao painel 7 e desvios para a esquerda – desvio negativo como um desvio em direção ao troço central do painel 8; já os desvios em Y, quando negativos significam um desvio no sentido interior da obra e os desvios positivos seguem em direção ao lado exterior da obra.

O controlo da verticalidade é fundamental para a execução de paredes moldadas de boa qualidade. Os desvios de verticalidade em Y podem trazer dificuldade na altura de colocação das armaduras na vala, pois estas podem ficar mal posicionadas, isto é,

mais encostadas de um lado ou outro da parede e, no momento de escavação do lado interior das fundações, as armaduras podem ficar expostas (Fig. 22 a), sendo depois necessário executar trabalhos corretivos. Os desvios em Y produzem ainda um consumo excessivo de betão e, no final da obra, é necessário "raspar" o betão no caso da "boça" de betão ser produzida no lado interior da escavação (Fig. 22 b).



a) b)
Figura 22 Problemas devido a falta de verticalidade no painel, em relação a direcção em Y: a) Painéis com as armaduras expostas (indicado com os quadrados vermelhos); b) "boça" de betão (consumo excessivo de betão, indicado pelo círculo verde).

Quanto aos desvios registados em X, estes conduzem também ao posicionamento incorrecto das armaduras, mas quando os desvios vão para a extremidade do painel conduzem a problemas na altura de colocação da junta (Fig. 23), pois esta pode ficar embutida no painel seguinte. A má colocação da junta devido aos desvios da verticalidade do painel pode ainda facilitar a passagem do betão por trás da junta, levando a problemas na altura da descofragem da junta.



Figura 23 Junta colocada na vala com ligeira inclinação como se pode ver pela bolha do inclinómetro.

4.2.3.5. Limpeza da vala

A limpeza da vala é fundamental para a boa “adesão” do betão às armaduras e às paredes da vala. Se tal não acontecer podem ficar lacunas nas paredes moldadas, como exemplificado na Figura 24, facilitando a entrada de água, devido à má impermeabilização da parede.

Nesta obra utilizou-se a fresa hidráulica como meio de permuta das lamas bentoníticas, isto é, a substituição entre as lamas de escavação e as lamas utilizadas no processo de betonagem. Esta substituição ocorre do seguinte modo: coloca-se a hidrofresa no fundo da vala que vai sugando as lamas de escavação (lamas de maior densidade), à medida que através do topo da vala vão sendo colocadas as lamas para a betonagem (de menor densidade); esta diferença de densidades permite que não ocorra a mistura entre os dois tipos de lamas. Sabe-se que este processo está concluído quando se deu a substituição de todo o volume de lamas e quando os

testes apresentam os valores definidos para "Bentonite antes da betonagem" Tabela 1).

As lamas "aspiradas" são enviadas, através de condutas, para a central de tratamento, onde se retira o excesso de silte e areias. Este processo tem uma duração tanto maior quanto maior a dimensão da vala.



Figura 24 Lacuna no betão devido à falta de adesão do betão às armaduras, armadura aparente com vazio na parede moldada

4.2.3.6 Colocação de armadura e cofragem

As armaduras são feitas numa fábrica destinada para o efeito e são constituídas por elementos de 12 metros a 20 metros em ferro ou fibra verde. Estando a vala preenchida com as lamas bentoníticas adequadas (lamas de betonagem), colocam-se as armaduras no dia da betonagem com a grua Sarens (com flecha de 89 metros de comprimento). A altura mínima da flecha tem de corresponder à altura das armaduras, depois de estarem todas acopladas.

Antes do transporte das armaduras para a obra, estas são submetidas ao controle de qualidade, ainda na fábrica, de maneira a garantir que respeitam todas as dimensões e requisitos previstos no projeto. Caso seja necessário fazer algum ajuste, este é feito logo de seguida.

Inicia-se a preparação do painel, colocando a junta CWS equipada com o *waterstop* (Fig. 25 – círculo vermelho). Esta junta tem a função de separar os painéis e, assim que se começa a escavação para o painel seguinte, não se irá desgastar o betão do painel então betonado, devido à função de barreira protetora facultada pela junta.

De seguida, procede-se à colocação das armaduras: a grua eleva o primeiro módulo, através das alças de suspensão (Fig. 26 – círculo a verde que corresponde às alças de suspensão) e coloca-o ao nível do muro guia onde esta fica suspensa através das alças de posicionamento por via de barras (Fig. 27 – indicado a azul); a seguir, a grua eleva o 2º módulo, que é unido ao 1º módulo através dos *fishplate* (Fig. 27 – indicado a amarelo); após a acoplação dos dois primeiros módulos, desce-se o conjunto, ficando desta vez o 2º módulo ao nível do muro guia, aguardando o 3º módulo e, assim sucessivamente, até a as armaduras perfazerem a altura do painel, como prevista nos planos. Pequena precisão: no decorrer da descida de cada armadura colocam-se os espaçadores (Fig. 28 – indicado a laranja), que evitam que as armaduras se encostem à parede do painel e que fiquem depois visíveis como referido na Figura 22 a).



Figura 25 Junta CWS: Círculo a vermelho corresponde ao *waterstop* (filamento a preto em borracha).



Figura 26 Elevação da armadura pelas alças de suspensão (indicado a verde).



Figura 27 Círculo a amarelo corresponde ao encaixe entre o 1º módulo de armadura e o 2º módulo, através do fishplate. Círculo a azul que corresponde às alças de posicionamento que mantêm o 1º módulo de armadura suspenso para o encaixe do 2º módulo de armadura



Figura 28 Círculos a laranja representam os espaçadores colocados na armadura

4.2.3.7 Instalação da coluna de betão

Terminada a colocação das armaduras, procede-se à união dos vários tubos metálicos (Fig. 29) de modo a formar a coluna de betonagem e proceder-se à sua colocação no painel. As duas colunas de betonagem são dispostas, uma em cada extremidade do painel, como indicado na Figura 30.

O primeiro módulo da coluna termina em forma de V para evitar entupimentos; depois, em cada tubo é embutido o tubo seguinte, através de um filamento em ferro de união; após embutir todas os tubos, de modo a perfazer a profundidade total do painel, coloca-se no topo da última coluna, o funil que tem uma abertura ampla para facilitar a entrada e descida do betão, sem que ocorram perda, este funil fica seguro por um suporte como indicado na Figura 30 a vermelho.



Figura 29 Suporte em ferro para arrumamento dos tubos que constituem a coluna de betão

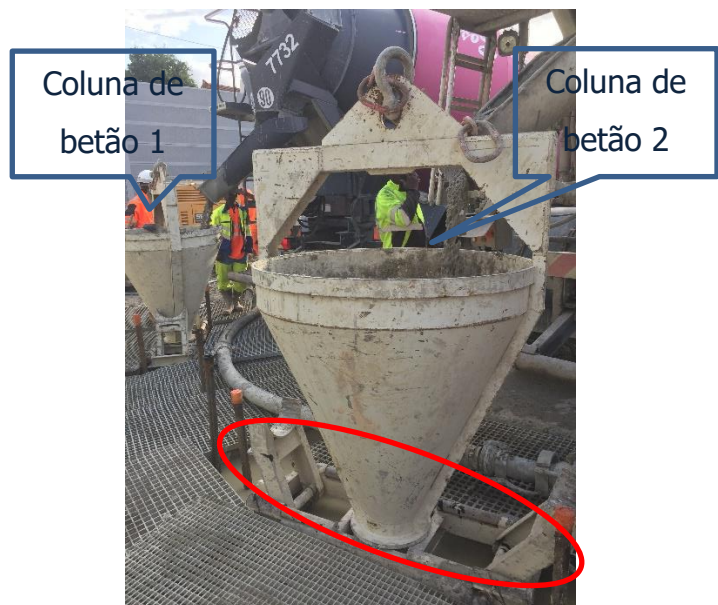


Figura 30 Posicionamento das duas colunas de betonagem, nas extremidades do painel, com o funil no topo seguro pelo suporte (círculo a vermelho)

4.2.3.8 Betonagem

O início da betonagem é dos momentos mais importantes da mesma, pois apesar de ser realizada a limpeza prévia do painel através da substituição da bentonite, durante a colocação das armaduras e colunas de betão, existem sempre pedaços de terreno que se desagregam e acabam por cair no fundo do painel e, para evitar que estes permaneçam no fundo do painel, os primeiros metros cúbicos de betão são lançados no painel de maneira praticamente ininterrupta e com grande velocidade de maneira a fazer ascender os detritos do fundo do painel segundo o esquema da Figura 31.

A betonagem ocorre de forma ascendente, até ao preenchimento total do painel. Durante a ascensão do betão, a bentonite que se encontra no painel é aspirada no seu topo e reenviada à central de tratamento de lamas.

No decorrer da betonagem são ainda realizados testes de controlo dos parâmetros de qualidade, como a medição da temperatura e coesão do betão através de um teste chamado "*Slump*", como exemplificado na Figura 32. O valor deste parâmetro tem de estar compreendido entre 18 cm e 23 cm de altura (Fig.32 c). Também

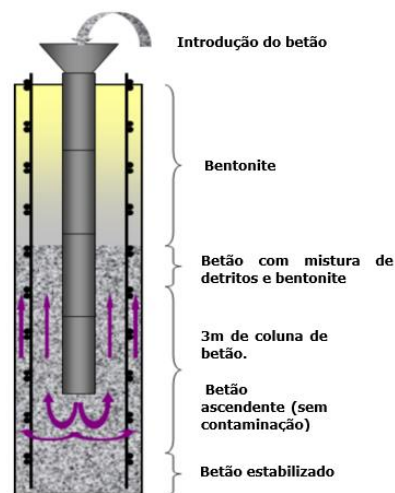


Figura 31 Processo de betonagem do painel que ocorre da base até ao topo como ilustrado no esquema (adaptado de Azzi, 2015)

são recolhidas amostras de betão que são colocadas em recipientes de cartão adaptados para o efeito (Fig. 32 b), que são enviados para o laboratório de controlo de qualidade.

Por fim, é realizada a curva de betonagem (representada no quarto anexo), onde as abcissas correspondem ao volume de betão colocado no painel e as ordenadas correspondem à profundidade onde se encontra o betão. Na mesma folha da curva de betonagem (anexo 4), são ainda registados: a hora de descida do betão até se evacuar o volume total de betão de cada camiãõ betoneira (volume de $7,5\text{m}^3/\text{camiãõ}$), os valores dos *slump's* realizados e o corte das colunas do betão. O corte das colunas de betão rege-se pela seguinte regra: tem que ficar sempre no mínimo 3 metros de coluna dentro do betão são, isto é, betão sem contaminação de detritos e bentonite remanescente; este corte de colunas tem de ser realizado, sempre que possível, para permitir a descida adequada do betão pela coluna e evitar entupimentos.

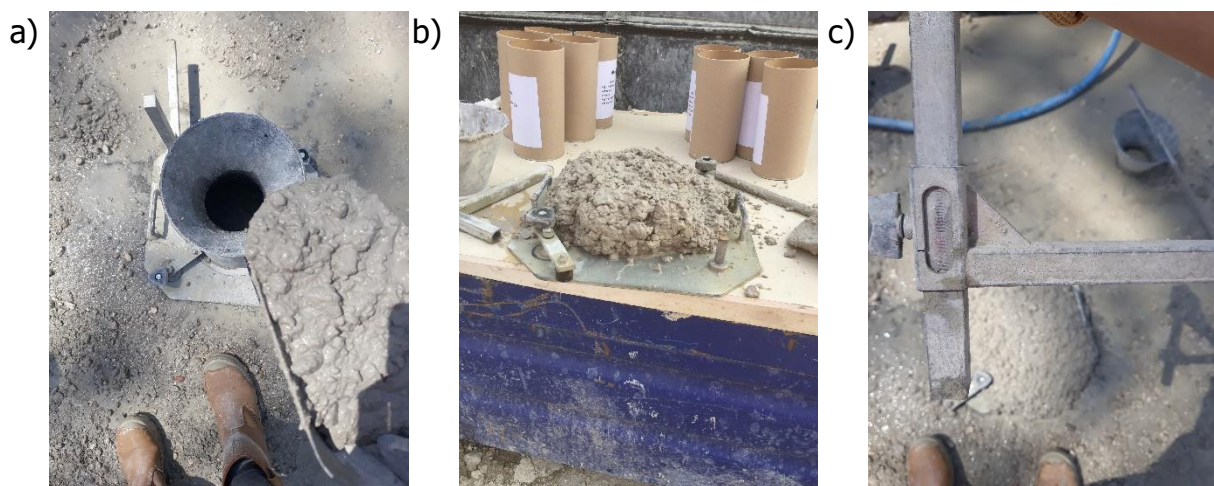


Figura 32 Ensaio do Slump: a) Realização do ensaio colocando o 5 pás de betão no cone; b) 9 provetes para testes de qualidade do betão a enviar ao laboratório; c) Medição do resultado do ensaio=21cm

4.2.3.8.1 Descofragem

Passadas 12 horas após o final da betonagem, inicia-se a escavação do troço do painel que contém a junta, ao lado do painel então betonado. A descofragem é realizada após a escavação de todo o troço do lado da junta, depois através das

“mãos” de descofragem que se soldam na *benne*, descofra-se o painel, tal como se exemplifica no esquema da Figura 33 a) e b). Depois da descofragem da junta, que consiste basicamente em “descolar” a junta do betão que está por trás desta, por fim, com o auxílio da grua, remove-se a junta do painel (Fig. 33c)).

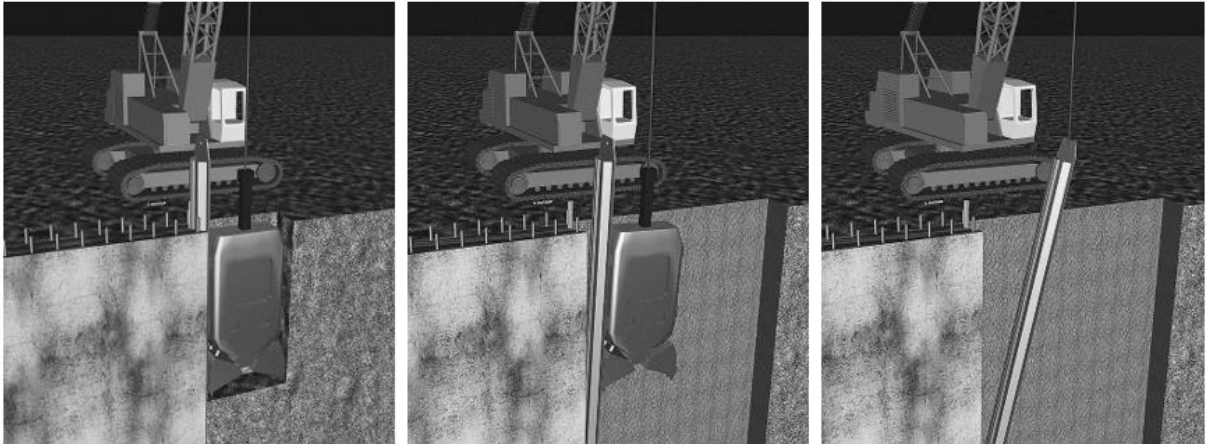


Figura 33 Descofragem: a) Primeira etapa – escavação do troço ao longo da junta; b) benne com as “mãos” de descofragem colocadas para descofrar; c) Remoção da junta através da grua. Fonte: Atlas Foundations

Capítulo V – Metodologia

5.1. Trabalhos de campo e amostragem

No decorrer da sondagem de reconhecimento do terreno com recuperação de tarolos de sondagem (Fig. 34 b), com a localização expressa na Figura 10 c), foi possível a recolha de 4 amostras a diferentes profundidades com a máquina de sondagens à rotação com recolha de testemunho (Fig. 34 a). Assim, a primeira amostra, com a nomenclatura de A1, situa-se entre os 9,6 metros e 9,7 metros de profundidade, correspondente ao início da formação das Margas de Argenteuil. A segunda amostra, com o nome de A2, situa-se entre os 18,8 metros e 19 metros de profundidade, estando inserida no final da formação das Margas de Argenteuil. A terceira amostra, colhida entre os 32,6 metros e 32,7 metros profundidade, está inserida no nível intermédio dos Calcários de Champigny; devido a esta amostra apanhar dois horizontes diferentes, deu-se o nome de A3 para a amostra entre os 32,6 metros e 32,65 metros e A4 para amostra entre os 32,65 metros e 32,7 metros.

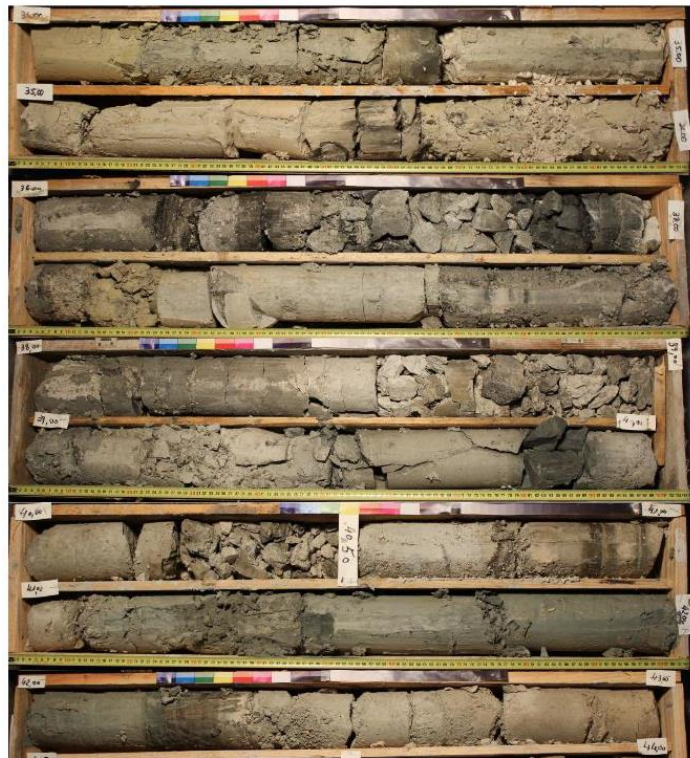


Figura 34 a) Perfuradora que efectuou a carotagem; b) caixa com os testemunhos da sondagem realizada.

5.2. Ensaios expeditos

5.2.1. Testes táctil e visual

Os testes realizados consistiram em estudar a amostra quanto ao seu aspeto visual, isto é, textura e cor. O estudo das amostras limitou-se a verificar a resistência que estas ofereciam ao serem desagregadas, quando colocadas nos tabuleiros antes de irem para a estufa a secar a 45°C; depois de secas, repetia-se a verificação, se as amostras ofereciam elevada resistência quando desterradas com o martelo e posteriormente com o pilão.

5.3. Ensaios de laboratório

Depois de realizados os ensaios expeditos, procedeu-se à execução dos ensaios de laboratório, que têm como objetivo caracterizar as amostras em termos das suas propriedades químicas e físicas. Iniciou-se os ensaios pela análise granulométrica, para se poder classificar o solo quanto à distribuição da dimensão dos grãos que

constituem as amostras. Depois, procedeu-se ao estudo do grau de consistência de cada amostra, para se poder classificar as amostras para fins rodoviários e de engenharia, e também se perceber a possível resposta do material quando sujeito a tensões e deformações.

Realizaram-se os ensaios para determinação da densidade e da expansibilidade dos solos, de modo a obter informações sobre a respetiva relação com a composição textural e mineralógica das partículas, constituintes do solo. Estes ensaios foram corroborados com a Fluorescência de Raios-X e a Difração Raio-X, que identificam detalhadamente a composição mineralógica em termos qualitativos e quantitativos de cada amostra.

5.3.1. Granulometria por peneiração húmida

Para a realização da análise granulométrica por peneiração húmida, seguiu-se a norma E 239 (LNEC, 1970). Este ensaio tem como objetivo determinar quantitativamente a distribuição por tamanhos das partículas passadas no peneiro de malha 4,75 mm (nº 4 de ASTM).

Devido ao facto de os solos em estudo serem maioritariamente compostos por grãos finos, foram utilizados apenas os seguintes crivos:

- Nº 4 (malha de abertura 4,75 mm)
- Nº 10 (malha de abertura 2,00 mm)
- Nº 20 (malha de abertura 0,840 mm)
- Nº 40 (malha de abertura 0,425 mm)
- Nº 60 (malha de abertura 0,250 mm)
- Nº 140 (malha de abertura 0,105 mm)
- Nº 200 (malha de abertura 0,075 mm)

Selecionou-se cerca de 50 g de amostra representativa do respetivo solo já previamente desagregado. Montou-se a coluna de crivos dentro do lavatório com

acesso a água e, no fundo da coluna, colocou-se um escoador (Fig. 35 a), pois não se pretende recuperar a amostra passada no peneiro nº 200, uma vez que esta fração fina foi submetida a análise granulométrica, utilizando um Sedimentómetro de Raios X.



Figura 35 Realização do ensaio de granulometria por via húmida: a) Empilhamento dos crivos da maior malha (crivo 7) até ao crivo de menor malha (crivo 1) com o fundo e o escoador de sedimento; b) amostras depois de secas obtidas do ensaio.

Graças à agitação manual dos crivos e à passagem da água pelos mesmos, este processo de lavagem, permite a retenção das partículas de solo representativas de cada classe granulométrica no respetivo crivo, pelo que se recuperou o solo retido em cada peneiro e colocou-se num recipiente devidamente identificado na estufa a 105°C até apresentarem peso constante (Fig. 35 b). Depois de secas, pesou-se a fração retida em cada peneiro e pôde-se realizar um gráfico de análise granulométrica em que nas abcissas (escala logarítmica) são representados os diâmetros equivalentes das partículas com a respetiva malha dos peneiros, e nas ordenadas (em escala decimal) são representadas as percentagens acumuladas de material que passa no respetivo peneiro, relativas à massa total do provete. A união dos vários pontos representados neste gráfico constitui a curva granulométrica da amostra de solo analisada.

5.3.2. Limites de consistência (ou de Atterberg)

Os limites de consistência têm por objetivo avaliar as características de plasticidade de um solo fino, que estão diretamente relacionadas com o teor em água desse solo. Segundo a norma NP-143 (LNEC, 1969), a determinação do limite de liquidez e de plasticidade é aplicável somente a solos com cerca de 30%, ou mais, em massa, de partículas de dimensão inferior a 0,05 mm. Segundo esta norma, o limite de liquidez entende-se como o teor em água correspondente a 25 pancadas na concha de Casagrande; o limite de plasticidade é o teor em água abaixo do qual não é possível moldar o solo, ou seja torna-se impossível moldar cilindros com cerca de 3 mm de diâmetro por rolagem entre a palma da mão e uma placa de vidro.

5.3.2.1. Limite de liquidez

O trabalho laboratorial desenvolvido visou quantificar experimentalmente os limites de liquidez (w_L) do solo fino, utilizando para tal amostras perturbadas representativas desse solo.

Iniciou-se o ensaio selecionando da amostra total, 500 g de amostra, que foi depois desagregada recorrendo a um almofariz e pilão de borracha. A amostra previamente selecionada passou no peneiro de malha quadrada de 425 μm (peneiro 40 da ASTM), e desta tomam-se 100 g de amostra para este ensaio, e mais 20 g para o ensaio do limite de plasticidade, rejeitando o material que ficou retido no peneiro. Colocou-se aquela amostra num recipiente e foi-se adicionando gradualmente água destilada e envolvendo com uma espátula de maneira a obter-se uma mistura homogénea (Fig. 36 a). Depois de preparadas as 4 amostras colocou-se uma membrana de parafilme, de maneira a cobrir o recipiente e evitar perdas de humidade; as amostras ficaram a repousar 24 horas.

Decorrido o tempo necessário que as partículas de solo necessitam para absorver a água iniciou-se então o ensaio. Verificou-se se a concha de Casagrande estava bem calibrada e só então é que se colocou a primeira porção de amostra na concha de maneira a obter uma camada não muito comprimida e bem nivelada, com cerca de 1 cm de espessura, na sua parte central (Fig. 36 b). Com o riscador na mão, realizou-se um sulco exatamente a meio do provete (Fig. 36 c) e, acionou-se em seguida a manivela, até que as duas porções do provete se uniram ao longo de 1 cm. Para que a união das duas porções do provete seja válida para este ensaio, o número de pancadas necessário tem de estar compreendido entre as 10 e as 40 pancadas, sendo que dois dos provetes têm que estar abaixo das 25 pancadas e os outros dois provetes acima desse valor. Por fim, anota-se o número de pancadas obtido para essa união e, desse mesmo provete retira-se uma amostra de cerca de 10 g da zona onde ocorreu a união ao longo do sulco que depois se pesa. Depois de realizar o mesmo procedimento para os 4 provetes das 4 amostras, colocaram-se as mesmas na estufa a 105°C (Fig. 36 d), que após secas foram pesadas, e registando-se o peso seco e, por fim calculou-se o respetivo teor em água das amostras.

O w_L é obtido através de um gráfico que relaciona o número de pancadas com o teor em água correspondente, de cada provete. O gráfico irá conter esta relação para os 4 provetes ensaiados, sendo que as abcissas representam o número de pancadas em escala logarítmica e, as ordenadas o teor em água em escala aritmética. Depois é traçada uma reta entre os 4 pontos e, a leitura do teor em água da amostra obtida na reta, para o ponto correspondente a 25 pancadas, é que corresponde ao limite de liquidez do solo.

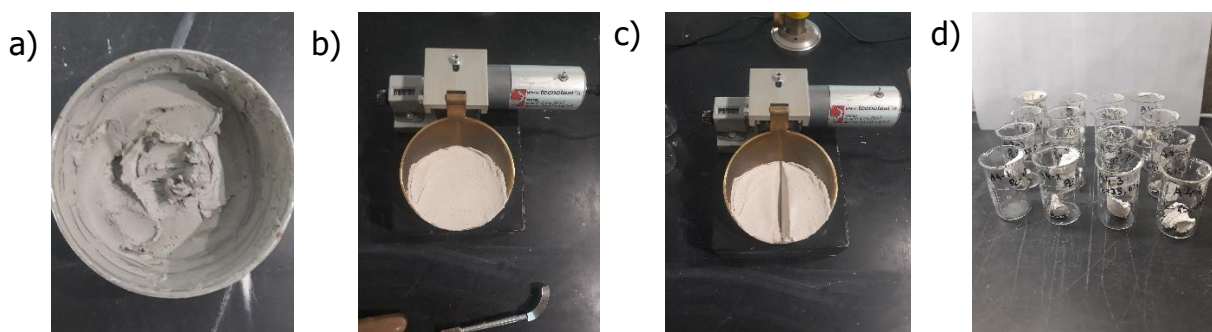


Figura 36 a) amostra com o teor de água ideal para realizar o ensaio; b) colocação da amostra na concha de Casagrande; c) amostra com o sulco e pronta a ser ensaiada; d) amostras depois de secas na estufa.

5.3.2.2. Limite de plasticidade

O trabalho laboratorial desenvolvido visa quantificar experimentalmente o limite de plasticidade (w_p) do solo fino, utilizando para tal, amostras perturbadas representativas desse solo.

Utilizou-se a mesma mistura homogénea, de solo e água destilada, que se utilizou na realização dos ensaios para determinação dos limites de liquidez (Fig. 37 a), pois a preparação é exatamente a mesma, mas com um grau de humidade inferior. A partir daquela mistura, foram preparados 4 provetes em forma de esfera. As 4 esferas com diâmetros sensivelmente iguais, foram colocadas numa placa de vidro previamente limpa (Fig. 37 b) e começou-se a rolar cada esfera entre a placa de vidro e a palma da mão, com a pressão adequada para obter um filamento cilíndrico. Este procedimento foi realizado as vezes necessárias até se obter um filamento de 3 mm de espessura, e cerca de 10 cm de comprimento, onde ocorreu a rotura devido à secagem do provete (Fig. 37 c).

Esta operação foi repetida para os 4 provetes das 4 amostras. Cada vez que se obteve o filamento nas condições acima indicadas, pesou-se o mesmo dentro de um recipiente de vidro e colocou-se na estufa a 105°C. Depois de secos, os provetes foram pesados e registado o seu peso seco, permitindo calcular o teor em água dos mesmos.

O valor do Limite de Plasticidade para cada amostra, corresponde à média obtida para os 4 valores do teor em água determinados para cada amostra.

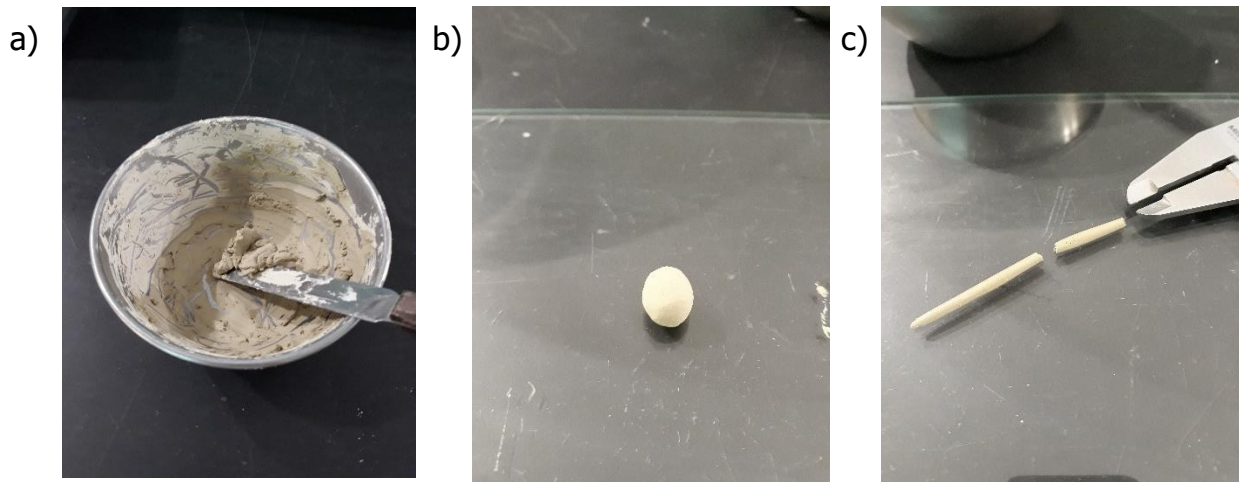


Figura 37 a) amostra pronta a ser ensaiada; b) amostra em forma de esfera; c) filamento depois da rotura.

Considera-se a fórmula 4.1 para calcular o limite de plasticidade de cada amostra:

$$w_P = \frac{w_A + w_B + w_C + w_C}{4} \quad (4.1)$$

5.3.2.2.1. Índice de plasticidade

O Índice de Plasticidade (IP) é obtido através da diferença entre o Limite de Liquidez e o Limite de Plasticidade (w_p), através da fórmula 4.2:

$$IP = w_L - w_p \quad (4.2)$$

Por fim, são estas três variáveis (IP, w_L e w_p) e os resultados das granulometrias, que permitem classificar os solos para fins rodoviários e de engenharia.

De acordo com Piedade (2018), a argila é tanto mais compressível quanto maior for o seu IP. O índice de plasticidade procura medir a plasticidade do solo e, fisicamente, representa a gama de teores em água para os quais um determinado solo tem comportamento plástico.

Classificação de Atterberg baseada no comportamento "plástico" dos solos (Folque 1991):

IP = 0 - Solo não plástico

1 < IP < 7 - Solo de plasticidade baixa

7 < IP < 15 - Solo de plasticidade média

IP > 15 - Solo de plasticidade elevada

5.3.3. Ensaio de expansibilidade

O ensaio para determinação da expansibilidade rege-se pela norma E 200 (LNEC, 1967), e tem como finalidade caracterizar o solo quanto à sua expansibilidade, quando submetido à absorção de água destilada por capilaridade.

O ensaio foi realizado para as 4 amostras sobre a fração de solo que passou no crivo de malha quadrada de 425 μm (peneiro 40 de malha ASTM); utilizou-se 100 g de cada amostra de solo e colocaram-se os respectivos recipientes tarados e identificados na estufa a 60°C durante 16 horas, após o qual se removeram os recipientes da estufa e se colocaram no exsiccador.

Preparou-se a montagem do ensaio, começando por verificar se os 4 defletómetros a utilizar estavam bem calibrados; depois montaram-se os expansímetros, começando por colocar na base perfurada, a placa porosa, de seguida o molde e por fim a alonga. Inicia-se a compactação da primeira amostra, colocando-a através de uma espátula no dispositivo montado, de maneira a obter a primeira camada que se compacta com o pilão de compactação exercendo 50 compressões, depois procede-se à colocação da segunda camada que deve ser sensivelmente equivalente à anterior e compacta-se do mesmo modo (Fig. 38 a). A porção de solo então colocada deve passar ligeiramente o bordo do molde, removendo-se posteriormente o excesso com a mesma espátula. Depois de colocada a placa de perspex, colocou-se o dispositivo no recipiente e montou-se o defletómetro, apoiando a haste exatamente na saliência da placa de perspex e tomou-se nota do primeiro valor indicado pelo defletómetro, que corresponde ao l_0 . Enche-se o recipiente de água destilada até à base do expansímetro, tendo o cuidado de não ultrapassar o seu nível superior, de

forma a garantir que toda a água que chega ao provete provem da placa porosa assente na base perfurada, e inicia-se a contagem do tempo com um cronómetro (Fig. 38 b), tomando nota dos valores indicados no defletómetro, ao longo do tempo decorrido. Por fim, desmontam-se os vários expansímetros e coloca-se cada amostra ensaiada num recipiente como exemplificado na Figura 38 c).

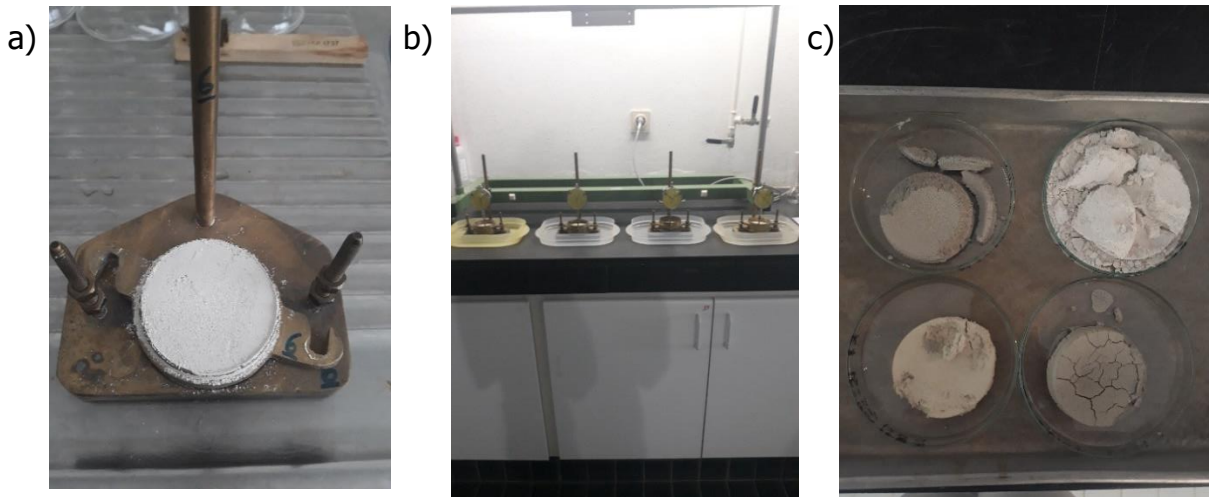


Figura 38 Ensaio de expansibilidade: a) Amostra colocada no expansímetro para ; b) Execução do ensaio; c) Amostras depois de ensaiadas.

O equipamento usado para avaliar a variação do volume do provete é um defletómetro (Fig 38 a) e a expansibilidade é obtida em percentagem através dos valores de expansão da amostra, pela equação 4.3).

$$S = \frac{\Delta h}{h_o} \times 100 \quad (4.3)$$

Onde Δh é a variação de altura do provete; h_o é a altura inicial que corresponde a 15mm.

Sabendo que a expansibilidade da amostra está diretamente relacionada com a quantidade de água absorvida pela amostra, utiliza-se a equação 4.4 para obter o teor em água (w) da amostra.

$$w = \frac{m_w}{m_s} \times 100 \quad (4.4)$$

Onde m_w é a massa de solo com a água absorvida após o fim do ensaio; m_s é a massa depois de seco na estufa.

5.3.4. Ensaio de densidade das partículas

O ensaio para determinação da densidade das partículas rege-se pela norma NP-83 (LENC, 1965) e tem como objetivo a determinação da densidade das partículas das 4 amostras, sendo este parâmetro determinado para os solos que passam no peneiro nº 4 ASTM (com uma malha de abertura de 4,75 mm).

Começou-se por selecionar 3 picnómetros por amostra, que se identificaram e pesaram com água destilada até ao traço de referência (m_3); os mesmos foram depois de despejada a água, colocados a secar na estufa. Depois de secos, adicionou-se aproximadamente 25 g de solo em cada picnómetro e meteu-se a secar na estufa a 105°C. Devido à existência de pouco solo para a amostra A4, preparou-se apenas 1 picnómetro para esta.

Depois de se verificar que a massa dos picnómetros estava constante, retirou-se da estufa e colocou-se no exsiccador com sílica-gel anidra e esperou-se até ao arrefecimento dos mesmos, depois pesa-se cada picnómetro e calculou-se a massa do provete seco (m_4) e pode-se então adicionar água destilada até 2/3 do traço de referência sem adição de ar, deixou-se repousar durante 12 horas (Fig. 39 a).

Passadas as 12 horas, colocaram-se os picnómetros sobre uma placa de aquecimento até atingir o ponto de ebulição, e deixa-se a ferver durante 10 min. (Fig. 39 b); no decorrer deste processo deve-se agitar lentamente os picnómetros de maneira a evitar perdas de amostra e simultaneamente promover a libertação de bolhas de ar. Deixou-se arrefecer os picnómetros até atingir a temperatura ambiente, preencheram-te até ao traço dos 100 ml com água destilada, e pesaram-se de novo (m_5). No final, mede-se a temperatura ambiente, colocando um termómetro dentro do picnómetro e registando seu valor, depois de estabilizar (Fig. 39 c). A densidade das partículas é obtida através da fórmula 4.5:

$$d = \frac{m_4}{m_3 - (m_5 - m_4)} \times k \quad (4.5)$$

Onde o fator k corresponde a 0,999 para a temperatura ambiente registada de 26°C no momento do ensaio, e que deve ser obtida a partir da Tabela de valores de k da Norma NP-83 (LNEC, 1965), consoante a temperatura ambiente.

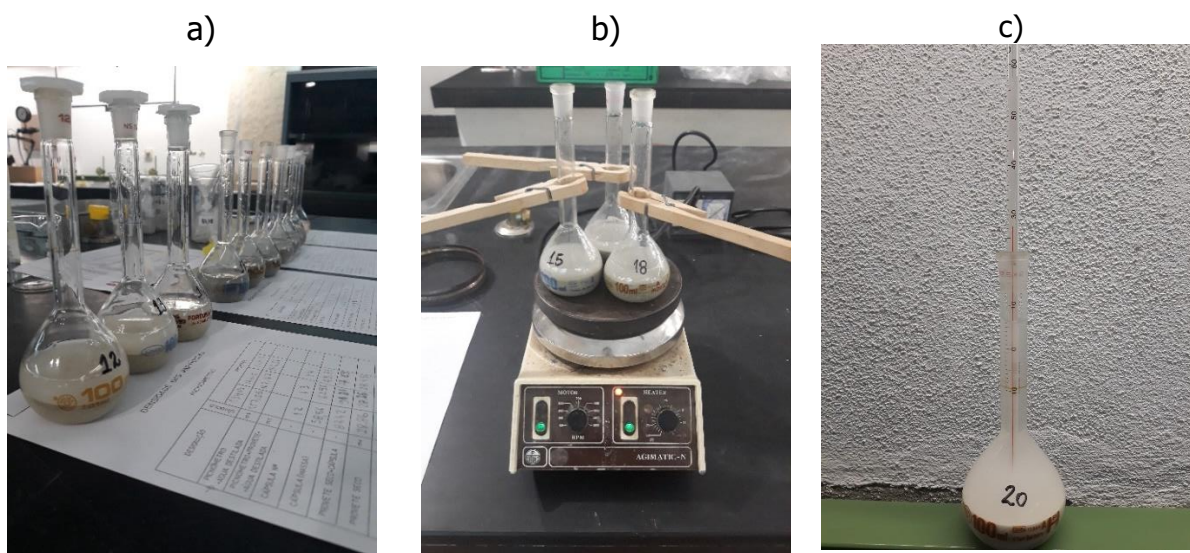


Figura 39 Ensaio de densidade de partículas: a) Amostras preparadas a repousar; b) Picnómetros em ebulição; c) Medição da temperatura da amostra.

5.3.5. Propriedades químicas e mineralógicas

Para se identificar as propriedades químicas e mineralógicas das 4 amostras foram realizados ensaios por espectrometria de fluorescência de raio-X (FRX) e difração de raio-X (DRX) sobre as 4 amostras, na fração inferior a 65µm. Estes ensaios foram realizados no laboratório HERCULES da Universidade de Évora. Estes ensaios têm como objetivo identificar os tipos de minerais de argila, composição química e as impurezas presentes nas amostras ensaiadas.

5.3.5.1. *Ensaio por espectrometria de fluorescência de raios-X*

Para este ensaio foram preparados 2 provetes por cada amostra, cuja preparação consistiu em selecionar e reduzir a dimensão do grão do material até 65 μ m.

De acordo com Tsoupra (2017) este método da fluorescência de raios-X permite efetuar uma análise qualitativa e quantitativa que se aplica na identificação de quase todos os elementos químicos. Consiste também na utilização de uma fonte de radiação X, com o objetivo de provocar a ionização dos níveis internos dos átomos constituintes da amostra, por efeito fotoelétrico. Na sua reorganização e respetivo regresso ao estado fundamental, estes átomos podem libertar o excesso de energia através da emissão de um fóton X, que tem energia igual à diferença da energia de ligação dos níveis entre os quais se deu a transição. Esta radiação é característica do elemento. A deteção e análise deste espectro permitem assim identificar e quantificar os elementos químicos constituintes da amostra.

5.3.5.2. *Ensaio por difração de raios-X*

Para a realização desta técnica reduziram-se as amostras em pó e de seguida colocaram-se em tubos de ensaio com água destilada para homogeneizar a amostra (Fig. 40 a); a seguir preparam-se 2 lâminas para cada amostra (Fig. 40 b), que depois de secas, o primeiro conjunto de 4 lâminas vão para a mufla a 600°C, com o intuito de eliminar as moléculas de água e assim reduzir a distância interplanar entre os átomos e, ao segundo conjunto de lâminas adiciona-se etilenoglicol, para causar o efeito contrário ao da “queima”, isto é, aumentar a distância interplanar entre átomos.

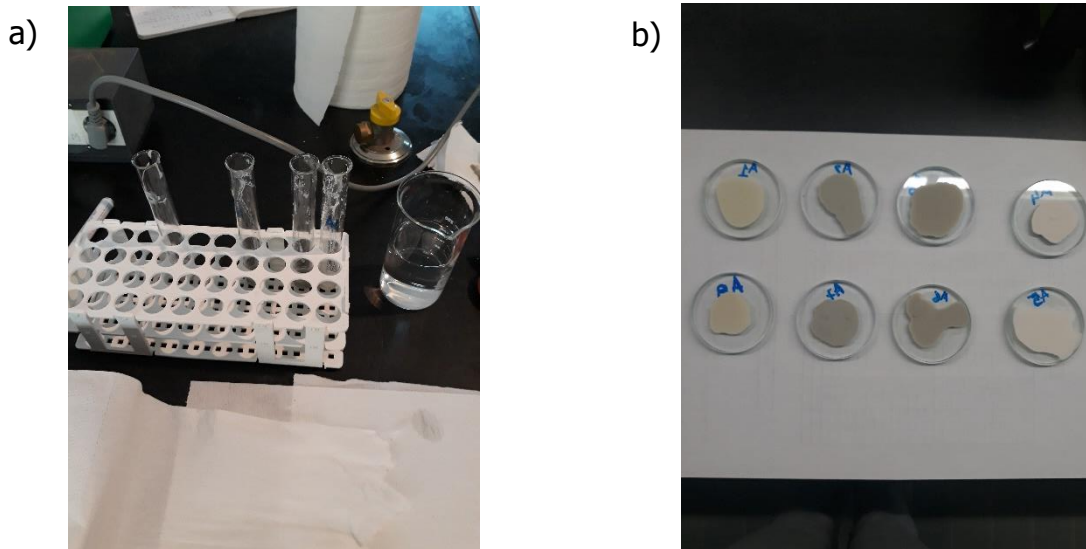


Figura 40 a) preparação das amostras para DRX; b) lâminas depois de secas.

Estando as lâminas prontas, colocaram-se no porta-amostras do difractor e foram submetidas à incidência de Raios-X, que interagiu com os átomos presentes na amostra; o resultado desta interação será traduzido num conjunto de “picos” de medida angular 2θ , segundo a lei de Bragg:

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad (4.6)$$

Onde n é a ordem dos raios-X difratados por um dado valor, λ é o comprimento de onda, d a distância interplanar entre átomos e θ o ângulo de incidência dos raios-X.



Figura 41 Esquema de um difractor de fonte linear. Fonte: Carvalho (2008).

A aplicação desta técnica irá produzir um conjunto de diferentes “picos” para cada amostra no respetivo difratograma, o que permitirá identificar os minerais presentes em cada amostra através da comparação com os valores tipo de cada mineral (Tsoupra, 2017).

Capítulo VI – Apresentação e discussão dos resultados

6.1 Ensaio expeditos

De seguida, descreve-se o aspeto geral das amostras com base em ensaios expeditos tácteis e visuais, realizados no laboratório da Universidade de Évora.

Amostra A1: margam de aspeto argiloso, de cor essencialmente castanha e com passagens de cor cinzenta, como se pode ver na Figura 42. Quando moldada com a mão apresenta-se também bastante plástica. No momento da desagregação da amostra depois de seca na estufa a 45°C, não apresentou muita resistência ao desagregar.

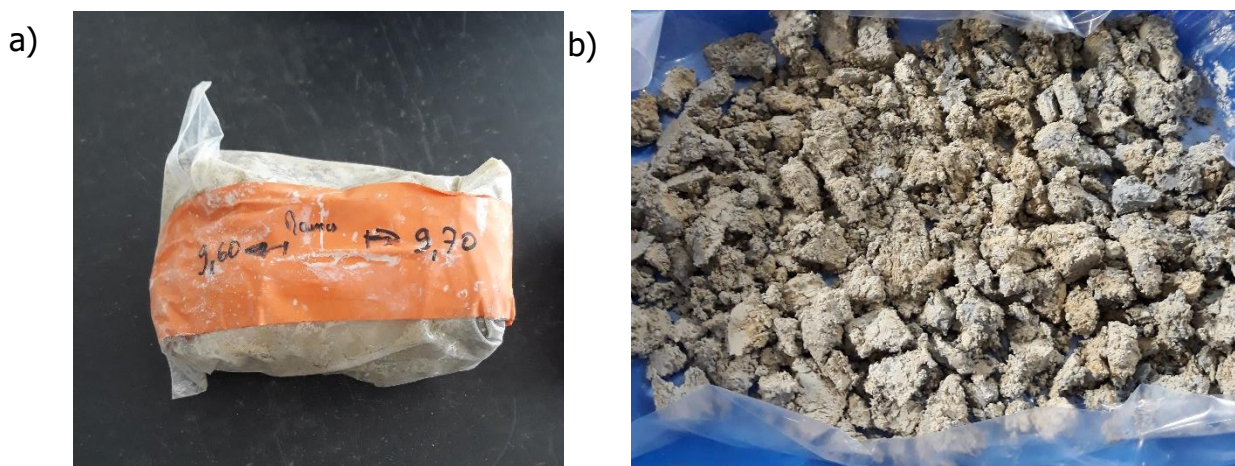


Figura 42 Amostra A1: a) amostra no saco; b) amostra desagregada

Amostra A2: margam de aspeto ainda mais argiloso e plástico que a amostra A1, em termos de tonalidade já tem uma componente acinzentada mais evidente, aparecendo também por vezes mais acastanhada (Fig. 43), molda-se muito facilmente com as mãos. Depois de seca foi bastante fácil de desagregar.

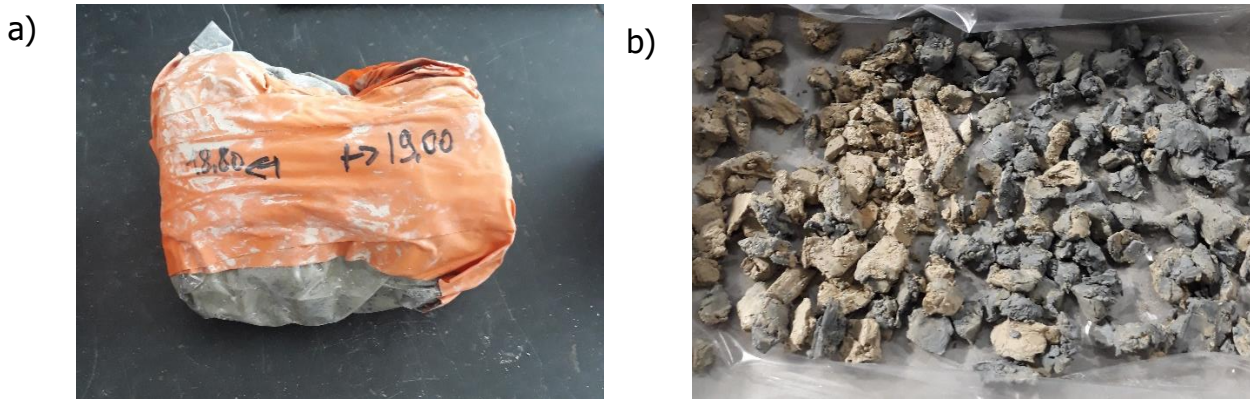


Figura 43 Amostra A2: a) amostra intacta no saco; b) amostra desagregada

Amostra A3: argila margosa de cor cinzenta com veios negros e ferruginosos (Fig. 44 b). Depois de seca foi bastante difícil de desagregar.

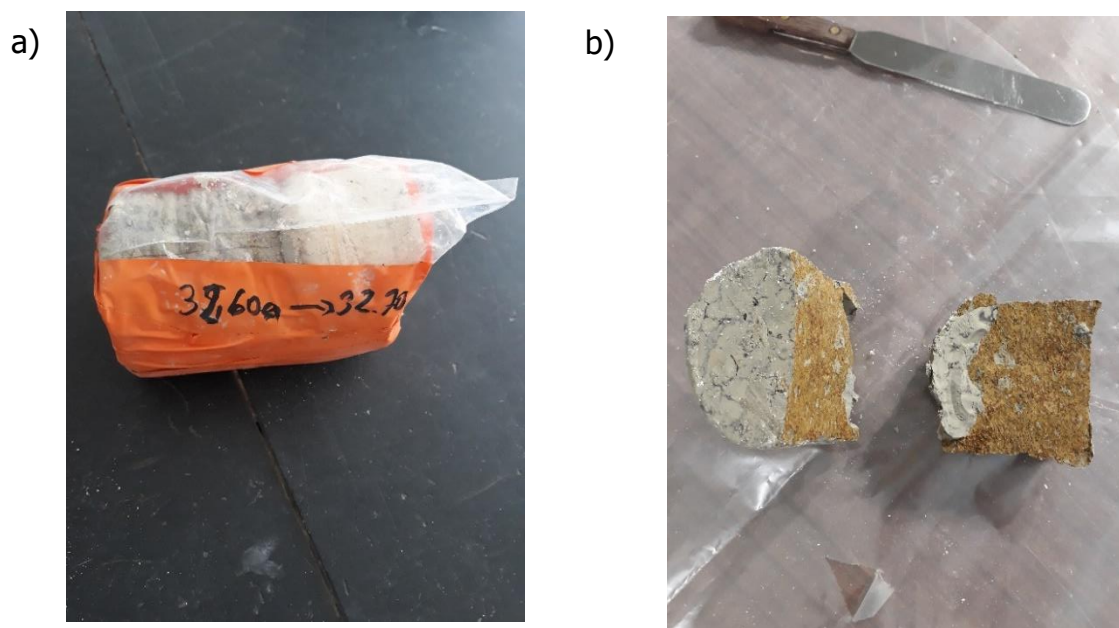


Figura 44 Amostras A3 e A4: a) Amostras A3 e A4 intactas dentro do saco; b) Amostra A3

Amostra A4 (Fig. 45 a): calcário branco de aspeto pouco plástico. Depois de seco foi muito facilmente reduzido a pó. Tátilmente não apresenta aspeto argiloso, contrariamente as amostras A1, A2 e A3, mas sim um aspeto mais siltoso.



Figura 45 Amostra A4 desagregada

6.2 Propriedades físicas

6.2.1. Granulometrias

No anexo 5 estão representadas as tabelas com os resultados obtidos das análises granulométricas que permitiram traçar os gráficos das quatro amostras. A amostra A1 é um solo fino do tipo silte argiloso, onde a percentagem de silte grosseiro é de cerca de 9%. No gráfico da figura 46 apresenta-se a curva granulométrica do solo A1.

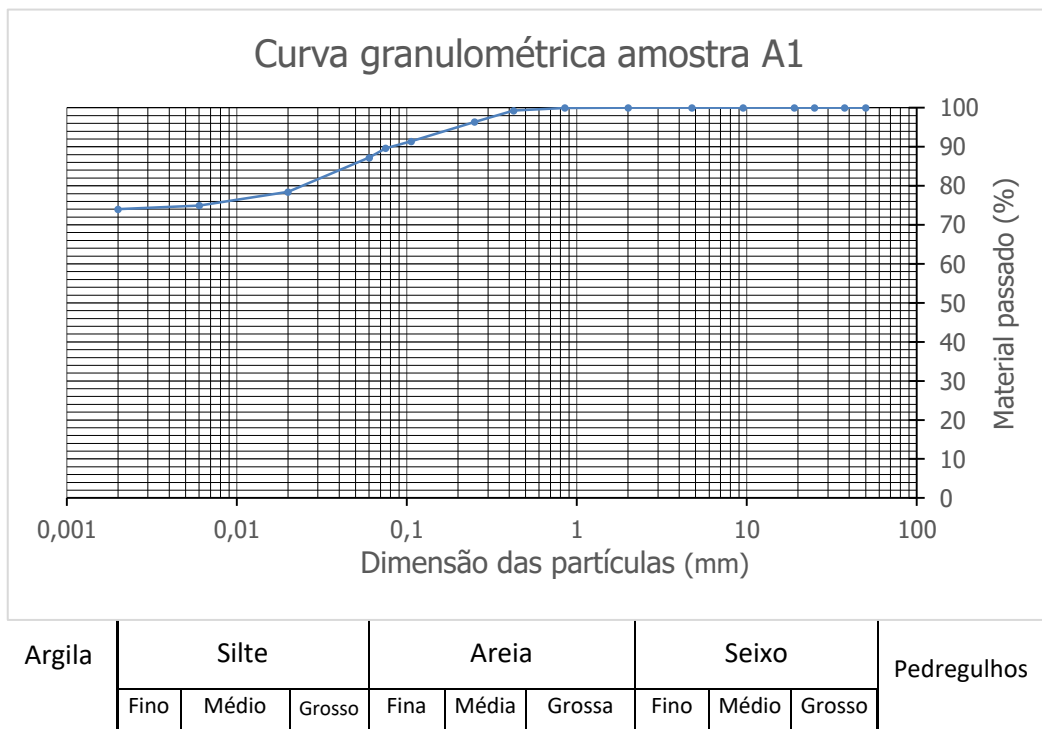


Figura 46 Curva granulométrica da amostra A1

A amostra A2 é um solo fino do tipo argiloso constituído, por mais de 70% de argila e cerca de 15% de areia fina. No gráfico da figura 47 apresenta-se a curva granulométrica do solo A2.

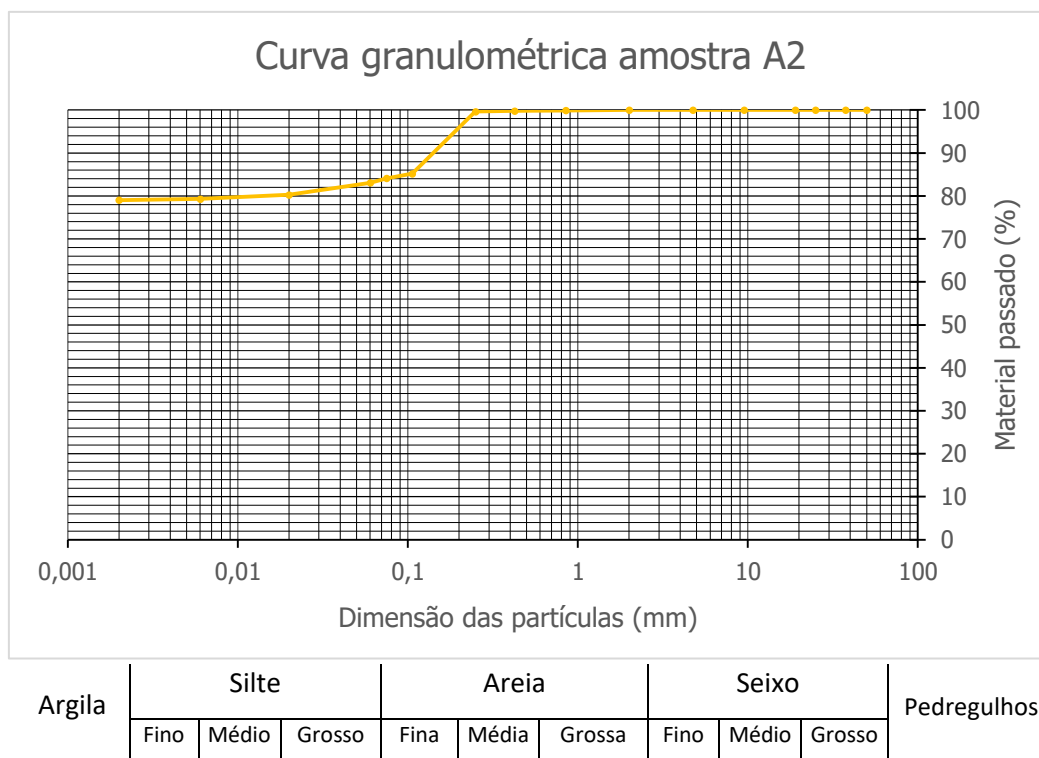


Figura 47 Curva granulométrica da amostra A2

A amostra A3 é um solo fino do tipo areia fina argilosa, onde a percentagem de areia fina a média predomina nesta amostra e também com forte presença de argila, cerca de 40%. No gráfico da figura 48 apresenta-se a curva granulométrica do solo A3.

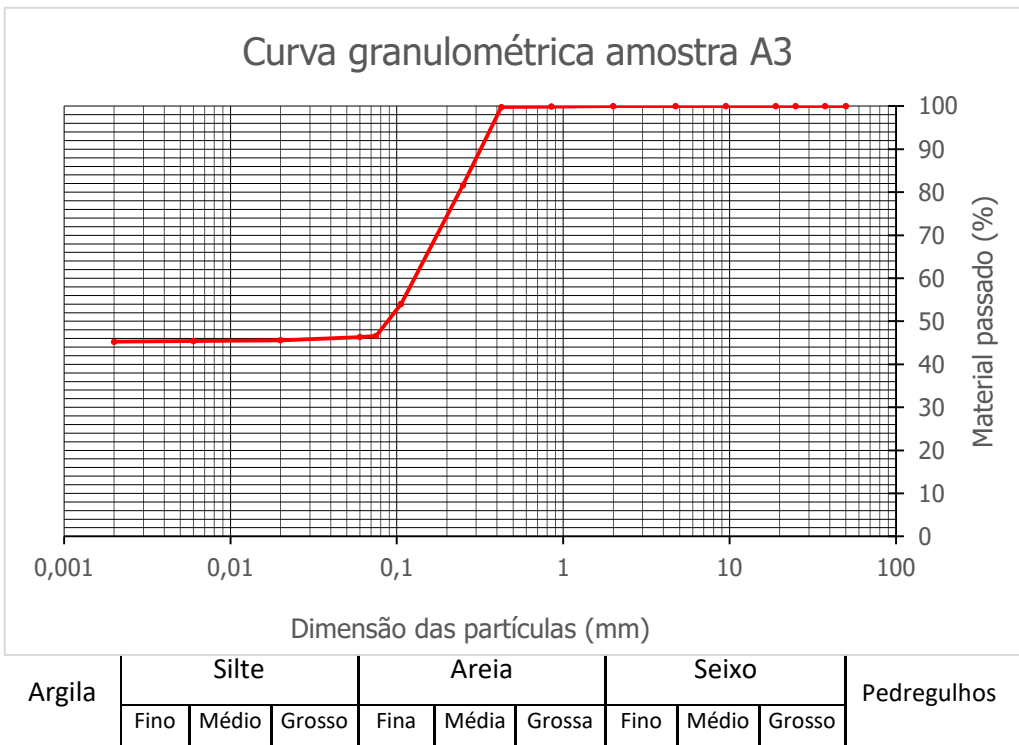


Figura 48 Curva granulométrica da amostra A3

A amostra A4 é um solo fino do tipo siltoso, onde a percentagem de silte é de cerca de 55%. No gráfico da figura 49 apresenta-se a curva granulométrica do solo A4.

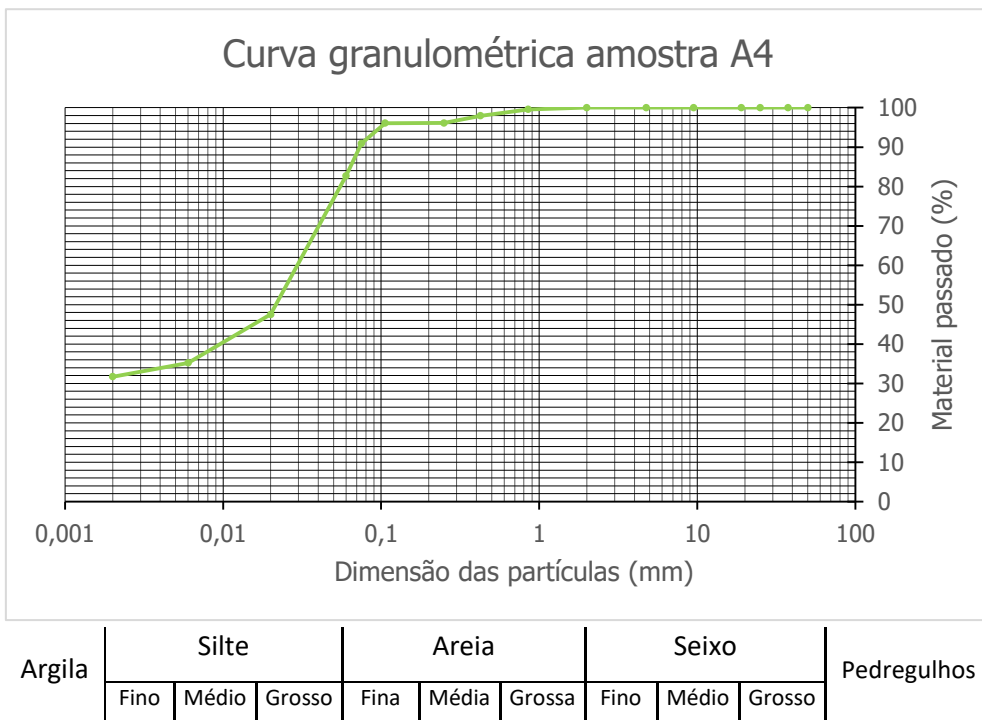


Figura 49 Curva granulométrica da amostra A4

6.2.2 Limites de consistência

Na tabela 2 apresenta-se os resultados obtidos nos ensaios laboratoriais dos limites de consistência, onde se pode verificar que os valores dos limites de plasticidade obtidos nas quatro amostras situam-se entre os 24% e os 39% e os valores dos limites de liquidez das quatro amostras estão acima dos 48%, o que é bastante alto, conferindo assim valores de índices de plasticidade de todos os solos acima dos 19%, o que lhes confere a todos uma plasticidade alta a elevada.

Tabela 2 Resultados dos ensaios de limites de consistência das quatro amostras

| Amostras | Limites de Consistência | | |
|----------|-------------------------|--------|--------|
| | wL (%) | wP (%) | IP (%) |
| A1 | 53 | 24 | 29 |
| A2 | 90 | 39 | 51 |
| A3 | 89 | 33 | 56 |
| A4 | 48 | 28 | 20 |

No anexo 6 estão representadas todos os boletins de ensaios correspondentes aos limites de consistência, nomeadamente, limite de liquidez e limite de plasticidade, e ainda os quatro gráficos para a determinação do limite liquidez obtidos através dos resultados dos ensaios realizados com a concha de Casagrande.

6.2.3 Expansibilidade e expansão das amostras

No gráfico da figura 50 apresenta-se a evolução da expansibilidade das quatro amostras ao longo do tempo, sendo a amostra A3 que apresenta maior capacidade de expansão e a amostra A4 a menor.

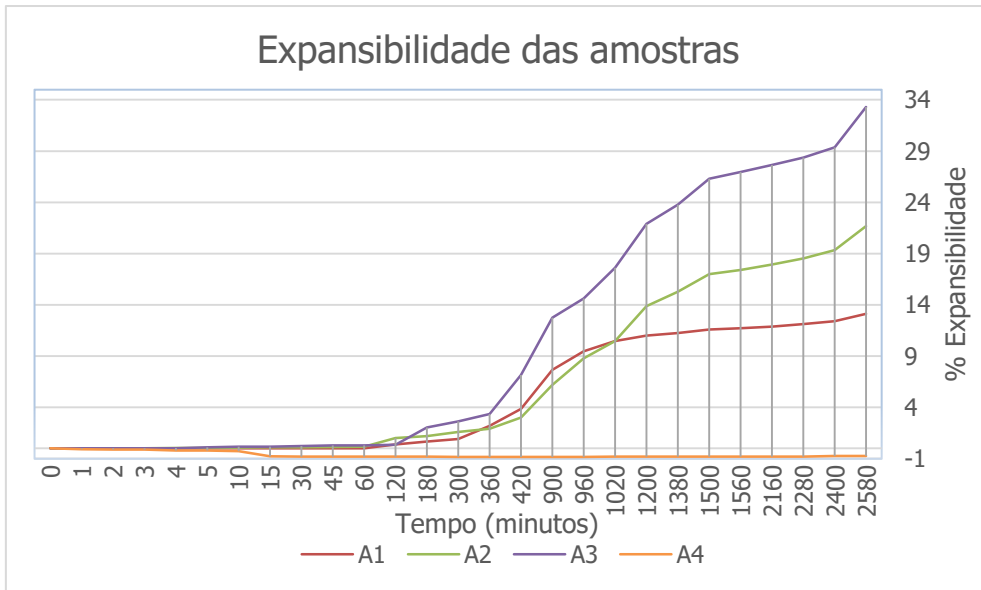


Figura 50 Gráfico com os resultados da expansibilidade das amostras A1, A2, A3 e A4 durante o período do ensaio

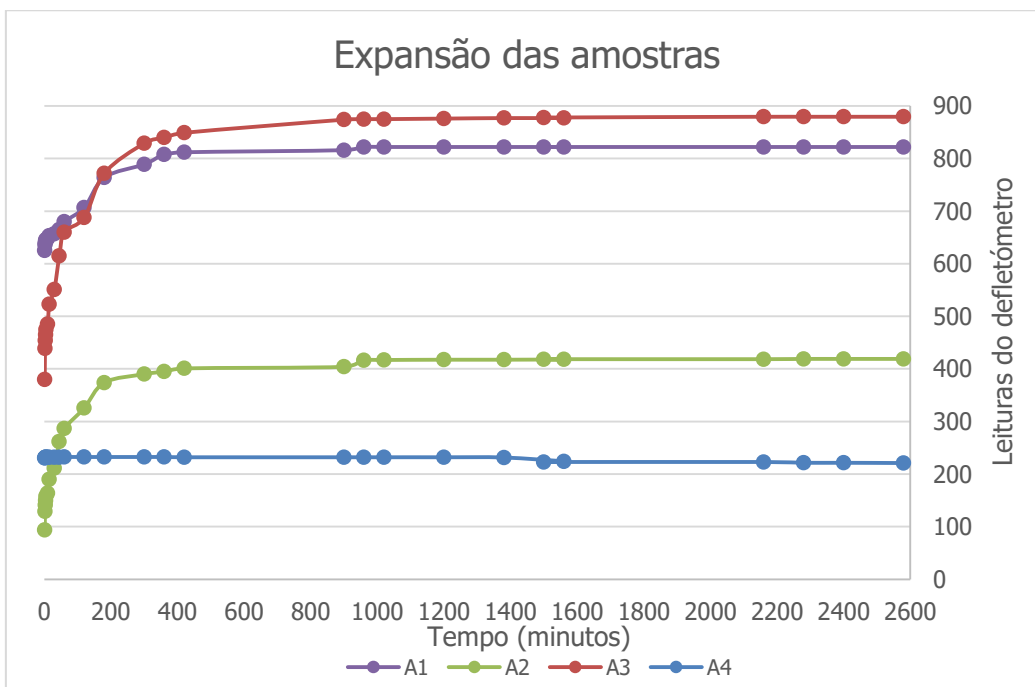


Figura 51 Gráfico com os resultados da expansão das amostras A1, A2, A3 e A4 ao longo do tempo

Quanto à expansão das amostras A1, A2 e A3 (Gráfico da figura 51) verifica-se uma expansão significativa nos primeiros 400 minutos do ensaio, estabilizando a partir dos 800 minutos; é também no início do ensaio que existe maior absorção de água por capilaridade destas amostras. As percentagens de expansibilidade dos solos A1, A2 e A3 atingem o pico no fim do ensaio (2580 minutos após o início do ensaio), o

que é natural pois foi quando as amostras absorveram o máximo de água possível por parte do material mais argiloso e atingiram a expansão máxima possível.

Através do cálculo de diferença de massa das amostras no fim do ensaio (peso da amostra mais peso da água absorvido por capilaridade) e a massa das amostras depois de secas em estufa, obtêm-se o teor em água para cada amostra.

Os maiores valores registados para a expansibilidade pertencem às amostras A2 e A3 (22% e 33%, respetivamente), que correspondem aos solos que absorveram mais água destilada por capilaridade durante o ensaio (37% e 40% de teor em água no final do ensaio, respetivamente), relativamente às amostras A1 e A4.

Por outro lado, estranha-se o valor negativo obtido para a expansibilidade da amostra A4, que ainda assim pode estar relacionado essencialmente com sua composição mineralógica, como será referido mais adiante.

Também não é de descartar a hipótese do valor muito baixo (negativo) para a expansibilidade, estar relacionado com o processo de introdução de água destilada por capilaridade dentro do provete de um solo, que não é expansivo, provocar o colapso de parte da estrutura desse solo, e conseqüentemente a sua subsidência levar a um andamento contrário no mostrador do defletómetro.

Todos os boletins de ensaio estão apresentados no anexo e é de salientar ainda que, na altura da execução do ensaio, não foi detectado nenhum problema no equipamento utilizado.

6.2.4 Determinação da densidade de partículas

Tabela 3 Resultados obtidos no ensaio para determinação da densidade de partículas da amostra A1

| Designação | Provetes da amostra A1 | | |
|---|------------------------|--------|--------|
| N° de Picnómetro | 12 | 13 | 14 |
| m3 = Picnómetro + água destilada (g) | 157,35 | 162,62 | 149,31 |
| m5 = Picnómetro + água destilada + provete (g) | 176,52 | 180,31 | 166,9 |
| m4 = Provete seco (g) | 28,86 | 28,25 | 28,43 |
| Temperatura do ensaio (°C) | 26 | 26 | 26 |
| Razão entre as densidades à temperatura do ensaio (k) | 0,999 | 0,999 | 0,999 |
| Densidade das partículas | 2,98 | 2,67 | 2,62 |
| Média das densidades | 2,76 | | |

Tabela 4 Resultados obtidos no ensaio para determinação da densidade de partículas da amostra A2

| Designação | Provetes da amostra A2 | | |
|---|------------------------|--------|--------|
| N° de Picnómetro | 15 | 17 | 18 |
| m3 = Picnómetro + água destilada (g) | 149,89 | 154,06 | 153,85 |
| m5 = Picnómetro + água destilada + provete (g) | 165,73 | 170 | 171,16 |
| m4 = Provete seco (g) | 25,3 | 25,57 | 25,53 |
| Temperatura do ensaio (°C) | 26 | 26 | 26 |
| Razão entre as densidades à temperatura do ensaio (k) | 0,999 | 0,999 | 0,999 |
| Densidade das partículas | 2,67 | 2,65 | 3,10 |
| Média das densidades | 2,81 | | |

Tabela 5 Resultados obtidos no ensaio para determinação da densidade de partículas da amostra A3

| Designação | Provetes da amostra A3 | |
|---|------------------------|--------|
| N° de Picnómetro | 43 | 45 |
| m3 = Picnómetro + água destilada (g) | 155,74 | 156,3 |
| m5 = Picnómetro + água destilada + provete (g) | 171,74 | 172,21 |
| m4 = Provete seco (g) | 25,5 | 25,51 |
| Temperatura do ensaio (°C) | 26 | 26 |
| Razão entre as densidades à temperatura do ensaio (k) | 0,999 | 0,999 |
| Densidade das partículas | 2,68 | 2,65 |
| Média das densidades | 2,67 | |

Tabela 6 Resultados obtidos no ensaio para determinação da densidade das partículas da amostra A4.

| Designação | Provete da amostra A4 |
|---|-----------------------|
| N° de Picnómetro | 20 |
| m3 = Picnómetro + água destilada (g) | 160,06 |
| m5 = Picnómetro + água destilada + provete (g) | 176,81 |
| m4 = Provete seco (g) | 25,11 |
| Temperatura do ensaio (°C) | 26 |
| Razão entre as densidades à temperatura do ensaio (k) | 0,999 |
| Densidade das partículas | 3,00 |
| Média das densidades | 3,00 |

As amostras A1, A2 e A3 (Tabelas 3, 4 e 5, respetivamente) apresentam densidades entre 2,67 e 2,81, o que pressupõe que estes solos são constituídos essencialmente por minerais mais leves, situando-se no grupo dos feldspatos (2,50 a 2,60), do quartzo (2,65) e dos minerais argilosos (2,20 – 2,60) (Piedade, 2018), já a amostra A4 apresenta (Tabela 6) uma densidade de 3, superior às amostras anteriores, logo pode concluir-se que esta amostra tem maior percentagem de minerais primários na sua composição, como se verá mais adiante.

6.2.5 Síntese dos resultados obtidos das propriedades físicas

Tabela 7 Síntese dos resultados obtidos nos ensaios laboratoriais.

| Amostras | Resultados obtidos nos Ensaiois | | | | | | | | | Classificação dos solos | |
|----------|---------------------------------|---------|---------|-------------------------|--------|--------|---------------------|------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------|
| | Granulometria (%) mm | | | Limites de Consistência | | | Expansibilidade (%) | Teor em água (%) | Densidade de partículas | Para fins de Engenharia | Para fins Rodoviários |
| | < 2,00 | < 0,425 | < 0,075 | wL (%) | wP (%) | IP (%) | | | | | |
| A1 | 100 | 99 | 89 | 53 | 24 | 29 | 13 | 27,83 | 2,76 | CH | A-7-6 (19) |
| A2 | 100 | 100 | 84 | 90 | 39 | 51 | 21 | 36,56 | 2,81 | CH | A-7-6 (20) |
| A3 | 100 | 100 | 46 | 89 | 33 | 56 | 33 | 39,30 | 2,67 | SC | A-7-6 (20) |
| A4 | 100 | 98 | 91 | 48 | 28 | 20 | -0,73 | 14,75 | 3,00 | ML | A-7-6 (14) |

A Tabela 7 apresenta em síntese os resultados obtidos em todas as amostras estudadas, quanto às propriedades físicas. Segundo a classificação dos solos do

Sistema Unificado da ASTM para Fins de Engenharia, as amostras A1 e A2 são argilas gordas (CH), a amostra A3 é uma areia argilosa (SC) e a amostra A4 um silte (ML).

De acordo com a classificação de solos para fins rodoviários A.A.S.H.T.O (American Association of State Highway and Transportation Officials), (LNEC E240, 1970), todas as amostras são solos argilosos, com comportamento regular a mau, devido a possíveis variações de volume quando sujeitas às cargas devido ao tráfego rodoviário. O índice de grupo está compreendido entre 14 e 20 (Tabela 2) o que significa que o material tem fraca capacidade de drenagem, compactação e capacidade de suporte sob o pavimento.

De acordo com Gomes Correia (1988), a norma ASTM D 2487-85 define os solos finos como tendo 50% ou mais do material passado no peneiro nº200, sendo os solos grossos 50% do material retido nesse mesmo peneiro. Assim, segundo os dados da granulometria as amostras A1, A2 e A4 estão inseridas na classe dos solos finos e a amostra A3 na classe dos solos grossos.

Os resultados obtidos nos ensaios dos limites de consistência permitem concluir, que segundo a classificação de Atterberg, devido ao IP ser superior a 15 para todas as amostras, todas elas são consideradas de elevada plasticidade. As amostras mais plásticas são a A2 e A3, com índices de plasticidade de 51 e 56 respetivamente e as amostras A1 e A4 menos plásticas que as anteriores com índices de plasticidade de 29 e 20 respetivamente

De acordo com Piedade (2018), quanto maior for a percentagem de finos, e maior a percentagem de argila, maior será a expansibilidade, o que é o caso das amostras A2 e A3, com valores de expansibilidade de 22 % e 33%, o que pressupõe, que estes solos tendem, a apresentar maior índice de plasticidade (51% e 56%, respetivamente). Nestas mesmas amostras, o limite de liquidez é também bastante elevado, significa que os solos tem elevada capacidade de absorção de água na sua estrutura. A amostra A1 apresenta menor expansibilidade o que se explica pelo facto de os finos existentes na sua composição possuírem uma plasticidade também menor (tabela 7), logo com menor capacidade de absorver água, comparativamente às amostras A2 e A3. A amostra A4 apresenta o valor de expansibilidade negativo -

0,73%, pois esta amostra ao invés de expandir, retraiu-se quando sujeita ao ensaio, isto pode ser explicado pela qualidade e quantidade dos minerais que a compõem, como veremos mais adiante.

6.3. Composição química e mineralógica

As 4 amostras de solos foram submetidas à análise química por espectrometria de fluorescência de raios-X (FRX), onde os resultados se apresentam de forma exaustiva no anexo 9. Os resultados expressos em percentagens dos elementos químicos maiores e em partes por milhão (ppm) dos elementos menores, constam na tabela 8.

Tabela 8 Resultados obtidos da espectrometria de fluorescência de raios-X.

| Formula química | Concentrações das amostras | | | |
|--------------------------------|----------------------------|---------|---------|---------|
| | A1 | A2 | A3 | A4 |
| CaO | 39,10% | 27,20% | 19,10% | 30,60% |
| SiO ₂ | 17,30% | 27,00% | 22,00% | 6,59% |
| Al ₂ O ₃ | 5,06% | 7,67% | 6,17% | 1,13% |
| Fe ₂ O ₃ | 2,03% | 2,88% | 2,34% | 0,57% |
| MgO | 1,74% | 2,53% | 13,20% | 18,80% |
| K ₂ O | 1,25% | 1,56% | 1,06% | 0,19% |
| Na ₂ O | 0,54% | 1,40% | 0,49% | 1,04% |
| P ₂ O ₅ | 0,31% | 0,23% | 0,17% | 0,28% |
| S | 0,22% | 0,81% | 0,74% | 0,17% |
| TiO ₂ | 0,16% | 0,24% | 0,21% | 730 ppm |
| Rb | 48 ppm | 81 ppm | 74 ppm | 20 ppm |
| Sr | 312 ppm | 367 ppm | 178 ppm | 157 ppm |
| Y | 9 ppm | 8 ppm | 5 ppm | 3 ppm |
| Zr | 45 ppm | 60 ppm | 54 ppm | 32 ppm |
| Nb | 8 ppm | 7 ppm | 6 ppm | 6 ppm |
| Ba | 718 ppm | 900 ppm | 901 ppm | 776 ppm |
| Th | 4 ppm | 1 ppm | 5 ppm | 6 ppm |

| | | | | |
|----|---------|---------|---------|---------|
| Cr | 550 ppm | 17 ppm | 19 ppm | 6 ppm |
| Co | 9 ppm | 16 ppm | 28 ppm | 35 ppm |
| Ni | 247 ppm | 16 ppm | 29 ppm | 11 ppm |
| Cu | 18 ppm | 28 ppm | 9 ppm | 35 ppm |
| Zn | 41 ppm | 50 ppm | 42 ppm | 46 ppm |
| Ga | 12 ppm | 14 ppm | 13 ppm | 8 ppm |
| As | 12 ppm | 13 ppm | 21 ppm | 9 ppm |
| Pb | 0 ppm | 10 ppm | -2 ppm | 9 ppm |
| Sn | -1 ppm | -11 ppm | 15 ppm | -11 ppm |
| V | 151 ppm | 135 ppm | 125 ppm | 154 ppm |
| Cs | 3 ppm | 5 ppm | 4 ppm | 1 ppm |
| La | 72 ppm | 14 ppm | 13 ppm | 65 ppm |
| Ta | 1 ppm | 1 ppm | 1 ppm | 0 ppm |
| Ce | 267 ppm | 83 ppm | 170 ppm | 160 ppm |
| U | 1 ppm | 2 ppm | 2 ppm | 1 ppm |
| Cl | 7 ppm | 13 ppm | 16 ppm | 2 ppm |
| Mn | 613 ppm | 446 ppm | 342 ppm | 318 ppm |

Pela análise da composição química das diversas amostras de solos, identificaram-se os seguintes compostos químicos maiores: óxido de cálcio (CaO), a sílica (SiO₂), óxido de alumínio (Al₂O₃), óxido de ferro (Fe₂O₃), óxido de manganês (MnO), óxido de magnésio (MgO), óxido de potássio (K₂O), óxido de sódio (Na₂O), óxido de fosforo (P₂O₅), enxofre (S) e o óxido de Titânio (TiO₂).

A amostra A1 é a amostra que contém maior quantidade de óxido de cálcio, apresentando também elevada quantidade de sílica e de óxido de alumínio.

A amostra A2 tem quantidades aproximadamente iguais quer de óxido de cálcio, quer de sílica, em torno dos 27%, tendo também uma quantidade significativa em óxido de alumínio.

A amostra A3 à semelhança da amostra A2, tem quantidades aproximadamente iguais de óxido de cálcio e sílica, contudo valores um pouco menores em torno dos

20%; apresenta uma quantidade bastante elevada de óxido de magnésio (13,2%) e por fim uma quantidade também significativa de óxido de alumínio.

É de salientar que as amostras A2 e A3 são as amostras com maior quantidade de óxido de alumínio (Al_2O_3) e de óxido de ferro (Fe_2O_3), isto deve-se ao facto de serem compostos mais importantes nas amostras de solos argilosos. São também estes dois solos que apresentam maiores valores para o Índice de Plasticidade (A2 - 52 e A3 - 57), relativamente aos valores de IP para os solos A1 - 30; A4 - 20 (Tabela 2).

A amostra A4 tem elevada composição de óxido de cálcio à semelhança da amostra A1, contudo apresenta uma quantidade elevada em óxido de magnésio (18,8%), à semelhança da amostra A3 (13,2%); a amostra A4 é também a que apresenta menor quantidade de sílica.

De seguida, pretende-se correlacionar as quantidades dos elementos químicos presentes nas amostras com os minerais nelas identificados. Os resultados obtidos na difração de raio-X, são apresentados em gráficos com "picos" de intensidade correspondentes aos minerais predominantes nas amostras.

No gráfico da Figura 52 está representada a amostra A1, onde predomina a presença de calcite e, com valores bastante menores, surgem a moscovite, quartzo e a vermiculite.

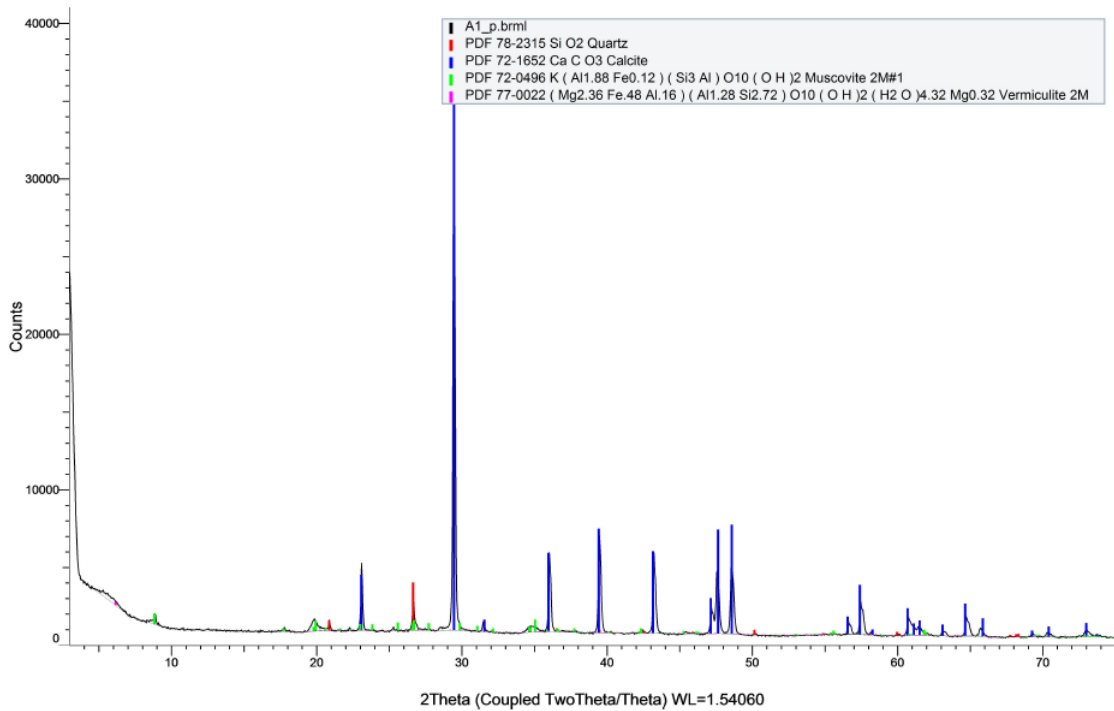


Figura 52 Gráfico da DRX da amostra A1

No gráfico da Figura 53, está representada a amostra A2, onde predomina a presença de calcite e com valores bastantes menores surgem o quartzo, moscovite e vermiculite.

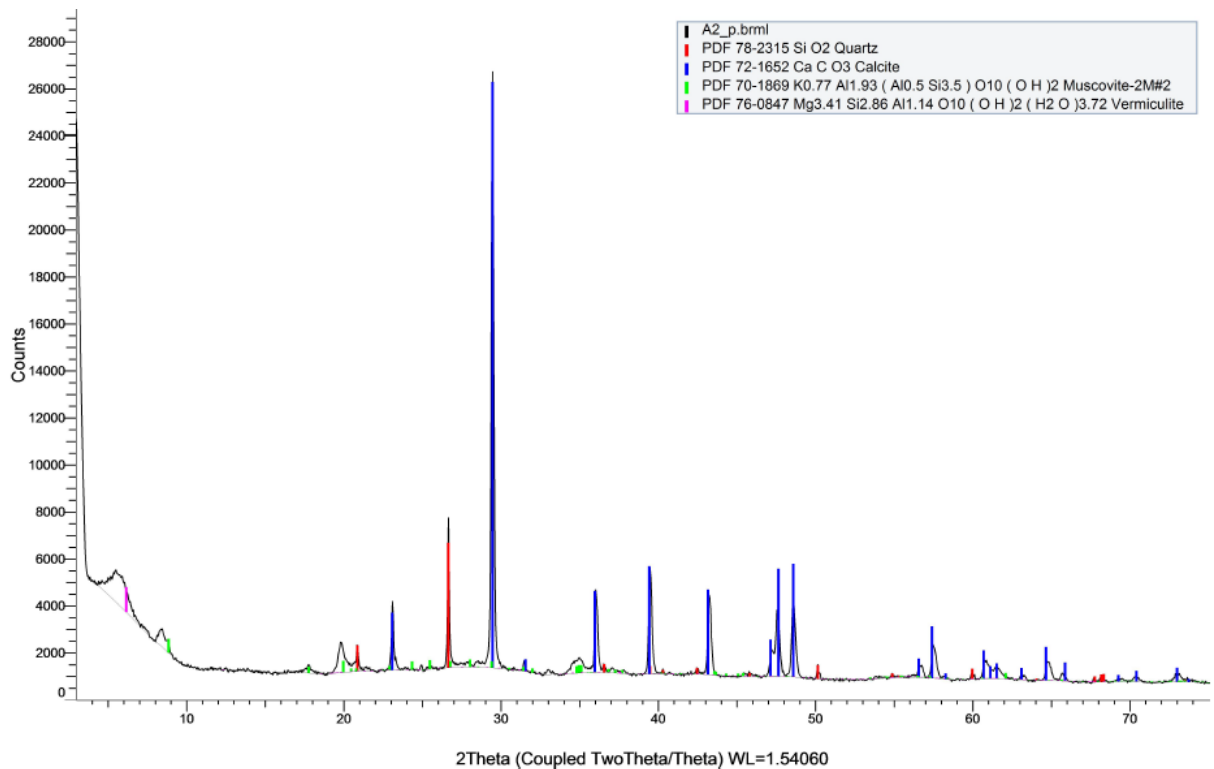


Figura 53 Gráfico da DRX da amostra A2.

No gráfico da Figura 54 está representada a amostra A3, onde predomina a presença de dolomite e com valores bastantes menores surgem a moscovite, quartzo, e vermiculite.

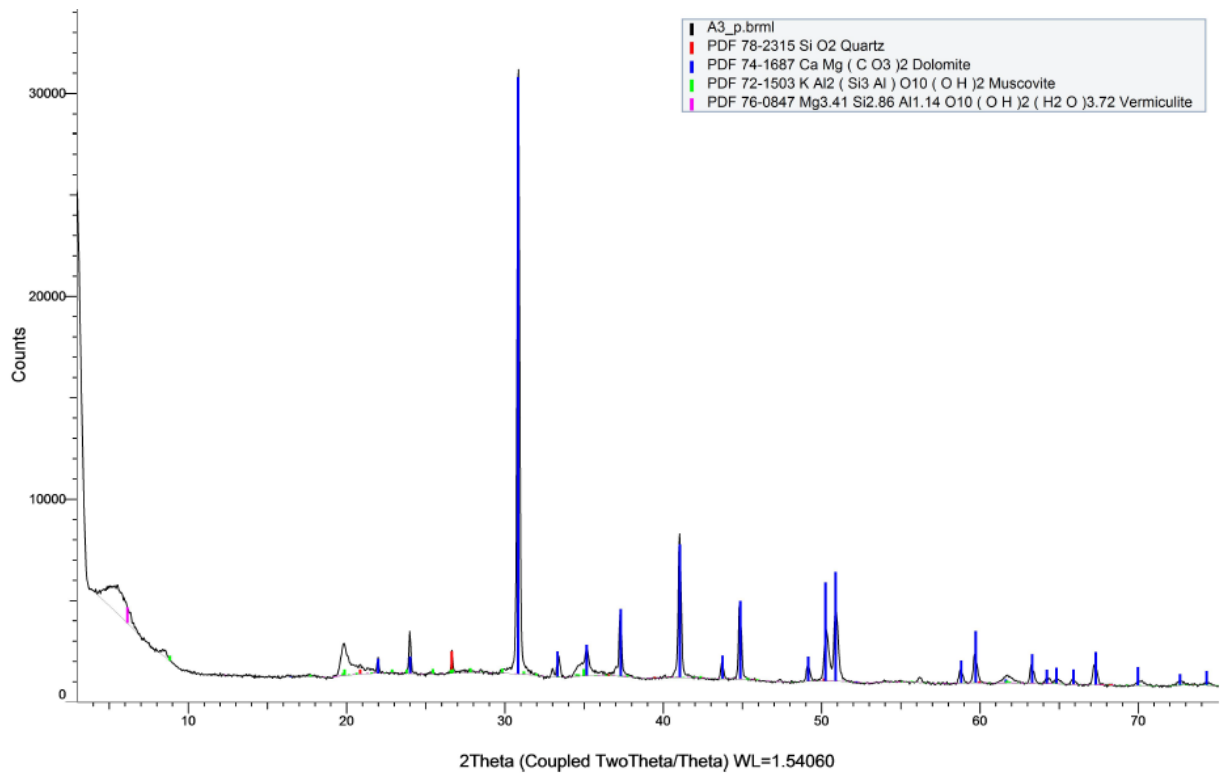


Figura 54 Gráfico da DRX da amostra A3.

No gráfico da Figura 55 esta representada a amostra A4, onde predomina a presença de dolomite e com valores bastantes menores surgem a moscovite e o quartzo.

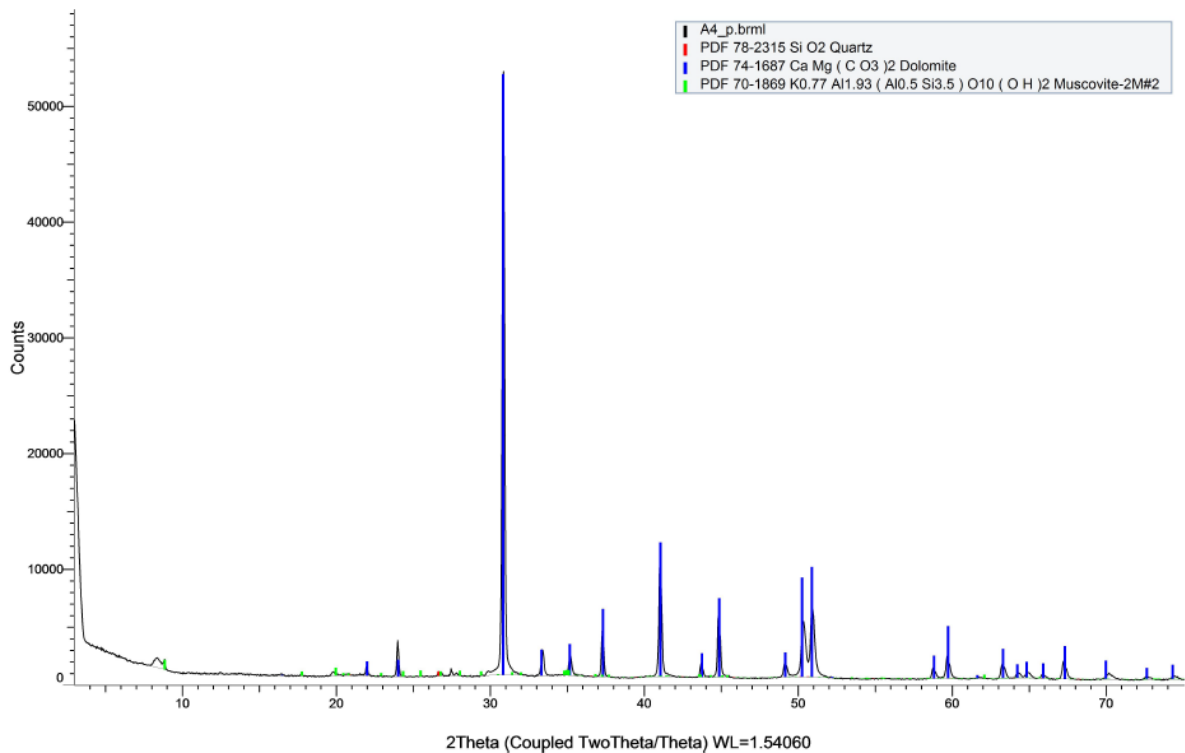


Figura 55 Gráfico da DRX da amostra A4.

De acordo com a tabela 4 e os difractogramas de raios-X analisados, pode constatar-se que existe alguma similitude entre as amostras A1 e A2, em termos de minerais presentes, realçando o domínio claro de calcite como elemento principal. Já as amostras A3 e A4 apresentam a dolomite como mineral principal. Exceto a amostra A4, todas as outras têm vermiculite como mineral vestigial e por fim todas as quatro amostras apresentam quartzo e moscovite como minerais secundários.

Tabela 9 Minerais presentes nas amostras

| Amostras | Identificação mineralógica (%) | | | | |
|----------|--------------------------------|---------|-----------|----------|-------------|
| | Quartzo | Calcite | Moscovite | Dolomite | Vermiculite |
| A1 | 6,92 | 79,46 | 13,45 | | 0,17 |
| A2 | 15,68 | 71,09 | 12,1 | | 1,13 |
| A3 | 2,97 | | 7,82 | 88,44 | 0,77 |
| A4 | 0,64 | | 8,89 | 90,47 | |

Comparando a análise dos resultados obtidos na DRX, apresentados nos gráficos 46, 47, 48 e 49, e também no anexo 8, e o estudo das propriedades físicas, conclui-se que a amostra A4 é a única onde não foram detectados minerais argilosos no DRX, e onde a dolomite é abundante. Como é sabido, apenas os minerais argilosos expandem com a água, e este solo é essencialmente siltoso em termos texturais (ver classificação unificada, tabela 7), classificado como ML que corresponde a um Silte de baixa plasticidade, ao contrário dos restantes solos que são argilosos (CH, SC).

Capítulo VII – Considerações finais

A presente dissertação teve como finalidade, avaliar as características geotécnicas de algumas formações geológicas presentes no local onde se situa a obra em estudo, assim como, expor a metodologia utilizada para a realização das paredes moldadas da obra subterrânea 807 da Linha 15 Sul do metro de Paris.

Primeiramente, realizou-se uma pesquisa sobre o tipo de formações geológicas presentes na área em estudo, com base nas campanhas geológicas realizadas na fase de projeto da obra e, também, recorrendo à carta geológica da região de Lagny. De maneira a poder definir ainda melhor o terreno da área em estudo, foram colhidas quatro amostras de solo, a diferentes profundidades, provenientes de tarolos de sondagens realizadas em fase de execução da obra.

Concomitantemente, no decorrer da obra, realizou-se uma descrição dos meios envolvidos e das metodologias aplicadas para a construção das fundações. Já na fase após a cedência da empreitada, para realização dos trabalhos de remoção do volume de terreno na parte interna das paredes moldadas, continuou-se a passar na obra para acompanhar as problemáticas derivadas aos problemas de execução das paredes moldadas, que foram posteriormente visíveis do lado interno. Nesta fase, foi possível verificar problemas pontuais na qualidade das paredes moldadas realizadas e procurar possíveis causas para tais ocorrências, assim como apresentar soluções que poderão vir a ser aplicadas, no futuro, em situações semelhantes, de forma a evitar o tipo de problemas ocorridos.

Por fim, são apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir dos ensaios realizados nas amostras dos solos estudados nos Laboratórios do Departamento de Geociências e no Laboratório Hércules da Universidade de Évora, que corroboram a informação detalhada na *carte de Lagny*, que faz frequentemente menção à heterogeneidade das formações geológicas na zona parisiense.

A amostra A1 situada na formação geológica de *Marnes d'Argentueil*, em termos mineralógicos encaixa-se perfeitamente na definição de uma marga,

maioritariamente composta por calcite, minerais argilosos, sendo também presentes vestígios de quartzo e vermiculite. Na classificação para fins de engenharia é classificada de argila gorda (CH) e na classificação para fins rodoviários corresponde a um solo argiloso (A-7-6 (19)), com comportamento regular a mau na camada sob pavimento; isto deve-se ao facto de apresentar o índice de plasticidade e expansibilidade considerável.

A amostra A2, também situada na mesma formação geológica que a amostra A1, acaba por ter uma composição mineralógica semelhante em relação aos valores de calcite e minerais de argila, contudo apresenta um teor superior em quartzo. Em termos de classificação para fins de engenharia é também classificada de argila gorda (CH) e na classificação para fins rodoviários corresponde igualmente a um solo argiloso (A-7-6 (20)), com comportamento regular a mau na camada sob pavimento. Contudo, apresenta uma expansibilidade e um índice de plasticidade bem superiores à amostra A1; isto deve-se provavelmente a uma presença mais significativa de vermiculite que é um aluminossilicato hidratado com um potencial de expansão elevado, segundo Sivapullaiah (2015).

As amostras A3 e A4 estão ambas situadas na formação de *Calcaire de Champigny* e foram recolhidas praticamente à mesma profundidade. Em relação à composição mineralógica, são bastante idênticas, definindo-se ambas como calcário dolomítico; contudo, em termos comportamentais, respondem de forma bastante diferente. Se por um lado a amostra A3 é a amostra com maior teor em água, expansibilidade e índice de plasticidade, já a amostra A4, não foi verificada expansão quando ensaiada, o teor em água é muito baixo e o índice de plasticidade também, esta última amostra também é a única amostra que não apresenta vermiculite na sua composição mineralógica. Em termos de classificação para fins rodoviários, ambas correspondem igualmente a um solo argiloso com comportamento regular a mau na camada sob pavimento (A-7-6 (20); A-7-6 (14), respetivamente), contudo, na classificação para fins de engenharia a amostra A3 é uma areia argilosa (SC) e já a amostra A4 um silte (ML).

Os resultados obtidos a partir dos ensaios realizados neste trabalho vieram comprovar a influência da composição mineralógica dos solos nas propriedades geotécnicas dos mesmos, tal como já foi referido por outros autores noutro tipo de solos (Duarte et al, 2017).

Em suma, a construção de fundações especiais para este tipo de terrenos geológicos e para um projeto desta envergadura é uma mais-valia apesar de, ser altamente recomendado o controle da variação do teor em água na envolvente das fundações e, eventualmente, recorrer ao reforço daquelas. Recomenda-se também a monitorização geotécnica durante as fases de construção e exploração da obra, pois os solos estudados apresentam elevados valores para o índice de plasticidade e elevada expansibilidade quando sujeitos ao contato com a água, o que consequentemente altera o seu comportamento geotécnico, nomeadamente no que respeita à deformabilidade e resistência dos terrenos solicitados pela obra.

Referências bibliográficas

Atlas Fondations : documentos e dados oficiais do concurso público do projeto do metro do *Grand Paris Express*.

Azzi, M., (2015). Influence des paramètres de formulation du béton sur les pathologies des parois moulées. Bayonne, France.

Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro (2008). Dissertação de Mestrado: Estudo de soluções para uma escola em blocos de terra crua: Camabatela. Aveiro: Carvalho, G. N. N.

Departamento de Engenharia Geológica da Universidade de Évora (2018). Dissertação de Mestrado: Caracterização geoquímica, mineralógica e geotécnica de solos para a construção em terra na província da Huíla, Angola. Évora: Piedade E.

Duarte, I.M.R., Pedro, E.D.C., Varum, H., Mirão, J. & Pinho, A. (2017) – Soil mineralogical composition effects on the durability of adobe blocks from the Huambo region, Angola. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* (2017) 76:125-132. Print ISSN 1435-9529. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. DOI 10.1007/s10064-015-0800-3.

Federation of Piling Specialists Bentonite (2006). Bentonite support fluids in civil engineering, Federation of Piling Specialists. Fort Benton, USA: Ball Steetley, D. J.; Hutchinson Kvaerner, M. T.; Jefferis, S. A.; Shotton Kvaerner, P. G.; Stansfield, L.; Wills, A. J.

Indian Geotechnical Journal 45 (1): 1–24 (2015). Surprising Soil Behaviour: Is It Really!!!. India: Sivapullaiah, P. V.

Instituto Nacional Geográfico de Paris (1958). Carta geológica de Lagny (184), escala 1/50 000. Paris: Soyer R. e Lemoine M.

Instituto Politécnico de Bragança (2016). Relatório Final de projecto: Dimensionamento de uma estrutura de contenção de terras flexível com vários níveis de apoio. Bragança: Fuertes A., K.

LNEC (1966) – Solos. Preparação por via seca de amostras para ensaios de identificação. LNEC E 195, 1966, Lisboa.

LNEC (1966) – Solos. Ensaio de Compactação. LNEC E 197, 1966, Lisboa.

LNEC (1967) – Solos. Ensaio de expansibilidade. LNEC E 200, 1967, Lisboa.

LNEC (1970) – Solos. Análise granulométrica por peneiração húmida. LNEC E 239, 1970, Lisboa.

LNEC (1970) – Solos. Classificação para fins rodoviários. LNEC E 240, 1970, Lisboa.

LNEC (1965) – Solos. Determinação da densidade das partículas. LNEC NP 83, 1965, Lisboa.

LNEC (1965) – Solos. Determinação do teor em água. LNEC NP 84, 1965, Lisboa.

LNEC (1969) – Solos. Determinação dos limites de consistência. LNEC NP 143, 1969, Lisboa.

Universidade de Évora (2017). Erasmus Mundus Master in Archaeological Materials Science: Multi-analytical Material Characterization of the 14th-18th century Kongo Kingdom Pottery. Universidade de Évora: Tsoupra A.,

Revista da Sociedade Portuguesa de Geotecnia Nº 52 (1988). Revisão da classificação dos solos para propósitos de Engenharia. LNEC, Lisboa: Gomes Correia, A.

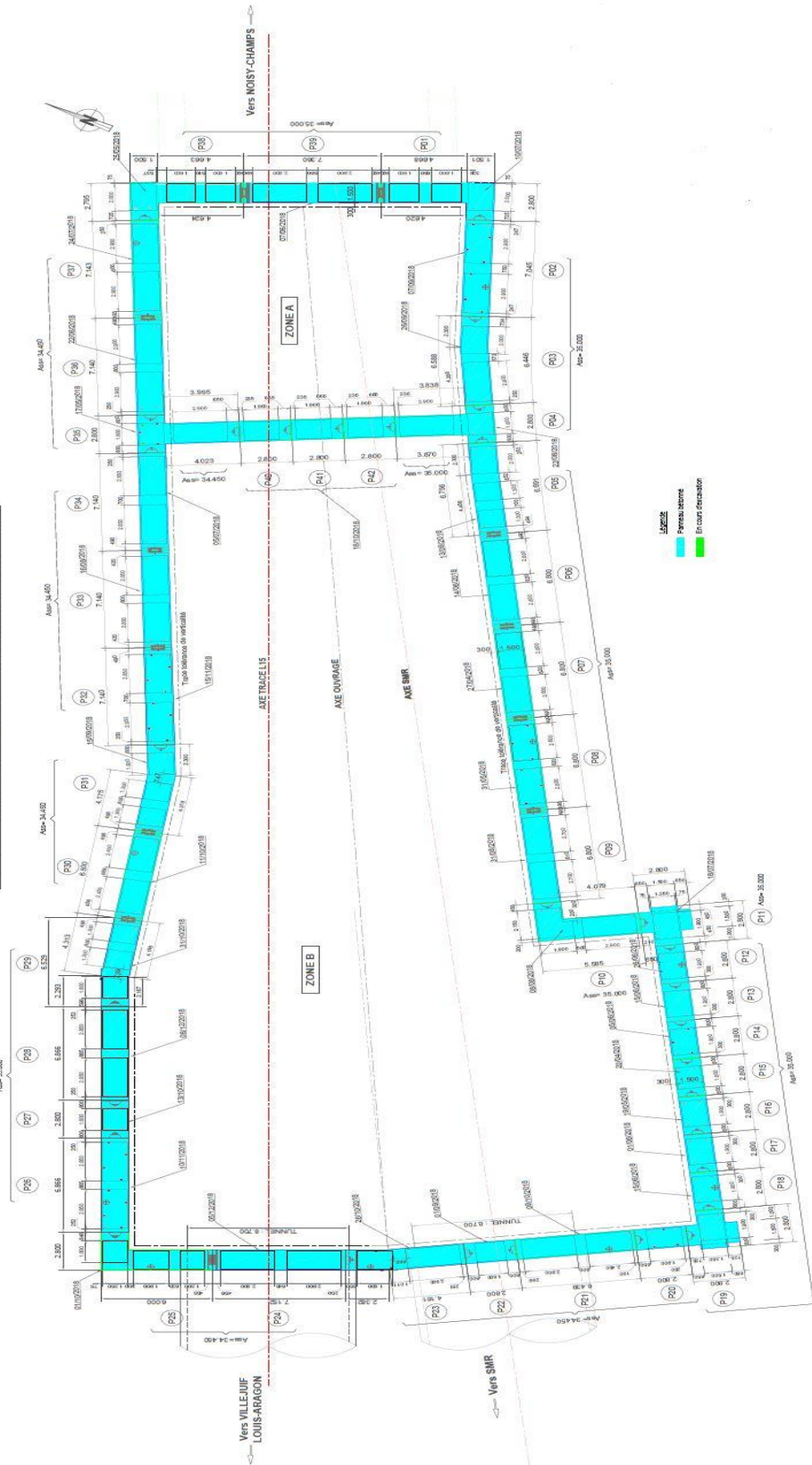
Revista da Sociedade Portuguesa de Geotecnia, Nº 63, pp. 1-9 (1991). Um esboço da história da Mecânica dos Solos. LNEC, Lisboa: Folque, J.

Seminário sobre a execução de paredes moldadas (1999). Faseamento construtivo das paredes moldadas, FUNDEC/ICIST. Lisboa: Brito, J.; França, P.

Seminário S 229 sobre Paredes Moldadas (1979). Paredes Moldadas e Barretas.
Instituto Superior Técnico, Lisboa: Guedes de Melo, F.

Site da SGP: <https://www.societedugrandparis.fr/gpe/le-grand-paris-express-en-resume>; <https://www.societedugrandparis.fr/gpe/carte>

VUE EN PLAN - PANNEAUTAGE PAROI MOULEE - ech:1/100





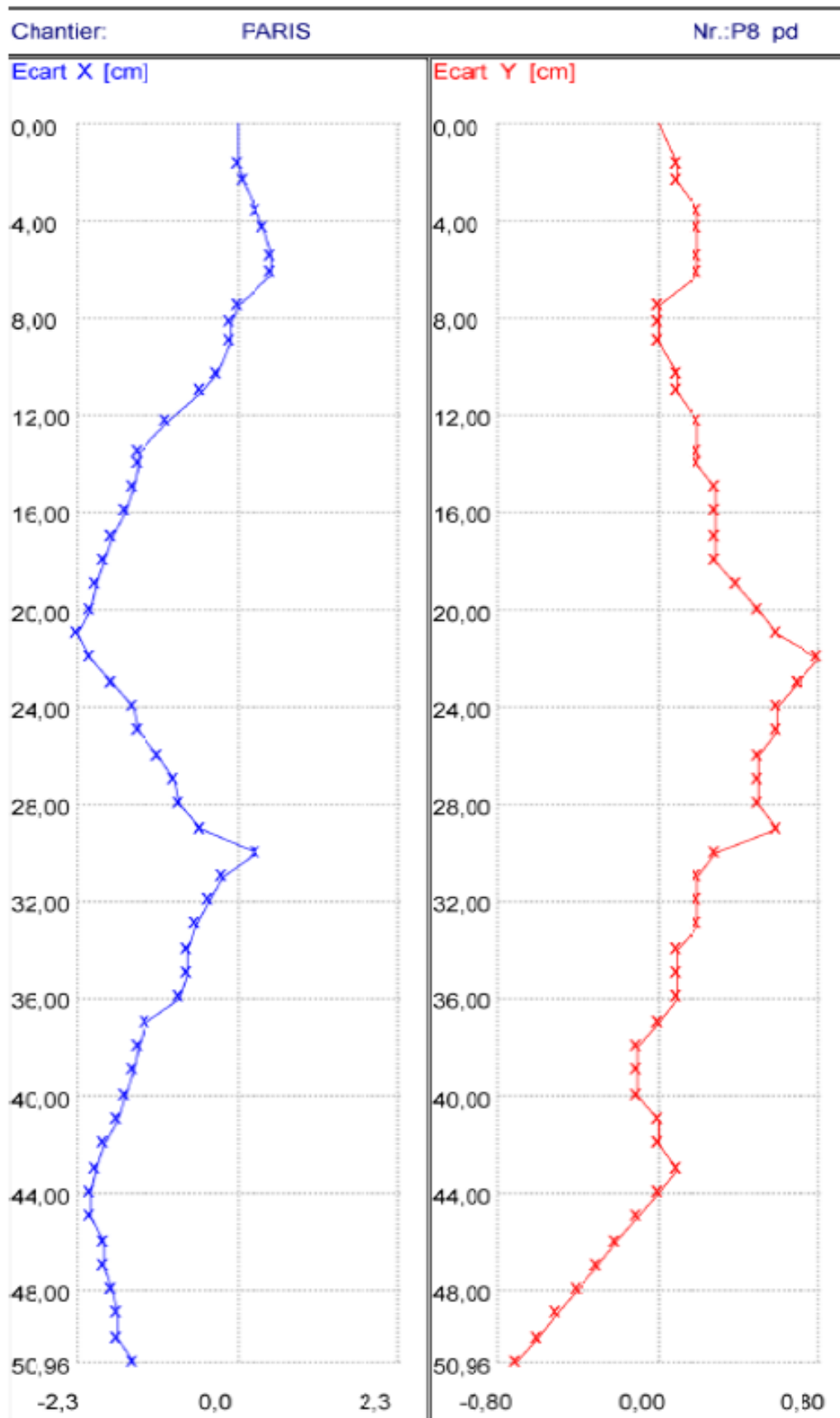
FICHE DE CONTROLE CENTRALE A BOUE

Date : N°:
 Poste n°

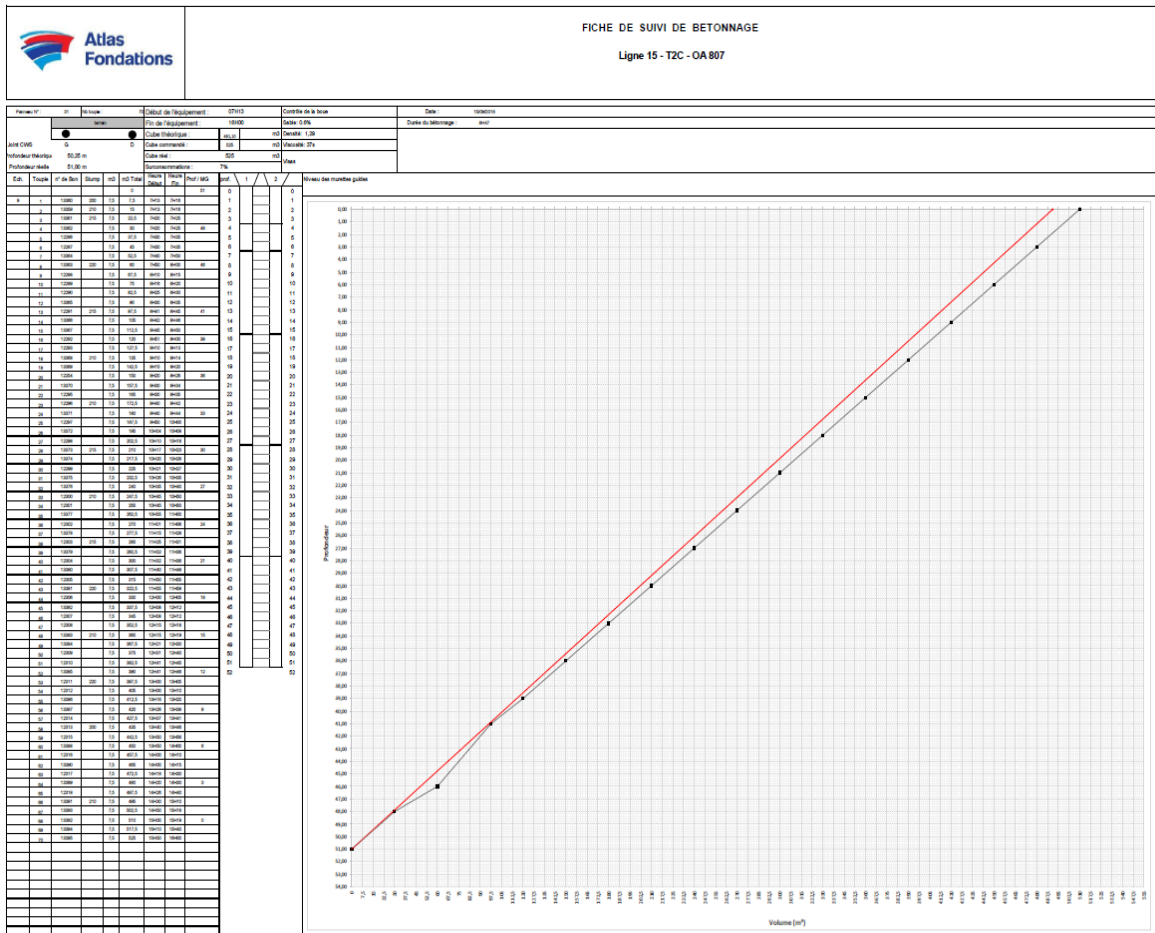
| | | | | | | | | | | | | |
|--|------------------------------|--|-----------------------|-----------------------|--------------|------------|--------|------------|---------------|------------------|------------------|------|
| CHANTIER : L15 - T2C - OA807 | | | | | | | | | | | | |
| FABRICATION | | Volume | Eau m ³ | Bentonite kg | Additif 1 | Additif 2 | | | | | | |
| Nombre de gachées | COMPOSITION par gachée de | 1 kg litres | | | | | | | | | | |
| SOUS - TOTAL (A) Nombre de gachées x Dosage | | m ³ | | | | | | | | | | |
| Nombre de gachées | COMPOSITION par gachée de | 1 m ³ litres | | | | | | | | | | |
| SOUS - TOTAL (B) Nombre de gachées x Dosage | | m ³ | | | | | | | | | | |
| AJOUTS | | | | | | | | | | | | |
| SOUS - TOTAL (C) | | | | | | | | | | | | |
| CONSOMMATION (A+B+C) | | | | | | | | | | | | |
| ETALONNAGE FABRICATION | | | | | | | | | | | | |
| | | CONSIGNES <i>avec tolérances</i> | Densité | Viscosité sec Mash | Reesuee % | Sable % | pH | Cake mm | Filtrat ml | Rigidité V300 | Rigidité V600 | |
| | | Boue Neuve | <1.05 | 34 - 50 | | | 7 à 12 | <5 | <30 | | | |
| | | Boue Excavation | <1.25 | 35 - 50 | | | 7 à 12 | <6 | <50 | | | |
| | | Avant Bétonnage | <1.15 | 32 - 52 | | <3% | 7 à 12 | <6 | <45 | | | |
| CONTRÔLES | | | | | | | | | | | | |
| Lieu de prélèvement | EN COURS | Panneau | Heure | Densité | Viscosité | Reesuee | Sable | pH | Cake | Filtrat | V300 | V600 |
| | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |
| ETALONNAGE INSTRUMENTS | | | | | | | | | | | | |

| | | | |
|--------------|-------------|---------------|---------------------|
| VISAS | Centraliste | Chef de poste | OBSERVATIONS |
| Date | | | |
| Nom | | | |
| Signature | | | |

Anexo 3 Gráfico com os parâmetros de verticalidade (em X e Y) de um painel.



Anexo 4 Exemplo de curva de betonagem.



Anexo 5 Análises granulométricas das amostras A1, A2, A3 e A4

| Granulometria A1 | |
|-------------------------------------|------------------|
| Dimensão das partículas (mm) | % Passada |
| 50,000 | 100,000 |
| 37,500 | 100,000 |
| 25,000 | 100,000 |
| 19,000 | 100,000 |
| 9,500 | 100,000 |
| 4,750 | 100,000 |
| 2,000 | 100,000 |
| 0,850 | 99,970 |
| 0,425 | 99,260 |
| 0,250 | 96,370 |
| 0,106 | 91,390 |
| 0,075 | 89,650 |
| 0,060 | 87,230 |
| 0,020 | 78,450 |
| 0,006 | 74,950 |
| 0,002 | 74,020 |

| Granulometria A2 | |
|-------------------------------------|------------------|
| Dimensão das partículas (mm) | % Passada |
| 50,000 | 100,00 |
| 37,500 | 100,00 |
| 25,000 | 100,00 |
| 19,000 | 100,00 |
| 9,500 | 100,00 |
| 4,750 | 100,00 |
| 2,000 | 100,00 |
| 0,850 | 99,90 |
| 0,425 | 99,79 |
| 0,250 | 99,63 |
| 0,106 | 85,20 |
| 0,075 | 84,10 |
| 0,060 | 83,06 |
| 0,020 | 80,29 |
| 0,006 | 79,32 |
| 0,002 | 79,04 |

| Granulometria A3 | |
|-------------------------------------|------------------|
| Dimensão das partículas (mm) | % Passada |
| 50,000 | 100,00 |
| 37,500 | 100,00 |
| 25,000 | 100,00 |
| 19,000 | 100,00 |
| 9,500 | 100,00 |
| 4,750 | 100,00 |
| 2,000 | 100,00 |
| 0,850 | 99,90 |
| 0,425 | 99,79 |
| 0,250 | 81,62 |
| 0,106 | 54,03 |
| 0,075 | 46,59 |
| 0,060 | 46,31 |
| 0,020 | 45,57 |
| 0,006 | 45,39 |
| 0,002 | 45,24 |

| Granulometria A4 | |
|-------------------------------------|------------------|
| Dimensão das partículas (mm) | % Passada |
| 50,000 | 100,00 |
| 37,500 | 100,00 |
| 25,000 | 100,00 |
| 19,000 | 100,00 |
| 9,500 | 100,00 |
| 4,750 | 100,00 |
| 2,000 | 100,00 |
| 0,850 | 99,58 |
| 0,425 | 97,96 |
| 0,250 | 96,11 |
| 0,106 | 96,09 |
| 0,075 | 90,90 |
| 0,060 | 82,71 |
| 0,020 | 47,52 |
| 0,006 | 35,22 |
| 0,002 | 31,70 |

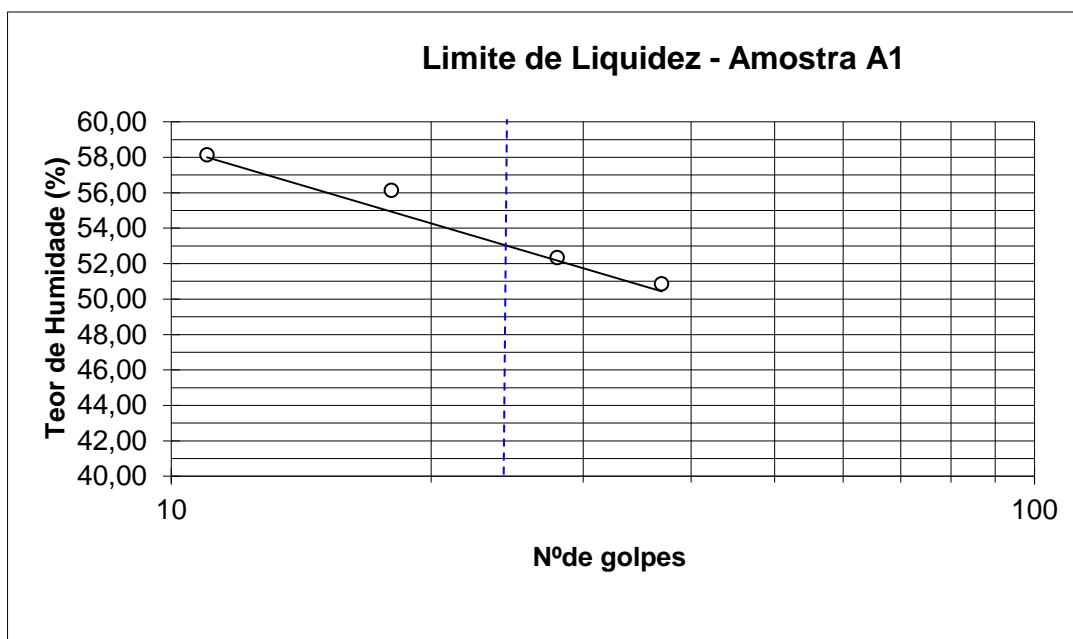


UNIVERSIDADE DE ÉVORA - Departamento de Geociências
Laboratório de Geociências

Determinação dos Limites de Consistência NP- 143

1- LIMITE DE LIQUIDEZ

| | | A1-1 | A1-2 | A1-3 | A1-4 |
|----------------|---------------------------------|-------|-------|-------|--------|
| A | P. da cápsula + Solo húmido (g) | 48,03 | 46,20 | 52,45 | 45,647 |
| B | P. da cápsula + Solo seco (g) | 43,99 | 42,73 | 48,54 | 41,87 |
| C = A - B | P. da água (g) | 4,04 | 3,47 | 3,91 | 3,78 |
| D | P. da Cápsula | 36,05 | 36,09 | 41,57 | 35,372 |
| E = B - D | P. do solo seco (g) | 7,94 | 6,63 | 6,97 | 6,50 |
| W=100 x C/E | Teor de Humidade (%) | 50,86 | 52,34 | 56,14 | 58,13 |
| P | Número de Golpes | 37 | 28 | 18 | 11 |
| W _L | Limite de Liquidez | 53 | | | |



2- LIMITE DE PLASTICIDADE

| | | A1-1 | A1-2 | A1-3 | A1-4 |
|----------------|---------------------------------|-------|-------|-------|--------|
| A | P. da cápsula + Solo húmido (g) | 37,07 | 36,91 | 43,08 | 37,019 |
| B | P. da cápsula + Solo seco (g) | 36,89 | 36,75 | 42,78 | 36,693 |
| C = A - B | P. da água (g) | 0,19 | 0,16 | 0,30 | 0,33 |
| D | P. da Cápsula | 36,05 | 36,09 | 41,57 | 35,372 |
| E = B - D | P. do solo seco (g) | 0,84 | 0,66 | 1,20 | 1,32 |
| W=100 x C/E | Teor de Humidade (%) | 22,24 | 23,52 | 25,12 | 24,68 |
| W _P | Limite de Plasticidade | 24 | | | |

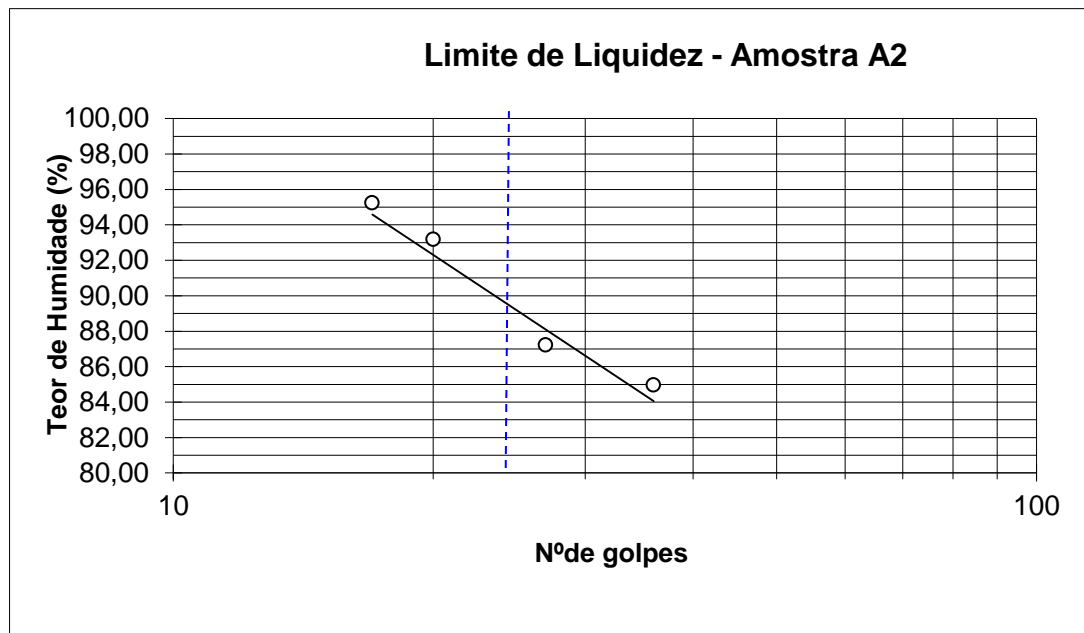
3- ÍNDICE DE PLASTICIDADE

I_P (W_L - W_P) = 29



1- LIMITE DE LIQUIDEZ

| | | A2-1 | A2-2 | A2-3 | A2-4 |
|----------------|---------------------------------|-------|-------|-------|--------|
| A | P. da cápsula + Solo húmido (g) | 38,87 | 47,24 | 46,71 | 46,501 |
| B | P. da cápsula + Solo seco (g) | 34,31 | 41,92 | 41,35 | 41,449 |
| C = A - B | P. da água (g) | 4,56 | 5,32 | 5,36 | 5,05 |
| D | P. da Cápsula | 28,94 | 35,82 | 35,72 | 36,028 |
| E = B - D | P. do solo seco (g) | 5,37 | 6,10 | 5,63 | 5,42 |
| W=100 x C/E | Teor de Humidade (%) | 84,97 | 87,22 | 95,24 | 93,19 |
| P | Número de Golpes | 36 | 27 | 17 | 20 |
| W _L | Limite de Liquidez | 90 | | | |



2- LIMITE DE PLASTICIDADE

| | | A2-1 | A2-2 | A2-3 | A2-4 |
|----------------|---------------------------------|-------|-------|-------|--------|
| A | P. da cápsula + Solo húmido (g) | 30,14 | 36,78 | 36,95 | 36,846 |
| B | P. da cápsula + Solo seco (g) | 29,81 | 36,51 | 36,60 | 36,618 |
| C = A - B | P. da água (g) | 0,34 | 0,26 | 0,35 | 0,23 |
| D | P. da Cápsula | 28,94 | 35,82 | 35,72 | 36,028 |
| E = B - D | P. do solo seco (g) | 0,86 | 0,70 | 0,88 | 0,59 |
| W=100 x C/E | Teor de Humidade (%) | 39,24 | 37,79 | 39,64 | 38,64 |
| W _P | Limite de Plasticidade | 39 | | | |

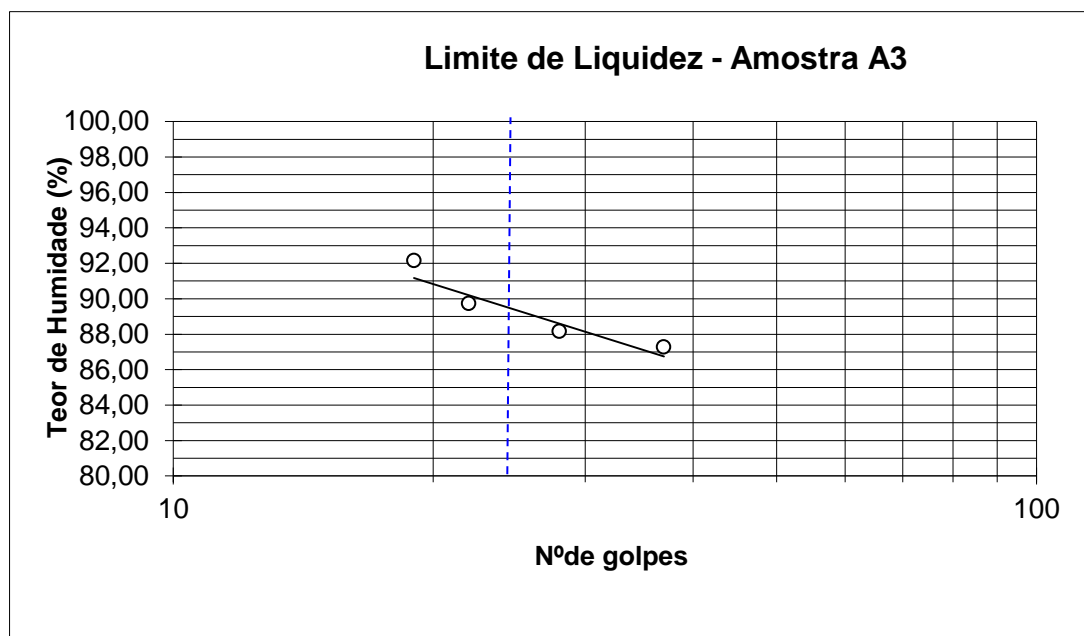
3- ÍNDICE DE PLASTICIDADE

I_P (W_L - W_P) = 51



1- LIMITE DE LIQUIDEZ

| | | A3-1 | A3-2 | A3-3 | A3-4 |
|----------------|---------------------------------|-------|-------|-------|--------|
| A | P. da cápsula + Solo húmido (g) | 46,60 | 53,16 | 48,09 | 48,413 |
| B | P. da cápsula + Solo seco (g) | 41,54 | 48,13 | 42,21 | 42,512 |
| C = A - B | P. da água (g) | 5,06 | 5,03 | 5,88 | 5,90 |
| D | P. da Cápsula | 35,74 | 42,43 | 35,66 | 36,109 |
| E = B - D | P. do solo seco (g) | 5,80 | 5,70 | 6,55 | 6,40 |
| W=100 x C/E | Teor de Humidade (%) | 87,27 | 88,17 | 89,74 | 92,16 |
| P | Número de Golpes | 37 | 28 | 22 | 19 |
| W _L | Limite de Liquidez | 89 | | | |



2- LIMITE DE PLASTICIDADE

| | | A3-1 | A3-2 | A3-3 | A3-4 |
|----------------|---------------------------------|-------|-------|-------|--------|
| A | P. da cápsula + Solo húmido (g) | 36,55 | 43,36 | 36,95 | 37,356 |
| B | P. da cápsula + Solo seco (g) | 36,34 | 43,10 | 36,61 | 37,032 |
| C = A - B | P. da água (g) | 0,20 | 0,26 | 0,33 | 0,32 |
| D | P. da Cápsula | 35,72 | 42,25 | 35,66 | 36,109 |
| E = B - D | P. do solo seco (g) | 0,62 | 0,86 | 0,95 | 0,92 |
| W=100 x C/E | Teor de Humidade (%) | 32,58 | 30,07 | 35,12 | 35,10 |
| W _P | Limite de Plasticidade | 33 | | | |

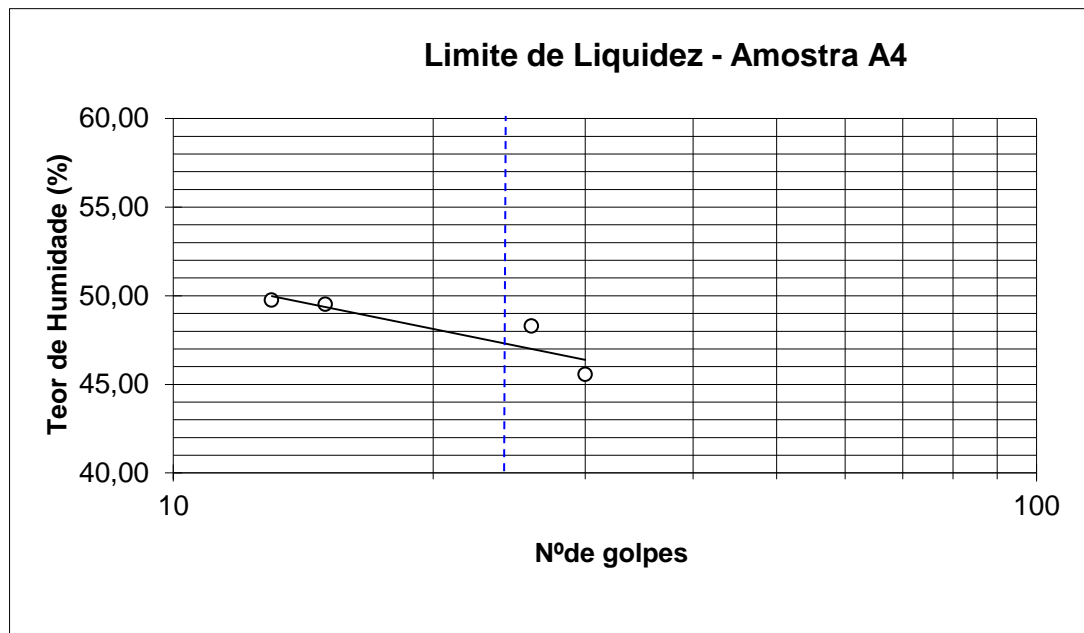
3- ÍNDICE DE PLASTICIDADE

I_p (W_L - W_P) = 56



1- LIMITE DE LIQUIDEZ

| | | A4-1 | A4-2 | A4-3 | A4-4 |
|----------------|---------------------------------|-------|-------|-------|--------|
| A | P. da cápsula + Solo húmido (g) | 54,96 | 47,81 | 48,85 | 57,429 |
| B | P. da cápsula + Solo seco (g) | 51,27 | 43,76 | 44,54 | 53,556 |
| C = A - B | P. da água (g) | 3,68 | 4,05 | 4,31 | 3,87 |
| D | P. da Cápsula | 43,87 | 35,59 | 35,62 | 45,057 |
| E = B - D | P. do solo seco (g) | 7,40 | 8,17 | 8,92 | 8,50 |
| W=100 x C/E | Teor de Humidade (%) | 49,76 | 49,52 | 48,30 | 45,57 |
| P | Número de Golpes | 13 | 15 | 26 | 30 |
| W _L | Limite de Liquidez | 48 | | | |



2- LIMITE DE PLASTICIDADE

| | | A4-1 | A4-2 | A4-3 | A4-4 |
|----------------|---------------------------------|-------|-------|-------|--------|
| A | P. da cápsula + Solo húmido (g) | 44,86 | 36,44 | 36,72 | 46,055 |
| B | P. da cápsula + Solo seco (g) | 44,64 | 36,24 | 36,49 | 45,847 |
| C = A - B | P. da água (g) | 0,23 | 0,20 | 0,23 | 0,21 |
| D | P. da Cápsula | 43,87 | 35,59 | 35,63 | 45,057 |
| E = B - D | P. do solo seco (g) | 0,77 | 0,65 | 0,87 | 0,79 |
| W=100 x C/E | Teor de Humidade (%) | 29,54 | 30,15 | 26,59 | 26,33 |
| W _P | Limite de Plasticidade | 28 | | | |

3- ÍNDICE DE PLASTICIDADE

I_P (W_L - W_P) = 20



**UNIVERSIDADE DE ÉVORA - Departamento de Geociências
Laboratório de Geociências**

Ensaio de Expansibilidade

EXP. : 3

Amostra : A1

| DATA | 09/07/2019 | | 10/07/2019 | | 11/07/2019 | | |
|--------|------------|---------|------------|----------|------------|-----------|-----|
| Tempo | Div | Tempo | Div | Tempo | Div | Tempo | Div |
| ** | | 0 (24h) | 822 | 0 (48h) | 822 | 0 (72h) | |
| ** | | 2 h | 822 | 2 (49h) | 822 | 2 h (74h) | |
| 0 min | 625 | 4 h | 822 | 4 h(52h) | 822 | 4 h (76h) | |
| 1 min | 636 | 6 (31h) | 822 | 6 h | 822 | 6 h | |
| 2 min | 640 | 8 h | 822 | 8 h | | 8 h | |
| 3 min | 644 | 10 h | 822 | 10 h | | 10 h | |
| 4 min | 646 | 12 h | 822 | 12 h | | 12 h | |
| 5 min | 648 | 14 h | | 14 h | | 14 h | |
| 10 min | 653 | 16 h | | 16 h | | 16 h | |
| 15 min | 657 | 18 h | | 18 h | | 18 h | |
| 30 min | 665 | 20 h | | 20 h | | 20 h | |
| 45 min | 680 | 22 h | | 22 h | | 22 h | |
| 1 h | 707 | 24 h | | 24 h | | 24 h | |
| 2 h | 764 | 2 h | | 2 h | | 2 h | |
| 4 h | 789 | 4 h | | 4 h | | 4 h | |
| 6 h | 808 | 6 h | | 6 h | | 6 h | |
| 8 h | 812 | 8 h | | 8 h | | 8 h | |
| 10 h | 816 | 10 h | | 10 h | | 10 h | |
| 12 h | 816 | 12 h | | 12 h | | 12 h | |
| 14 h | | 14 h | | 14 h | | 14 h | |
| 16 h | | 16 h | | 16 h | | 16 h | |
| 18 h | | 18 h | | 18 h | | 18 h | |
| 20 h | | 20 h | | 20 h | | 20 h | |
| 22 h | | 22 h | | 22 h | | 22 h | |
| 24 h | | 24 h | | 24 h | | 24 h | |

Expansibilidade (%) = 13



Ensaio de Expansibilidade

EXP. : 1

Amostra : A2

| DATA | 09/07/2019 | | 10/07/2019 | | 11/07/2019 | | |
|--------|------------|---------|------------|----------|------------|-----------|-----|
| Tempo | Div | Tempo | Div | Tempo | Div | Tempo | Div |
| ** | | 0 (24h) | 417 | 0 (48h) | | 0 (72h) | |
| ** | | 2 h | 418 | 2 (49h) | | 2 h (74h) | |
| 0 min | 94 | 4 h | 418 | 4 h(52h) | | 4 h (76h) | |
| 1 min | 129 | 6 (31h) | 418 | 6 h | | 6 h | |
| 2 min | 141 | 8 h | 419 | 8 h | | 8 h | |
| 3 min | 150 | 10 h | 419 | 10 h | | 10 h | |
| 4 min | 158 | 12 h | 419 | 12 h | | 12 h | |
| 5 min | 164 | 14 h | 419 | 14 h | | 14 h | |
| 10 min | 190 | 16 h | 419 | 16 h | | 16 h | |
| 15 min | 211 | 18 h | 419 | 18 h | | 18 h | |
| 30 min | 262 | 20 h | | 20 h | | 20 h | |
| 45 min | 287 | 22 h | | 22 h | | 22 h | |
| 1 h | 326 | 24 h | | 24 h | | 24 h | |
| 2 h | 374 | 2 h | | 2 h | | 2 h | |
| 4 h | 390 | 4 h | | 4 h | | 4 h | |
| 6 h | 395 | 6 h | | 6 h | | 6 h | |
| 8 h | 401 | 8 h | | 8 h | | 8 h | |
| 10 h | 404 | 10 h | | 10 h | | 10 h | |
| 12 h | 417 | 12 h | | 12 h | | 12 h | |
| 14 h | | 14 h | | 14 h | | 14 h | |
| 16 h | | 16 h | | 16 h | | 16 h | |
| 18 h | | 18 h | | 18 h | | 18 h | |
| 20 h | | 20 h | | 20 h | | 20 h | |
| 22 h | | 22 h | | 22 h | | 22 h | |
| 24 h | | 24 h | | 24 h | | 24 h | |

Expansibilidade (%) =

22



Ensaio de Expansibilidade

EXP. : 5

Amostra : A3

| DATA | 09/07/2019 | | 10/07/2019 | | 11/07/2019 | | |
|--------|------------|---------|------------|----------|------------|-----------|-----|
| Tempo | Div | Tempo | Div | Tempo | Div | Tempo | Div |
| ** | | 0 (24h) | 875 | 0 (48h) | | 0 (72h) | |
| ** | | 2 h | 875 | 2 (49h) | | 2 h (74h) | |
| 0 min | 380 | 4 h | 876 | 4 h(52h) | | 4 h (76h) | |
| 1 min | 439 | 6 (31h) | 877 | 6 h | | 6 h | |
| 2 min | 454 | 8 h | 877 | 8 h | | 8 h | |
| 3 min | 465 | 10 h | 878 | 10 h | | 10 h | |
| 4 min | 475 | 12 h | 879,5 | 12 h | | 12 h | |
| 5 min | 485 | 14 h | 879,5 | 14 h | | 14 h | |
| 10 min | 523 | 16 h | 879,5 | 16 h | | 16 h | |
| 15 min | 551 | 18 h | 879,5 | 18 h | | 18 h | |
| 30 min | 615 | 20 h | | 20 h | | 20 h | |
| 45 min | 660 | 22 h | | 22 h | | 22 h | |
| 1 h | 688 | 24 h | | 24 h | | 24 h | |
| 2 h | 772 | 2 h | | 2 h | | 2 h | |
| 4 h | 829 | 4 h | | 4 h | | 4 h | |
| 6 h | 840 | 6 h | | 6 h | | 6 h | |
| 8 h | 849 | 8 h | | 8 h | | 8 h | |
| 10 h | 874 | 10 h | | 10 h | | 10 h | |
| 12 h | 875 | 12 h | | 12 h | | 12 h | |
| 14 h | | 14 h | | 14 h | | 14 h | |
| 16 h | | 16 h | | 16 h | | 16 h | |
| 18 h | | 18 h | | 18 h | | 18 h | |
| 20 h | | 20 h | | 20 h | | 20 h | |
| 22 h | | 22 h | | 22 h | | 22 h | |
| 24 h | | 24 h | | 24 h | | 24 h | |

Expansibilidade (%) = 33



Ensaio de Expansibilidade

EXP.: 6

Amostra : A4









| DATA | 09/07/2019 | | 10/07/2019 | | 11/07/2019 | | |
|--------|------------|---------|------------|----------|------------|-----------|-----|
| Tempo | Div | Tempo | Div | Tempo | Div | Tempo | Div |
| ** | | 0 (24h) | 232 | 0 (48h) | | 0 (72h) | |
| ** | | 2 h | 232 | 2 (49h) | | 2 h (74h) | |
| 0 min | 231 | 4 h | 232 | 4 h(52h) | | 4 h (76h) | |
| 1 min | 231 | 6 (31h) | 231,5 | 6 h | | 6 h | |
| 2 min | 232 | 8 h | 224 | 8 h | | 8 h | |
| 3 min | 232 | 10 h | 223 | 10 h | | 10 h | |
| 4 min | 232 | 12 h | 223 | 12 h | | 12 h | |
| 5 min | 232 | 14 h | 221,5 | 14 h | | 14 h | |
| 10 min | 232 | 16 h | 221,5 | 16 h | | 16 h | |
| 15 min | 232 | 18 h | 221 | 18 h | | 18 h | |
| 30 min | 232 | 20 h | 220 | 20 h | | 20 h | |
| 45 min | 232,5 | 22 h | | 22 h | | 22 h | |
| 1 h | 232,5 | 24 h | | 24 h | | 24 h | |
| 2 h | 232,5 | 2 h | | 2 h | | 2 h | |
| 4 h | 232,5 | 4 h | | 4 h | | 4 h | |
| 6 h | 232,5 | 6 h | | 6 h | | 6 h | |
| 8 h | 232 | 8 h | | 8 h | | 8 h | |
| 10 h | 232 | 10 h | | 10 h | | 10 h | |
| 12 h | 232 | 12 h | | 12 h | | 12 h | |
| 14 h | | 14 h | | 14 h | | 14 h | |
| 16 h | | 16 h | | 16 h | | 16 h | |
| 18 h | | 18 h | | 18 h | | 18 h | |
| 20 h | | 20 h | | 20 h | | 20 h | |
| 22 h | | 22 h | | 22 h | | 22 h | |
| 24 h | | 24 h | | 24 h | | 24 h | |

Expansibilidade (%) = -0,73

Anexo 8 Resultados obtidos da Difrração RX no Laboratório Hercules para as amostras A1, A2, A3 e A4

Amostra A1

Pattern List #3

| Show | Icon | Color | Index | Name | Parent | Scan | Pattern # | Compound Name |
|------|---|---|-------|-------------|----------------|-------------|-------------|----------------|
| Yes |  |  | 0 | PDF 78-2315 | Pattern List#3 | A1_p.brml#1 | PDF 78-2315 | Quartz |
| Yes |  |  | 1 | PDF 72-1652 | Pattern List#3 | A1_p.brml#1 | PDF 72-1652 | Calcite |
| Yes |  |  | 2 | PDF 72-0496 | Pattern List#3 | A1_p.brml#1 | PDF 72-0496 | Muscovite 2M#1 |
| Yes |  |  | 3 | PDF 77-0022 | Pattern List#3 | A1_p.brml#1 | PDF 77-0022 | Vermiculite 2M |









| Formula | Quality | Y-Scale | I/Ic DB | I/Ic User |
|---|------------|------------|---------|-----------|
| Si O2 | Calculated | 8.4553 % | 3.100 | |
| Ca C O3 | Calculated | 100.2019 % | 3.200 | |
| K (Al1.88 Fe0.12) (Si3 Al) O10 (O H)2 | Calculated | 2.1740 % | 0.410 | |
| (Mg2.36 Fe.48 Al.16) (Al1.28 Si2.72) O10 (O H)2 (H2 O)4.32 Mg0.32 | Calculated | 0.5918 % | 9.040 | |

| S-Q | Added Reference | d x by | Scan WL | Wavelength | System | Space Group | a |
|---------|-----------------|--------|---------|------------|---------------|-------------|---------|
| 6.92 % | | 1.0000 | Yes | 1.54060 | Hexagonal | P3221 (154) | 4.91239 |
| 79.46 % | | 1.0000 | Yes | 1.54060 | Rhombo.H.axes | R-3c (167) | 4.99000 |
| 13.45 % | | 1.0000 | Yes | 1.54060 | Monoclinic | C2/c (15) | 5.19400 |
| 0.17 % | | 1.0000 | Yes | 1.54060 | Monoclinic | C2/c (15) | 5.33000 |

| b | c | alpha | beta | gamma | Z | Volume | Density | Cell Tuned | F (N) |
|---------|----------|-------|--------|-------|---|---------|---------|------------|------------------------|
| | 5.40385 | | | | 3 | 112.93 | 2.650 | No | F28= 999.9(0.0001, 29) |
| | 17.00200 | | | | 6 | 366.63 | 2.719 | No | F30= 999.9(0.0001, 30) |
| 8.99600 | 20.09600 | | 95.180 | | 4 | 935.16 | 2.800 | No | F30= 206.2(0.0037, 39) |
| 9.18000 | 28.90000 | | 97.000 | | 4 | 1403.52 | 2.267 | No | F30= 191.1(0.0042, 37) |

Amostra A2

Pattern List #3

| Show | Icon | Color | Index | Name | Parent | Scan | Pattern # | Compound Name |
|------|---|---|-------|-------------|-----------------|--------------|-------------|----------------|
| Yes |  |  | 0 | PDF 78-2315 | Pattern List #3 | A2_p.brml #1 | PDF 78-2315 | Quartz |
| Yes |  |  | 1 | PDF 72-1652 | Pattern List #3 | A2_p.brml #1 | PDF 72-1652 | Calcite |
| Yes |  |  | 2 | PDF 70-1869 | Pattern List #3 | A2_p.brml #1 | PDF 70-1869 | Muscovite-2M#2 |
| Yes |  |  | 3 | PDF 76-0847 | Pattern List #3 | A2_p.brml #1 | PDF 76-0847 | Vermiculite |









| Formula | Quality | Y-Scale | I/lc DB | I/lc User | S-Q |
|--|------------|-----------|---------|-----------|---------|
| Si O2 | Calculated | 20.9901 % | 3.100 | | 15.68 % |
| Ca C O3 | Calculated | 98.2582 % | 3.200 | | 71.09 % |
| K0.77 Al1.93 (Al0.5 Si3.5) O10 (O H)2 | Calculated | 2.3527 % | 0.450 | | 12.10 % |
| Mg3.41 Si2.86 Al1.14 O10 (O H)2 (H2 O)3.72 | Calculated | 4.1904 % | 8.600 | | 1.13 % |

| Added Reference | d x by | Scan WL | Wavelength | System | Space Group | a | b |
|-----------------|--------|---------|------------|---------------|-------------|---------|---------|
| | 1.0000 | Yes | 1.54060 | Hexagonal | P3221 (154) | 4.91239 | |
| | 1.0000 | Yes | 1.54060 | Rhombo.H.axes | R-3c (167) | 4.99000 | |
| | 1.0000 | Yes | 1.54060 | Monoclinic | C2/c (15) | 8.96500 | 5.17500 |
| | 1.0000 | Yes | 1.54060 | Monoclinic | C2/c (15) | 5.34900 | 9.25500 |

| c | alpha | beta | gamma | Z | Volume | Density | Cell Tuned | F (N) |
|----------|-------|---------|-------|---|---------|---------|------------|------------------------|
| 5.40385 | | | | 3 | 112.93 | 2.650 | No | F28= 999.9(0.0001, 29) |
| 17.00200 | | | | 6 | 366.63 | 2.719 | No | F30= 999.9(0.0001, 30) |
| 20.31000 | | 100.670 | | 4 | 925.97 | 2.750 | No | F30= 999.9(0.0003, 38) |
| 28.89000 | | 97.120 | | 4 | 1419.17 | 2.190 | No | F30= 689.3(0.0012, 37) |

Amostra A3

Pattern List #3

| Show | Icon | Color | Index | Name | Parent | Scan | Pattern # | Compound Name |
|------|---|---|-------|-------------|-----------------|--------------|-------------|---------------|
| Yes |  |  | 0 | PDF 78-2315 | Pattern List #3 | A3_p.brml #1 | PDF 78-2315 | Quartz |
| Yes |  |  | 1 | PDF 74-1687 | Pattern List #3 | A3_p.brml #1 | PDF 74-1687 | Dolomite |
| Yes |  |  | 2 | PDF 72-1503 | Pattern List #3 | A3_p.brml #1 | PDF 72-1503 | Muscovite |
| Yes |  |  | 3 | PDF 76-0847 | Pattern List #3 | A3_p.brml #1 | PDF 76-0847 | Vermiculite |







| Formula | Quality | Y-Scale | I/Ic DB | I/Ic User | S-Q |
|--|------------|-----------|---------|-----------|---------|
| Si O2 | Calculated | 3.6868 % | 3.100 | | 2.97 % |
| Ca Mg (C O3)2 | Calculated | 98.7479 % | 2.790 | | 88.44 % |
| K Al2 (Si3 Al) O10 (O H)2 | Calculated | 1.1577 % | 0.370 | | 7.82 % |
| Mg3.41 Si2.86 Al1.14 O10 (O H)2 (H2 O)3.72 | Calculated | 2.6673 % | 8.600 | | 0.77 % |

| Added Reference | d x by | Scan WL | Wavelength | System | Space Group | a | b |
|-----------------|--------|---------|------------|---------------|-------------|---------|---------|
| | 1.0000 | Yes | 1.54060 | Hexagonal | P3221 (154) | 4.91239 | |
| | 1.0000 | Yes | 1.54060 | Rhombo.H.axes | R-3 (148) | 4.81500 | |
| | 1.0000 | Yes | 1.54060 | Monoclinic | C2/c (15) | 5.19980 | 9.02660 |
| | 1.0000 | Yes | 1.54060 | Monoclinic | C2/c (15) | 5.34900 | 9.25500 |

| c | alpha | beta | gamma | Z | Volume | Density | Cell Tuned | F (N) |
|----------|-------|--------|-------|---|---------|---------|------------|------------------------|
| 5.40385 | | | | 3 | 112.93 | 2.650 | No | F28= 999.9(0.0001, 29) |
| 16.11900 | | | | 3 | 323.64 | 2.838 | No | F30= 160.0(0.0054, 35) |
| 20.10580 | | 95.782 | | 4 | 938.90 | 2.817 | No | F30= 375.5(0.0022, 37) |
| 28.89000 | | 97.120 | | 4 | 1419.17 | 2.190 | No | F30= 689.3(0.0012, 37) |

Amostra A4

Pattern List #3

| Show | Icon | Color | Index | Name | Parent | Scan | Pattern # | Compound Name |
|------|---|---|-------|-------------|-----------------|--------------|-------------|----------------|
| Yes |  |  | 0 | PDF 78-2315 | Pattern List #3 | A4_p.brml #1 | PDF 78-2315 | Quartz |
| Yes |  |  | 1 | PDF 74-1687 | Pattern List #3 | A4_p.brml #1 | PDF 74-1687 | Dolomite |
| Yes |  |  | 2 | PDF 70-1869 | Pattern List #3 | A4_p.brml #1 | PDF 70-1869 | Muscovite-2M#2 |

| Formula | Quality | Y-Scale | I/Ic DB | I/Ic User | S-Q | Added Reference |
|---|------------|-----------|---------|-----------|---------|-----------------|
| Si O ₂ | Calculated | 0.7777 % | 3.100 | | 0.64 % | |
| Ca Mg (C O ₃) ₂ | Calculated | 99.5998 % | 2.790 | | 90.47 % | |
| K0.77 Al1.93 (Al0.5 Si3.5) O10 (O H) ₂ | Calculated | 1.5793 % | 0.450 | | 8.89 % | |

| d x by | Scan WL | Wavelength | System | Space Group | a | b | c | alpha | beta |
|--------|---------|------------|---------------|-------------|---------|---------|----------|-------|---------|
| 1.0000 | Yes | 1.54060 | Hexagonal | P3221 (154) | 4.91239 | | 5.40385 | | |
| 1.0000 | Yes | 1.54060 | Rhombo.H.axes | R-3 (148) | 4.81500 | | 16.11900 | | |
| 1.0000 | Yes | 1.54060 | Monoclinic | C2/c (15) | 8.96500 | 5.17500 | 20.31000 | | 100.670 |

| gamma | Z | Volume | Density | Cell Tuned | F (N) |
|-------|---|--------|---------|------------|------------------------|
| | 3 | 112.93 | 2.650 | No | F28= 999.9(0.0001, 29) |
| | 3 | 323.64 | 2.838 | No | F30= 160.0(0.0054, 35) |
| | 4 | 925.97 | 2.750 | No | F30= 999.9(0.0003, 38) |

Anexo 9 Resultados obtidos dos ensaios de fluorescência de RX nas amostras A1, A2, A3 e A4.

| Identificação dos elementos químicos da amostra A1 | | | | | | | | | |
|--|---------|-----------------|-------------------------------|---------------|------------|------|---------|---------|-------|
| Z | Formula | Evaluation Mode | Line Name | Concentration | Stat Error | LLD | I net | I gross | I bkg |
| 11 | Na2O | XRF | Na KA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 0,54% | ± 0,0472 | 1039 | 9,4318 | 65,894 | 0 |
| 12 | MgO | XRF | Mg KA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 1,74% | ± 0,0268 | 690 | 224,88 | 322,65 | 0 |
| 13 | Al2O3 | XRF | Al KA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 5,06% | ± 0,0214 | 602 | 905,18 | 1035,3 | 0 |
| 14 | SiO2 | XRF | Si KA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 17,30% | ± 0,0205 | 600 | 9088 | 9353,1 | 0 |
| 15 | P2O5 | XRF | P KA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 0,31% | ± 0,00459 | 112 | 143,69 | 294,1 | 0 |
| 16 | S | XRF | S KA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 0,22% | ± 0,00140 | 35,2 | 635,89 | 1017,9 | 0 |
| 19 | K2O | XRF | K KA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 1,25% | ± 0,0389 | 876 | 70,034 | 246,5 | 0 |
| 20 | CaO | XRF | Ca KA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 39,10% | ± 0,0707 | 2057 | 4538,1 | 4717,2 | 0 |
| 22 | TiO2 | XRF | Ti KA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 0,16% | ± 0,00807 | 185 | 28,134 | 94,831 | 0 |
| 26 | Fe2O3 | XRF | Fe KA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 2,03% | ± 0,00482 | 141 | 2390,1 | 2443,9 | 0 |
| 37 | Rb | XRF | Rb KA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 48 PPM | ± 2,24 | 4,86 | 123,66 | 1291,1 | 0 |
| 38 | Sr | XRF | Sr KA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 312 PPM | ± 3,03 | 7,04 | 713,66 | 2104,4 | 0 |
| 39 | Y | XRF | Y KA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 9 PPM | ± 2,79 | 5,95 | 64,565 | 2450 | 0 |
| 40 | Zr | XRF | Zr KA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 45 PPM | ± 2,68 | 5,82 | 205,15 | 2078,2 | 0 |
| 41 | Nb | XRF | Nb KA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 8 PPM | ± 2,32 | 4,92 | 62,288 | 9265,4 | 0 |
| 56 | Ba | XRF | Ba KA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 718 PPM | ± 23,1 | 51 | 59,524 | 333,51 | 0 |
| 90 | Th | XRF | Th LA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 4 PPM | ± 3,71 | 7,87 | 7,2192 | 1962,1 | 0 |
| 24 | Cr | XRF | Cr KA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 550 PPM | ± 16,2 | 39,2 | 51,495 | 111,52 | 0 |
| 27 | Co | XRF | Co KA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 9 PPM | ± 0,829 | 2,07 | 35,195 | 58,508 | 0 |
| 28 | Ni | XRF | Ni KA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 247 PPM | ± 4,61 | 11,6 | 76,681 | 113,32 | 0 |
| 29 | Cu | XRF | Cu KA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 18 PPM | ± 3,83 | 8,67 | 9,7171 | 33,444 | 0 |
| 30 | Zn | XRF | Zn KA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 41 PPM | ± 2,53 | 5,76 | 14,5 | 51,382 | 0 |
| 31 | Ga | XRF | Ga KA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 12 PPM | ± 1,11 | 2,42 | 18,229 | 107,79 | 0 |
| 33 | As | XRF | As KA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 12 PPM | ± 3,85 | 8,27 | 10,572 | 157,04 | 0 |
| 82 | Pb | XRF | Pb LB1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 0 PPM | ± 7,81 | 16,5 | 3,3722 | 1106,9 | 0 |
| 50 | Sn | XRF | Sn KA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | -1 PPM | ± 0 | 21,3 | 6,0693 | 136,89 | 0 |
| 23 | V | XRF | V KA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 151 PPM | ± 17,1 | 36,4 | 0,69474 | 50,478 | 0 |
| 55 | Cs | XRF | Cs KA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 3 PPM | ± 0,0426 | 0,09 | 2,5483 | 156,16 | 0 |
| 57 | La | XRF | La KA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 72 PPM | ± 46,8 | 99,1 | 0,50705 | 115,21 | 0 |
| 73 | Ta | XRF | Ta LA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 1 PPM | ± 0,0193 | 0,03 | 4,8547 | 12,245 | 0 |
| 58 | Ce | XRF | Ce KA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 267 PPM | ± 84,6 | 180 | 2,0781 | 94,336 | 0 |
| 92 | U | XRF | U LA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 1 PPM | ± 0,00181 | 0 | 0,54152 | 152,47 | 0 |
| 17 | Cl | XRF | Cl KA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 7 PPM | ± 0,00762 | 0,02 | 453,51 | 907,84 | 0 |
| 25 | Mn | XRF | Mn KA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 613 PPM | ± 20,5 | 48,5 | 52,642 | 114,5 | 0 |

| Identificação dos elementos químicos da amostra A2 | | | | | | | | | |
|--|---------|-----------------|-------------------------------|---------------|------------|------|----------|---------|-------|
| Z | Formula | Evaluation Mode | Line Name | Concentration | Stat Error | LLD | I net | I gross | I bkg |
| 11 | Na2O | XRF | Na KA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 1,40% | ± 0,0536 | 1244 | 31,304 | 94,828 | 0 |
| 12 | MgO | XRF | Mg KA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 2,53% | ± 0,0290 | 757 | 296,34 | 405,13 | 0 |
| 13 | Al2O3 | XRF | Al KA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 7,67% | ± 0,0254 | 725 | 1365,3 | 1507,9 | 0 |
| 14 | SiO2 | XRF | Si KA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 27,00% | ± 0,0252 | 742 | 14039 | 14327 | 0 |
| 15 | P2O5 | XRF | P KA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 0,23% | ± 0,00447 | 105 | 96,178 | 259,21 | 0 |
| 16 | S | XRF | S KA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 0,81% | ± 0,00210 | 58 | 2357,6 | 2768,9 | 0 |
| 19 | K2O | XRF | K KA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 1,56% | ± 0,0409 | 937 | 91,016 | 267,98 | 0 |
| 20 | CaO | XRF | Ca KA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 27,20% | ± 0,0614 | 1773 | 3154,7 | 3333,8 | 0 |
| 22 | TiO2 | XRF | Ti KA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 0,24% | ± 0,00886 | 209 | 42,985 | 114,12 | 0 |
| 26 | Fe2O3 | XRF | Fe KA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 2,88% | ± 0,00588 | 173 | 3427,2 | 3483,5 | 0 |
| 37 | Rb | XRF | Rb KA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 81 PPM | ± 2,38 | 5,25 | 209,5 | 1428,2 | 0 |
| 38 | Sr | XRF | Sr KA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 367 PPM | ± 3,06 | 7,2 | 879,46 | 2334,8 | 0 |
| 39 | Y | XRF | Y KA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 8 PPM | ± 2,94 | 6,28 | 87,138 | 2597,5 | 0 |
| 40 | Zr | XRF | Zr KA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 60 PPM | ± 2,84 | 6,19 | 264,78 | 2232,6 | 0 |
| 41 | Nb | XRF | Nb KA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 7 PPM | ± 2,32 | 4,91 | 53,194 | 9718,5 | 0 |
| 56 | Ba | XRF | Ba KA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 900 PPM | ± 23,6 | 52,4 | 71,192 | 348,11 | 0 |
| 90 | Th | XRF | Th LA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 1 PPM | ± 3,90 | 8,27 | 2,2896 | 2058,6 | 0 |
| 24 | Cr | XRF | Cr KA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 17 PPM | ± 14,1 | 30 | 0,82078 | 62,032 | 0 |
| 27 | Co | XRF | Co KA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 16 PPM | ± 0,953 | 2,46 | 54,633 | 78,791 | 0 |
| 28 | Ni | XRF | Ni KA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 16 PPM | ± 3,33 | 7,06 | 5,0636 | 39,643 | 0 |
| 29 | Cu | XRF | Cu KA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 28 PPM | ± 4,03 | 9,24 | 11,482 | 35,871 | 0 |
| 30 | Zn | XRF | Zn KA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 50 PPM | ± 2,68 | 6,17 | 18,176 | 56,15 | 0 |
| 31 | Ga | XRF | Ga KA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 14 PPM | ± 1,16 | 2,56 | 21,231 | 114,19 | 0 |
| 33 | As | XRF | As KA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 13 PPM | ± 4,09 | 8,88 | 18,596 | 172,5 | 0 |
| 82 | Pb | XRF | Pb LB1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 10 PPM | ± 8,23 | 17,4 | 12,726 | 1173,5 | 0 |
| 50 | Sn | XRF | Sn KA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | -11 PPM | ± 0 | 21,6 | 4,7855 | 140,07 | 0 |
| 23 | V | XRF | V KA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 135 PPM | ± 18,1 | 38,8 | 2,6173 | 54,377 | 0 |
| 55 | Cs | XRF | Cs KA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 5 PPM | ± 0,0431 | 0,09 | 2,4453 | 157,96 | 0 |
| 57 | La | XRF | La KA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 14 PPM | ± 47,2 | 99,6 | -0,45291 | 115,21 | 0 |
| 73 | Ta | XRF | Ta LA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 1 PPM | ± 0,0198 | 0,03 | 4,6321 | 12,098 | 0 |
| 58 | Ce | XRF | Ce KA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 83 PPM | ± 85,2 | 181 | 0,29793 | 93,766 | 0 |
| 92 | U | XRF | U LA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 2 PPM | ± 0,00189 | 0 | 0,16033 | 158,21 | 0 |
| 17 | Cl | XRF | Cl KA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 13 PPM | ± 0,00892 | 0,02 | 901,86 | 1387,1 | 0 |
| 25 | Mn | XRF | Mn KA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 446 PPM | ± 20,1 | 45,9 | 33,62 | 97,219 | 0 |

| Identificação dos elementos químicos da amostra A3 | | | | | | | | | |
|--|---------|-----------------|-------------------------------|---------------|------------|------|--------|---------|-------|
| Z | Formula | Evaluation Mode | Line Name | Concentration | Stat Error | LLD | I net | I gross | I bkg |
| 11 | Na2O | XRF | Na KA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 0,49% | ± 0,0472 | 1034 | 8,8209 | 70,39 | 0 |
| 12 | MgO | XRF | Mg KA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 13,20% | ± 0,0463 | 1310 | 1229,2 | 1339,2 | 0 |
| 13 | Al2O3 | XRF | Al KA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 6,17% | ± 0,0224 | 635 | 1104,4 | 1244,8 | 0 |
| 14 | SiO2 | XRF | Si KA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 22,00% | ± 0,0221 | 648 | 11482 | 11761 | 0 |
| 15 | P2O5 | XRF | P KA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 0,17% | ± 0,00411 | 94,9 | 71,226 | 227,41 | 0 |
| 16 | S | XRF | S KA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 0,74% | ± 0,00195 | 53,8 | 2167 | 2564 | 0 |
| 19 | K2O | XRF | K KA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 1,06% | ± 0,0403 | 902 | 62,187 | 237,11 | 0 |
| 20 | CaO | XRF | Ca KA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 19,10% | ± 0,0538 | 1539 | 2222,2 | 2398,7 | 0 |
| 22 | TiO2 | XRF | Ti KA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 0,21% | ± 0,00904 | 210 | 37,244 | 110,71 | 0 |
| 26 | Fe2O3 | XRF | Fe KA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 2,34% | ± 0,00546 | 160 | 2799 | 2856,4 | 0 |
| 37 | Rb | XRF | Rb KA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 74 PPM | ± 2,53 | 5,55 | 192,66 | 1527,2 | 0 |
| 38 | Sr | XRF | Sr KA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 178 PPM | ± 2,95 | 6,64 | 446,9 | 2042,7 | 0 |
| 39 | Y | XRF | Y KA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 5 PPM | ± 3,13 | 6,69 | 72,687 | 2814,3 | 0 |
| 40 | Zr | XRF | Zr KA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 54 PPM | ± 3,00 | 6,48 | 199,69 | 2338,8 | 0 |
| 41 | Nb | XRF | Nb KA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 6 PPM | ± 2,39 | 5,06 | 41,316 | 1057,1 | 0 |
| 56 | Ba | XRF | Ba KA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 901 PPM | ± 23,7 | 52,5 | 70,441 | 352,06 | 0 |
| 90 | Th | XRF | Th LA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 5 PPM | ± 4,16 | 8,83 | 9,6908 | 2242,5 | 0 |
| 24 | Cr | XRF | Cr KA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 19 PPM | ± 14,7 | 31,2 | 1,2437 | 64,216 | 0 |
| 27 | Co | XRF | Co KA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 28 PPM | ± 0,910 | 2,28 | 39,629 | 64,577 | 0 |
| 28 | Ni | XRF | Ni KA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 29 PPM | ± 3,60 | 7,81 | 9,0161 | 46,077 | 0 |
| 29 | Cu | XRF | Cu KA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 9 PPM | ± 4,08 | 9,06 | 7,4766 | 33,278 | 0 |
| 30 | Zn | XRF | Zn KA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 42 PPM | ± 2,74 | 6,21 | 14,977 | 54,388 | 0 |
| 31 | Ga | XRF | Ga KA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 13 PPM | ± 1,22 | 2,67 | 19,995 | 119,48 | 0 |
| 33 | As | XRF | As KA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 21 PPM | ± 4,42 | 9,68 | 27,859 | 196,19 | 0 |
| 82 | Pb | XRF | Pb LB1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | -2 PPM | ± 0 | 18,5 | 7,1411 | 1265 | 0 |
| 50 | Sn | XRF | Sn KA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 15 PPM | ± 10,4 | 22,1 | 7,4773 | 148,06 | 0 |
| 23 | V | XRF | V KA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 125 PPM | ± 18,6 | 40,4 | 4,8052 | 56,375 | 0 |
| 55 | Cs | XRF | Cs KA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 4 PPM | ± 0,0435 | 0,09 | 2,9398 | 163,04 | 0 |
| 57 | La | XRF | La KA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 13 PPM | ± 47,4 | 100 | - | 117,4 | 0 |

| | | | | | | | | | |
|----|----|-----|-------------------------------|---------|-----------|------|-------------|------------|---|
| | | | | | | | 0,2609 8 | 3 | |
| 73 | Ta | XRF | Ta LA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 1 PPM | ± 0,0205 | 0,03 | 4,3166 | 12,21 6 | 0 |
| 58 | Ce | XRF | Ce KA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 170 PPM | ± 86,0 | 183 | 1,4636 | 96,93 5 | 0 |
| 92 | U | XRF | U LA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 2 PPM | ± 0,00203 | 0 | 0,3376 2 | 174,1 7 | 0 |
| 17 | Cl | XRF | Cl KA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 16 PPM | ± 0,00758 | 0,02 | 506,38 | 979,7 4 | 0 |
| 25 | Mn | XRF | Mn KA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 342 PPM | ± 20,4 | 45,6 | 25,991 | 91,80 3 | 0 |

| Identificação dos elementos químicos da amostra A4 | | | | | | | | | |
|--|---------|-----------------|-------------------------------|---------------|------------|------|----------|---------|-------|
| Z | Formula | Evaluation Mode | Line Name | Concentration | Stat Error | LLD | I net | I gross | I bkg |
| 11 | Na2O | XRF | Na KA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 1,04% | ± 0,0499 | 1138 | 23,795 | 87,807 | 0 |
| 12 | MgO | XRF | Mg KA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 18,80% | ± 0,0534 | 1527 | 1695,9 | 1801,6 | 0 |
| 13 | Al2O3 | XRF | Al KA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 1,13% | ± 0,0128 | 326 | 207,39 | 336,56 | 0 |
| 14 | SiO2 | XRF | Si KA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 6,59% | ± 0,0126 | 363 | 3556,6 | 3812 | 0 |
| 15 | P2O5 | XRF | P KA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 0,28% | ± 0,00426 | 104 | 136,55 | 280,7 | 0 |
| 16 | S | XRF | S KA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 0,17% | ± 0,00123 | 30,4 | 475,4 | 844,04 | 0 |
| 19 | K2O | XRF | K KA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 0,19% | ± 0,0361 | 760 | 5,9156 | 176,6 | 0 |
| 20 | CaO | XRF | Ca KA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 30,60% | ± 0,0649 | 1883 | 3579,7 | 3755 | 0 |
| 22 | TiO2 | XRF | Ti KA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 730 PPM | ± 0,00789 | 174 | 12,438 | 79,655 | 0 |
| 26 | Fe2O3 | XRF | Fe KA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 0,57% | ± 0,00273 | 78,3 | 664,99 | 713,72 | 0 |
| 37 | Rb | XRF | Rb KA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 20 PPM | ± 2,39 | 5,11 | 53,389 | 1356,4 | 0 |
| 38 | Sr | XRF | Sr KA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 157 PPM | ± 3,00 | 6,69 | 376,56 | 1942,9 | 0 |
| 39 | Y | XRF | Y KA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 3 PPM | ± 3,03 | 6,43 | 26,691 | 2724,1 | 0 |
| 40 | Zr | XRF | Zr KA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 32 PPM | ± 2,89 | 6,21 | 132,12 | 2245,9 | 0 |
| 41 | Nb | XRF | Nb KA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 6 PPM | ± 2,44 | 5,17 | 42,039 | 10414 | 0 |
| 56 | Ba | XRF | Ba KA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 776 PPM | ± 23,3 | 51,4 | 63,271 | 344,14 | 0 |
| 90 | Th | XRF | Th LA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 6 PPM | ± 4,02 | 8,55 | 11,691 | 2199,1 | 0 |
| 24 | Cr | XRF | Cr KA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 6 PPM | ± 13,8 | 29,4 | 0,044424 | 59,378 | 0 |
| 27 | Co | XRF | Co KA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 35 PPM | ± 0,687 | 1,57 | 10,908 | 32,168 | 0 |
| 28 | Ni | XRF | Ni KA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 11 PPM | ± 3,33 | 7,01 | 3,5782 | 38,892 | 0 |

| | | | | | | | | | |
|----|----|-----|-------------------------------|---------|--------------|------|---------|--------|---|
| 29 | Cu | XRF | Cu KA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 35 PPM | ± 4,17 | 9,73 | 14,63 | 39,646 | 0 |
| 30 | Zn | XRF | Zn KA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 46 PPM | ± 2,68 | 6,14 | 16,474 | 55,275 | 0 |
| 31 | Ga | XRF | Ga KA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 8 PPM | ± 1,16 | 2,51 | 12,999 | 109,88 | 0 |
| 33 | As | XRF | As KA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 9 PPM | ± 4,06 | 8,59 | 0,78031 | 161,13 | 0 |
| 82 | Pb | XRF | Pb LB1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 9 PPM | ± 8,51 | 18 | 6,7088 | 1251 | 0 |
| 50 | Sn | XRF | Sn KA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | -11 PPM | ± 0 | 21,6 | 4,5429 | 144,08 | 0 |
| 23 | V | XRF | V KA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 154 PPM | ± 17,6 | 37,4 | 0,59757 | 50,474 | 0 |
| 55 | Cs | XRF | Cs KA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 1 PPM | ± 0,0428 | 0,09 | 0,11638 | 159,6 | 0 |
| 57 | La | XRF | La KA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 65 PPM | ± 46,8 | 99 | 0,40887 | 117 | 0 |
| 73 | Ta | XRF | Ta LA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 0 PPM | ± 0,0201 | 0,03 | 4,9549 | 12,605 | 0 |
| 58 | Ce | XRF | Ce KA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 160 PPM | ± 84,7 | 180 | 0,92512 | 95,729 | 0 |
| 92 | U | XRF | U LA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 1 PPM | ± 0,00197 | 0 | 0,86764 | 170,98 | 0 |
| 17 | Cl | XRF | Cl KA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 2 PPM | ± 0,00809 | 0,02 | 817,95 | 1262 | 0 |
| 25 | Mn | XRF | Mn KA1/HRC_CERAMIC_MASSIMO | 318 PPM | ± 18,9 | 42,5 | 24,282 | 83,402 | 0 |