



Instituto Superior de Engenharia do Porto

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA

Análise comparativa de diferentes métodos laboratoriais na caracterização física de solos utilizados em obras de engenharia civil

Camila Afonso dos Santos



2019



Instituto Superior de Engenharia do Porto

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA

Análise comparativa de diferentes métodos laboratoriais na caracterização física de solos utilizados em obras de engenharia civil

Comparative analysis of different laboratory methods in the physical characterization of soils for civil engineering works

Camila Afonso dos Santos

1170285

*Relatório de estágio apresentado ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Geotécnica e Geoambiente**, realizada sob a orientação da Doutora Maria Manuela Martins de Carvalho, Professora Adjunta do Departamento de Engenharia Geotécnica do ISEP e sob a supervisão do Doutor Adriano Manuel da Silva Teixeira, diretor do Laboratório de Geotecnia e Materiais de Construção do CICCOPN.*

Júri

Presidente

Doutor João Paulo Meixedo dos Santos Silva

Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Doutora Maria Manuela Martins de Carvalho

Professora Adjunta, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Doutor Adriano Manuel da Silva Teixeira

Professor Adjunto Convidado, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Director Técnico Centro de Formação Profissional da Indústria da Construção Civil e Obras Públicas do Norte (CICCOPN)

Mestre Eduardo Castro Neves

Responsável pelos sectores de Sondagens e Prospecção e Solos do CICCOPN

*A dissertação de **mestrado em engenharia geotécnica e geoambiente** (MEGG) foi apresentada e defendida em prova pública, por **Camila Afonso dos Santos**, no Auditório de Geotecnia do Departamento de Engenharia Geotécnica (ISEP) em 9 de outubro de 2019 mediante o júri nomeado, em que foi atribuída, por unanimidade, a classificação final de **17 (dezassete) valores**, cuja fundamentação se encontra em acta. Todas as correções pontuais determinadas pelo júri, e só essas, foram efectuadas.*

Dedico esta tese à memória da minha doce avó Maria de Nazaré dos Santos que sempre será meu maior exemplo de dedicação, amor e carinho.

Agradecimentos

São devidos agradecimentos a todos aqueles que me apoiaram e contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho, aos quais quero expressar os meus sinceros agradecimentos. Em particular, agradeço:

À minha orientadora, Professora Doutora Maria Manuela Martins de Carvalho e ao supervisor do estágio, Professor Doutor Adriano Manuel da Silva Teixeira, por terem me norteado durante a execução deste trabalho, agregando conhecimentos técnicos e considerações indispensáveis para a conclusão do mesmo, por todos os ensinamentos, palavras de apoio e pela dedicação.

Ao Laboratório de Geotecnia e Materiais de Construção do CICCOPN, pela oportunidade de estágio, pela disponibilização do espaço e dos equipamentos utilizados durante a realização dos ensaios de caracterização. Ao Engenheiro Eduardo Neves, agradeço o apoio, a disponibilidade e toda partilha de conhecimentos. À Engenheira Joana Santos e ao Engenheiro Jorge Ribeiro, aos Técnicos de laboratório Maria José, Sandra Andrade, Fernando Barbosa, Óscar Carvalho, José Carlos e José Manuel agradeço o apoio durante o estágio.

À Universidade Federal do Tocantins pela oportunidade de realizar o mestrado por meio do afastamento para qualificação. Agradeço a todos servidores desta instituição que possibilitaram minha vinda a Portugal. Sinto muito orgulho por fazer parte dessa equipe.

A toda minha família que mesmo de longe sempre me apoiou e motivou. À minha mãe Maria das Graças, pelas palavras de conforto e incentivo que sempre me acalmam e dão força, por ser uma mãe tão companheira e amiga. Ao meu pai Carlos, por ser um pai amável, dedicado, por ser minha maior inspiração, um grande exemplo de profissional e por me ensinar desde muito cedo a importância do estudo e do trabalho. À minha irmã Carla, por estar do meu lado em todos os momentos da minha vida, torcendo pelo meu sucesso e por ser minha grande amiga. À minha doce e memorável avó Nazaré, que partiu em março deste ano e que sempre será parte importante de tudo que sou e conquistei.

A todos meus amigos do Brasil que nestes dois anos que estive longe de casa sempre estiveram presente, me incentivando e animando. Às amigas construídas em Portugal, por serem minha segunda família e meu maior suporte ao longo destes anos.

A todos vocês, muito obrigada!

Palavras-chave

Solos; normalização; ensaios; massa volúmica; distribuição granulométrica.

Resumo

Os solos são amplamente utilizados tanto no suporte às fundações, quanto como material de escavação ou de construção, o que torna fundamental o estudo de suas propriedades e do seu desempenho. A caracterização de um terreno é realizada utilizando-se técnicas de prospeção geotécnica e recorrendo-se aos ensaios *in situ* e/ou aos ensaios de laboratório, dependendo da finalidade prevista para o uso do solo. Estas atividades devem ser executadas de acordo com normas técnicas que definem a metodologia a ser empregada em cada um desses procedimentos. Recentemente, novas normas europeias de caracterização dos solos estão sendo implementadas, com o objetivo de desenvolver metodologias comparáveis nos diferentes países da União Europeia. Este trabalho apresenta um estudo das principais alterações na nova normalização para os ensaios de determinação da massa volúmica das partículas e determinação da distribuição granulométrica dos solos. Neste estudo, para avaliar o impacto das novas metodologias de ensaio na rotina dos laboratórios e nos resultados obtidos, foram realizados cerca de 230 ensaios laboratoriais e utilizados dois tipos de solos, um solo residual granítico e um solo argiloso de natureza caulinítica. A partir destes ensaios foi possível verificar que na maioria das situações as modificações introduzidas pelas novas metodologias de ensaio não introduzem alterações significativas nos resultados obtidos; há, no entanto, determinados aspetos insuficientemente padronizados na nova normalização que não garantem a uniformidade das práticas de ensaio, nem a precisão fundamental nestes tipos de determinações, pelo que deverão ser trabalhados e contemplados em futuras revisões das normas.

Keywords

Soils; standardization; laboratory testing; particle density; particle size distribution.

Abstract

Soil is widely used for supporting foundations and as an excavation or construction material, which makes the study of its properties and performance essential. Soil characterization is performed using geotechnical evaluation techniques and, depending on the intended purpose of the soil use, in situ and/or laboratory tests. These activities should be performed in accordance with technical standards that define the methodology to be applied in each of these procedures. Recently, new European soil characterization standards are being formulated and implemented with the purpose of developing comparable methodologies in the different countries of the European Union. This work presents a study of the main changes in the new standardization for the determination of particle density and the determination of particle size distribution. In this study, to evaluate the impact of the new standard methodologies on the routine of the laboratories and on the results obtained, about 230 laboratory tests were carried out and two soil types were used: a granitic residual soil and a kaolinitic clay soil. From these tests it was possible to verify that the modifications introduced by the new standardization do not introduce significant changes in the obtained results in most situations; there are, however, certain aspects, insufficiently standardized in the new normalization, which do not guarantee uniformity of testing practices or fundamental accuracy in these types of determinations. They should, therefore, be addressed in future standards revisions.

Índice

CAPÍTULO I - Introdução.....	7
1.1. Enquadramento geral.....	9
1.2. Objetivos e importância do tema.....	10
1.3. Apresentação da empresa	11
1.4. Organização do relatório.....	12
CAPÍTULO II – Estado da arte	15
2.1. Introdução.....	17
2.2. Nova normalização europeia para reconhecimento e ensaios geotécnicos.....	17
2.3. O solo.....	19
2.3.1. Massa volúmica das partículas.....	23
2.3.2. Granulometria	28
CAPÍTULO III – Massa Volúmica das Partículas	33
3.1. Introdução.....	35
3.2. Equipamentos	36
3.2.1. Equipamentos de uso geral.....	36
3.2.1. Equipamentos para medição de volume de líquido deslocado	37
3.3. Metodologia de ensaio.....	38
3.3.1. Medições de referência.....	38
3.3.2. Preparação do provete.....	39
3.3.3. Execução do ensaio	39
3.3.4. Resultados do ensaio.....	41
3.4. Apresentação dos resultados.....	43
3.4.1. Solo A.....	43
3.4.2. Solo B.....	45
3.5. Análise e discussão dos resultados obtidos	47
3.5.1. Solo A.....	48
3.5.2. Solo B.....	50
3.5.3. Conclusão	52
CAPÍTULO IV – Análise Granulométrica	53
4.1. Introdução.....	55
4.2. Equipamentos	57
4.2.1. Equipamentos de uso geral.....	57
4.2.2. Método da peneiração.....	58
4.2.3. Sedimentação pelo método do densímetro	59
4.3. Metodologia de ensaio.....	61
4.3.1. Método de peneiração.....	61
4.3.2. Sedimentação pelo método do densímetro	66
4.3.3. Ensaio combinados	73
4.4. Apresentação dos resultados.....	73
4.4.1. Solo A.....	74
4.4.2. Solo B.....	83
4.5. Análise e discussão dos resultados obtidos	92
4.5.1. Solo A.....	92
4.5.2. Solo B.....	98
CAPÍTULO V – Outras atividades desenvolvidas	106
CAPÍTULO VI – Considerações Finais.....	111
6.1. Conclusões.....	113
6.1.1. Massa volúmica	113
6.1.2. Análise granulométrica	113
6.2. Desenvolvimentos futuros	114

Referências Bibliográficas	117
ANEXOS	121
ANEXO I – Folhas de registro da determinação da massa volúmica das partículas (EN ISO 17892-3:2015).	123
ANEXO II – Folhas de registro da determinação da distribuição granulométrica (EN ISO 17892-4:2016).	134

Índice de figuras

Figura 1 – Formas das partículas grossas dos solos. Fonte: Adaptado de MURTHY (2002).	20
Figura 2 – Composição do solo no estado natural. Fonte: VARELA (2011).....	21
Figura 3 – Três fases do elemento de solo. Fonte: VARELA (2011).....	22
Figura 4 – Empacotamento dos grãos de tamanho uniforme: (a) Estado solto; (b) Estado compacto. Fonte: Murthy (2002).....	26
Figura 5 – Exemplos de curvas granulométricas. Fonte: Fernandes (2011).	30
Figura 6 – Diferentes tipos de granulometria. Fonte: Adaptado de Caputo (1988).	30
Figura 7 – Equipamentos de uso geral para ensaio de determinação da massa volúmica das partículas.....	37
Figura 8 – Equipamentos para medição de volume de líquido deslocado.	38
Figura 9 – Solo B – Provete previamente seco em estufa. a) partículas ao emergirem para a parte superior do picnómetro; b) partículas após a sua remoção.	40
Figura 10 – Massa volúmica – Solo A – Método A (provete seco em estufa).....	44
Figura 11 – Massa volúmica – Solo A – Método B (provete húmido).....	45
Figura 12 – Massa volúmica – Solo B – Método A (provete seco em estufa).....	46
Figura 13 – Massa volúmica – Solo B – Método B (provete húmido).	47
Figura 14 – Equipamentos de uso geral para ensaio de análise granulométrica.....	58
Figura 15 – Principais equipamentos e materiais utilizados para o ensaio por peneiração.	59
Figura 16 – Principais equipamentos e materiais utilizados para o ensaio de sedimentação pelo método do densímetro.	60
Figura 17 – Curvas granulométricas obtidas para o ensaio P_A.....	75
Figura 18 – Curvas granulométricas obtidas para o ensaio Sv_A.	76
Figura 19 – Curvas granulométricas obtidas para o ensaio PSv_2_A.	76
Figura 20 – Curvas granulométricas obtidas para o ensaio PSv_2_A – Gráfico ajustado.	77
Figura 21 – Curvas granulométricas obtidas para o ensaio Ss_A.....	78
Figura 22 – Curvas granulométricas obtidas para o ensaio PSs_2_A.....	78
Figura 23 – Curvas granulométricas obtidas para o ensaio PSs_2_A - Gráfico ajustado.	79
Figura 24 – Curvas granulométricas obtidas por peneiração – Ensaio PSv_1_A.	80
Figura 25 – Curvas granulométricas obtidas para o ensaio PSv_1_A.	80
Figura 26 – Curvas granulométricas obtidas para o ensaio PSv_1_A – Gráfico ajustado.	81
Figura 27 – Curvas granulométricas obtidas por peneiração – Ensaio PSs_1_A.	82
Figura 28 – Curvas granulométricas obtidas para o ensaio PSs_1_A.....	82
Figura 29 - Curvas granulométricas obtidas para o ensaio PSs_1_A - Gráfico ajustado.....	83
Figura 30 – Curvas granulométricas obtidas para o ensaio P_B.	84
Figura 31 – Curvas granulométricas obtidas para o ensaio Sv_B.....	85
Figura 32 – Curvas granulométricas obtidas para ensaio PSv_2_B.	85
Figura 33 – Curvas granulométricas obtidas para ensaio PSv_2_B – Gráfico ajustado.	86
Figura 34 – Curvas granulométricas obtidas para ensaio Ss_B.....	87
Figura 35 – Curvas granulométricas obtidas para ensaio PSs_2_B.....	87
Figura 36 – Curvas granulométricas obtidas para ensaio PSs_2_B – Gráfico ajustado.	88
Figura 37 – Curvas granulométricas obtidas por peneiração – Ensaio PSv_1_B.	89
Figura 38 – Curvas granulométricas obtidas para o ensaio PSv_1_B.	89
Figura 39 – Curvas granulométricas obtidas para o ensaio PSv_1_B – Gráfico ajustado.	90
Figura 40 – Curvas granulométricas obtidas por peneiração – Ensaio PSs_1_B.....	91
Figura 41 – Curvas granulométricas obtidas para o ensaio PSs_1_B.....	91
Figura 42 – Curvas granulométricas obtidas para o ensaio PSs_1_B – Gráfico ajustado.	92
Figura 43 – Curvas médias obtidas para os Ensaios Sv_A e Ss_A.....	95
Figura 44 – Comparação entre as curvas granulométricas obtidas pela fração que passa através dos peneiros para os ensaios P_A, PSv_1_A e PSs_1_A.	97

Figura 45 – Comparação entre as curvas granulométricas médias obtidas utilizando o mesmo provete e preparação e utilizando provetes e preparações diferentes.....	98
Figura 46 – Curvas médias obtidas para os Ensaios Sv_B e Ss_B.....	101
Figura 47 – Comparação entre as curvas granulométricas obtidas pela fração que passa através dos peneiros para os ensaios P_B, PSv_1_B e PSs_1_B.....	102
Figura 48 – Comparação entre as curvas granulométricas obtidas utilizando o mesmo provete e preparação e utilizando provetes e preparações diferentes – Solo B.	103
Figura 49 – Curva granulométrica obtida para o Solo B utilizando a E 196:1966.....	104
Figura 50 – Comparação entre as curvas granulométricas obtidas pela E 196:1966 e pela EN ISO 17892-4:2016 – Solo B.....	105

Índice de Tabelas

Tabela 1 – Classificação dos solos granulares quanto à compactidade. Fonte: Fernandes (2011)...	27
Tabela 2 – Classificação dos solos argilosos quanto à consistência. Fonte: Fernandes (2011).	28
Tabela 3 - Massa volúmica da água destilada ou desionizada a várias temperaturas, corrigida para a pressão de 1 atm. Fonte: EN ISO 17892-3:2015.....	42
Tabela 4 – Massa volúmica – Solo A – Método A (provetete seco em estufa).	44
Tabela 5 – Massa volúmica – Solo A – Método B (provetete húmido).	45
Tabela 6 – Massa volúmica – Solo B – Método A (provetete seco em estufa).	46
Tabela 7 – Massa volúmica – Solo B – Método B (provetete húmido).	47
Tabela 8 – Diferença entre os valores máximos e mínimos de massa volúmica determinados para o solo A.....	48
Tabela 9 - Comparação entre os métodos A (provetete seco em estufa) e B (provetete húmido) para o solo A.....	49
Tabela 10 - Comparação entre os valores obtidos para as diferentes formas de retirada do ar aprisionado nos provetes – Solo A.....	49
Tabela 11 – Diferença entre os valores máximos e mínimos de massa volúmica determinados para o solo B.....	50
Tabela 12 - Comparação entre os métodos A (provetete seco em estufa) e B (provetete húmido) para o solo B.....	51
Tabela 13 - Comparação entre os valores obtidos para as diferentes formas de retirada do ar aprisionado nos provetes – Solo B.....	52
Tabela 14 - Designação dos ensaios de análise granulométrica.....	56
Tabela 15 - Massas mínimas recomendadas para peneiração. Fonte: EN ISO 17892-4:2016.....	62
Tabela 16 - Massas máximas de solo retidas em cada peneiro. Fonte: EN ISO 17892-4:2016.....	63
Tabela 17 - Viscosidade dinâmica da água. Fonte: EN ISO17892-4:2016.....	72
Tabela 18 – Ensaio P_A.....	74
Tabela 19 – Ensaio Sv_A.....	75
Tabela 20 – Ensaio Ss_A.....	77
Tabela 21 – Ensaio PSv_1_A.....	79
Tabela 22 – Ensaio PSs_1_A.....	81
Tabela 23 – Ensaio P_B.....	83
Tabela 24 – Ensaio Sv_B.....	84
Tabela 25 – Ensaio Ss_B.....	86
Tabela 26 – Ensaio PSv_1_B.....	88
Tabela 27 – Ensaio PSs_1_B.....	90
Tabela 28 – Desvio padrão – Solo A.....	93
Tabela 29 – Comparação entre os valores obtidos para os ensaios Sv_A e Ss_A.....	94
Tabela 30 - Comparação da fração que passa através do peneiro de 0,063mm entre o ensaio P_A e os ensaios PSv_1_A e PSs_1_A.....	96
Tabela 31 – Desvio padrão – Solo B.....	99
Tabela 32 – Comparação entre os valores obtidos para os ensaios Sv_B e Ss_B.....	100
Tabela 33 - Comparação da fração que passa através do peneiro de 0,063mm entre o ensaio P_B e os ensaios PSv_1_B e PSs_1_B.....	102
Tabela 34 - Análise granulométrica pela E 196:1966 - Solo B.....	104

Capítulo I

Introdução

1.1. Enquadramento geral

Os solos são materiais naturais, advindos das rochas por intemperismo físico ou químico. As propriedades do solo são determinadas pelos minerais que constituem a sua rocha mãe e dependem também do tamanho, forma e composição química dos seus grãos (Das, 2007). Os solos que permanecem no local da rocha de origem, sendo possível observar uma transição gradual da rocha até o solo, designam-se como residuais. Quando o solo sofre a ação de agentes transportadores, como água, vento, gravidade, ou geleiras, são designados como solos sedimentares (Caputo, 1988).

Por ser um material durável e disponível em todo mundo, o solo é amplamente utilizado tanto no suporte às fundações, quanto como material de escavação ou de construção. Dessa forma, o estudo de suas propriedades e do seu desempenho é fundamental para caracterizá-lo e para verificar a sua aptidão para construção, além de garantir a segurança e economia do empreendimento.

Na Geotecnia, o estudo das propriedades dos solos é feito por meio da caracterização geológico-geotécnica. A caracterização de um terreno é realizada utilizando-se técnicas de prospeção geotécnica e recorrendo-se aos ensaios *in situ* e aos ensaios de laboratório. Dentre os ensaios laboratoriais pode-se destacar a determinação da massa volúmica, a análise granulométrica, os limites de consistência, o teor em água, a permeabilidade, a consolidação, a capacidade de carga, entre outros, dependendo da finalidade prevista para o solo. Estas atividades devem ser executadas de acordo com normas técnicas que definem a metodologia a ser empregada para cada um desses procedimentos.

Em Portugal, a normalização para a realização dos ensaios de laboratório em solos existe há um longo período de tempo. Recentemente, novas normas europeias estão sendo formuladas e implementadas, com o objetivo de desenvolver metodologias para caracterização dos solos comparáveis nos diferentes países da União Europeia. Estas normas são adotadas obrigatoriamente por todos os países membros do Comité Europeu de Normalização (CEN). O CEN é uma associação que reúne os organismos nacionais de normalização de 34 países membros, entre eles Portugal, e tem como responsabilidade o desenvolvimento e definição de normas voluntárias a nível europeu em um vasto leque de domínios e setores, incluindo entre eles a construção civil (CEN, 2019).

No caso dos solos, uma das novas normas europeias a aplicar é a EN ISO 17892:2014, que possui como título geral “Reconhecimento e ensaios geotécnicos – Ensaios de laboratório em solos”, é

composta por doze partes e em breve terá seu uso obrigatório em Portugal. Cada um dessas partes corresponde a um ensaio para determinação de uma propriedade do solo, sendo elas:

- Parte 1 – Determination of water content;
- Parte 2 – Determination of bulk density;
- Parte 3 – Determination of particle density;
- Parte 4 – Determination of particle size distribution;
- Parte 5 – Incremental loading oedometer test;
- Parte 6 – Fall cone test;
- Parte 7 – Unconfined compression test on fine-grained soils;
- Parte 8 – Unconsolidated undrained triaxial test;
- Parte 9 – Consolidated triaxial compression tests on water-saturated soils;
- Parte 10 – Direct shear tests;
- Parte 11 – Determinations of permeability by constant and falling head;
- Parte 12 – Determination of Atterberg limits.

Nesta presente data, apenas as quatro primeiras partes já foram traduzidas para o português.

1.2. Objetivos e importância do tema

Os laboratórios responsáveis por executarem os ensaios geotécnicos deverão adaptar-se às mudanças advindas da nova normalização. Sendo essencial a análise dos impactos causados nos resultados dos ensaios devido às novas metodologias. As informações obtidas por estes procedimentos são de fundamental importância para definição de projetos geotécnicos e para garantia de segurança e economia da obra.

Este relatório de estágio, desenvolvido no âmbito da unidade curricular DIPRE (Dissertação/Projeto/Estágio) do segundo ano do Mestrado em Engenharia Geotécnica e Geoambiente do Instituto Superior de Engenharia do Porto, tem como objetivo analisar a interferência das principais alterações na nova normalização para caracterização dos solos nos resultados obtidos, com enfoque na determinação da massa volúmica das partículas e na determinação da distribuição granulométrica.

Para atingir tal objetivo, foi realizada uma revisão bibliográfica dos principais assuntos concernentes ao tema, seus princípios e as metodologias de ensaio, foram realizados trabalhos experimentais no Laboratório de Geotecnia e Materiais de Construção (LGMC) do Centro de Formação Profissional da Indústria da Construção Civil e Obras Públicas do Norte (CICCOPN), sendo os resultados obtidos interpretados e discutidos, tirando-se as principais conclusões.

Os trabalhos experimentais realizados no LGMC do CICCOPN foram incluídos no âmbito de um Estágio Curricular ao abrigo do protocolo de cooperação entre o Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP) e o CICCOPN. O estágio teve duração de cinco meses, de fevereiro a julho de 2019, em horário laboral.

No decurso deste estágio foram realizados ensaios de determinação da massa volúmica das partículas e de determinação da distribuição granulométrica para dois tipos de solo, um solo residual granítico (solo A) e um solo argiloso de natureza caulínica (solo B), avaliando a influência das alterações realizadas na metodologia dos ensaios nos resultados obtidos. Foi possível ainda realizar outras atividades de formação e experimentação que também serão incluídas no presente relatório de estágio.

Os ensaios de determinação da massa volúmica e de análise granulométrica por sedimentação requerem muita atenção e cuidados durante as suas execuções, uma vez que são ensaios mais delicados em que qualquer erro durante o procedimento pode alterar o resultado final. Diante disso, os ensaios realizados totalizaram duzentas repetições para determinação de massa volúmica, oito repetições para a determinação da distribuição granulométrica por peneiração e vinte repetições para determinação da distribuição granulométrica por sedimentação.

1.3. Apresentação da empresa

O Centro de Formação Profissional da Indústria da Construção Civil e Obras Públicas do Norte (CICCOPN) foi criado em 24 de julho de 1981 por protocolo entre o Fundo de Desenvolvimento da Mão-de-Obra, atual Instituto do Emprego e Formação Profissional (IEFP), e a Associação dos Industriais da Construção Civil e Obras Públicas (AICCOPN). O CICCOPN tem como missão a formação profissional para a valorização dos recursos humanos do setor da construção civil e obras públicas, por meio de ações para jovens e adultos candidatos a emprego qualificado. Desenvolve também serviço técnico laboratorial para diversas obras e empreendimentos através do Laboratório de Geotecnia e Materiais de Construção (LGMC) (CICCOPN, 2019).

O LGMC é um laboratório aberto ao setor, instituindo uma ligação direta com as empresas de construção civil e outras entidades. Com um quadro de profissionais com elevada capacidade

técnica, realiza ensaios de laboratório e campo, além de ações de formação para profissionais nas áreas dos materiais de construção e geotecnia, com um plano de formação anual que reflete as necessidades do mercado.

Este laboratório está acreditado pelo Instituto Português de Acreditação (IPAC) com o nº L0154 para um número de 50 ensaios nas diversas áreas de atividade. São estas áreas: materiais de construção, solos (geotecnia de fundações e geotecnia rodoviária), produtos betuminosos, sondagens e prospeção, química, patologia dos materiais de construção e pedra natural (CICCOPN, 2019).

1.4. Organização do relatório

Este relatório de estágio encontra-se organizado em seis capítulos, bibliografia e anexos. Nestes capítulos são relatadas as atividades realizadas ao longo do estágio curricular. A seguir estão apresentados cada um dos capítulos:

- Capítulo 1 – Introdução: Neste capítulo faz-se um enquadramento geral do tema, descrevendo sua importância e objetivos pretendidos, apresentação da empresa onde o estágio foi realizado e a organização do relatório.
- Capítulo 2 – Estado da arte: No segundo capítulo é apresentada a revisão bibliográfica com todos os aspetos científicos relevantes ao tema.
- Capítulo 3 – Massa volúmica: Neste capítulo descreve-se a metodologia, materiais e equipamentos adotados para determinação da massa volúmica dos diferentes solos ensaiados com os diferentes métodos para remoção do ar aprisionado nos provetes. Apresentam-se também os resultados obtidos, com sua interpretação.
- Capítulo 4 – Distribuição granulométrica: Este capítulo apresenta a metodologia, materiais e equipamentos adotados para determinação da distribuição granulométrica dos diferentes solos ensaiados. Apresentam-se também os resultados obtidos, com sua interpretação.
- Capítulo 5 – Outras atividades desenvolvidas: No quinto capítulo são abordados todos os outros procedimentos e atividades desenvolvidas ao longo do estágio curricular no LGMC.
- Capítulo 6 – Considerações finais: Neste capítulo estão descritas as conclusões definidas a partir dos resultados obtidos nos ensaios, bem como as propostas para trabalhos futuros com objetivo de concretizar os objetivos traçados.

Por fim, são apresentados a bibliografia utilizada e os anexos com os dados experimentais e cálculos executados durante o desenvolvimento desta pesquisa.

Capítulo II

Estado da arte

2.1. Introdução

Em qualquer projeto de engenharia é fundamental a realização de um programa de investigação do terreno com o objetivo de determinar a extensão e a profundidade das formações, descrever o solo e suas características, determinar a profundidade do nível freático, obter informações quanto à profundidade da superfície rochosa e suas propriedades mecânicas, avaliando assim a adequação do local para o projeto proposto e detetando os possíveis problemas que possam surgir durante a construção. A definição do tipo de método adotado e a amplitude da prospeção dependem basicamente da finalidade e dimensão da obra, das características do terreno, da experiência e práticas locais e do orçamento disponível.

Os métodos podem ser divididos em dois grupos, os métodos diretos que permitem a observação direta do subsolo ou por meio de amostras coletadas ao longo da perfuração, em que se podem destacar as sondagens, e os métodos indiretos em que as propriedades são estimadas de forma indireta pela observação ou medidas de grandezas físicas do solo, em que se destacam os métodos geofísicos.

As amostras coletadas em campo são utilizadas para inspeção visual direta das características do solo e para a realização de ensaios em laboratório que definam suas propriedades físicas e mecânicas. Esses parâmetros são empregados para o dimensionamento de fundações e para determinar o uso do solo como material de construção. As principais propriedades físicas de um solo a serem definidas em laboratório são: o teor em água, a densidade/massa volúmica das partículas, a distribuição granulométrica, os índices de consistência, a compactação e a permeabilidade. Com ensaios em laboratório ainda é possível determinar propriedades mecânicas, relativas à deformabilidade, estado de tensões e resistência do solo.

Os procedimentos para execução dos ensaios estão definidos em normas técnicas que garantem a padronização e confiabilidade necessária para estas atividades. Portugal, por fazer parte do Comité Europeu de Normalização (CEN), em breve deverá se adequar à nova normalização para reconhecimento e ensaios geotécnicos desenvolvida pelo CEN nos últimos anos.

Neste sentido, o presente capítulo apresenta uma revisão bibliográfica relativa à nova normalização e as principais propriedades do solo influenciadas por esta alteração.

2.2. Nova normalização europeia para reconhecimento e ensaios geotécnicos

A nova normalização europeia para reconhecimento e ensaios geotécnicos – ensaios de laboratório em solos, EN ISO 17892:2014, foi elaborada com o intuito de substituir e atualizar a normalização atualmente utilizada para o reconhecimento do terreno. Esta nova normalização

reflete o avanço do conhecimento científico e pretende uniformizar as práticas de ensaio nos diferentes países europeus pertencentes ao Comité Europeu de Normalização (CEN). Em breve terá carácter obrigatório em Portugal, substituindo um conjunto de normas que são utilizadas há décadas no país.

Em sua tese de mestrado, Martins (2018) realizou um análise comparativa entre a normalização atualmente utilizada em Portugal e a nova normalização europeia para os ensaios de determinação do teor em água, da massa volúmica das partículas, da distribuição granulométrica e dos limites de consistência, com o objetivo de analisar as diferenças entre os resultados obtidos entre cada uma das metodologias e para determinar os investimentos necessários com relação à aquisição de equipamentos. Após realizar os ensaios e analisar os resultados, concluiu-se que os métodos e os resultados obtidos eram bastante semelhantes para os ensaios de determinação do teor em água e de determinação dos limites de consistência, apresentando apenas pequenas diferenças nos equipamentos e metodologias a serem utilizados.

Com relação ao ensaio de determinação da massa volúmica das partículas, ao comparar a norma utilizada em Portugal, NP-83:1965, com a nova normalização, EN ISO 17892-3:2015, observou-se a necessidade de aquisição de alguns equipamentos como, por exemplo, banho-maria e picnómetro de 50 ml.

Relativo à metodologia, a norma atual prevê um provete de no mínimo 25 g de massa seca, não mencionando a necessidade de banho-maria em nenhuma fase e definindo que o provete deveria repousar dentro do picnómetro, coberto até cerca de três quartos da capacidade com água destilada, pelo menos 12 h, antes de extrair-se o ar na bomba de vácuo, sendo os valores de pressões de vácuo, o tempo de aplicação e ebulição definidos em norma. A nova normalização prevê um provete com pelo menos 10 g de massa seca, define que o picnómetro deve ir para o banho-maria pelo menos 1 h para que a temperatura seja controlada na fase de calibração do picnómetro e na determinação da massa volúmica das partículas, mas não faz menção ao procedimento de repouso por 12 h, nem especifica a forma de remoção do ar.

Martins (2018) concluiu que os valores de massa volúmica das partículas obtidos pela nova normalização são ligeiramente inferiores aos obtidos pela antiga norma, tanto para o método com provetes secos em estufa quanto para o método com provetes húmidos. A metodologia e os equipamentos utilizados foram levemente alterados, podendo a diferença nos resultados estar relacionadas com o fato da nova norma não especificar a forma de remoção do ar aprisionado no provete.

Diante disso, é fundamental que seja feita a análise desta propriedade e a influência nos resultados das diferentes técnicas para sua determinação. A correta percepção dos fatores que determinam a massa volúmica de um solo são essenciais para garantir a confiabilidade dos resultados obtidos.

Para o ensaio de determinação da distribuição granulométrica, atualmente utiliza-se como normas de referência a LNEC E239:1970 e E 196:1966, precedidas pela aplicação da especificação LNEC E 195:1966 para a preparação do provete. A nova norma, EN ISO 17892-4:2016, define todos os procedimentos em apenas um documento, estipulando diferentes métodos de ensaio dependendo do tipo amostra.

Na determinação da distribuição granulométrica com o método da peneiração há diferenças tanto em relação às aberturas dos peneiros a serem utilizados como nas metodologias de preparação da amostra e execução do ensaio. No entanto, constatou-se que os resultados finais obtidos são bastante semelhantes. Para o método de determinação da distribuição granulométrica por sedimentação, as diferenças entre as normas estão principalmente relacionadas com as características do antifloculante e do densímetro especificados para serem utilizados na preparação da amostra e na execução do ensaio, respetivamente. A nova norma também não especifica o tempo exato para a agitação da suspensão com o agente dispersante que possui composição e concentração diferentes das utilizadas na norma antiga. Ademais, houve alteração dos tempos de leitura durante o processo de sedimentação, passando de três para dois dias, mas iniciando aos 30 s ao invés do 1 min da norma antiga.

2.3. O solo

Para a engenharia civil, o solo é qualquer acúmulo não cimentado ou fracamente cimentado de partículas minerais formado pelo intemperismo das rochas. A cimentação pode ser devido à carbonatos ou óxidos precipitados entre as partículas ou devido à matéria orgânica. Se os produtos do intemperismo nas rochas permanecerem em sua localização original, eles constituem um solo residual. Se os produtos forem transportados e depositados em um local diferente, eles constituem um solo sedimentar, sendo os agentes transportadores a gravidade, o vento, a água, e as glerias. Durante o transporte, o tamanho e a forma das partículas podem sofrer alterações, podendo ser classificadas de acordo com faixas de tamanho específicas (Craig & Knappett, 2012).

Uma descrição abrangente do solo deve incluir características do material que o constitui e da massa do solo *in situ*. As características do material podem ser determinadas a partir de amostras perturbadas do solo, isto é, aquelas que possuem a mesma distribuição de tamanho de partícula

que o solo *in situ*, mas em que a estrutura não foi preservada. As principais características para se deduzir o nome do solo são a distribuição do tamanho da partícula e a plasticidade, estas propriedades são definidas por testes laboratoriais padrões que serão descritos nas próximas seções. As características secundárias do material são a cor, a forma, a textura e composição das partículas do solo (Craig & Knappett, 2012).

As designações e as características dos solos variam de acordo com o tamanho das suas partículas. Podendo ser classificados como bloco ou calhaus quando as partículas forem maiores que 60 mm, seixos ou cascalhos quando as partículas se encontram entre 2 mm e 60 mm, areia quando as dimensões das partículas são entre 0,06 mm e 2 mm, siltes quando estão entre 0,002 mm e 0,06 mm e como argilas quando as partículas são inferiores a 0,002 mm (Fernandes, 2011). Para determinar o tamanho das partículas do solo e respetiva distribuição ponderal realiza-se o ensaio para determinação da distribuição granulométrica.

As frações mais grossas do solo consistem nos calhaus, cascalhos e areias. As partículas individuais de calhaus e cascalhos, que são nada além de fragmentos de rocha, mais ou menos rolados, são compostos por um ou mais minerais, enquanto os grãos de areias são normalmente monominerálicos e predominantemente silicatados. Os grãos de calhaus, cascalho e areia podem ser angulares, subangulares, sub-arredondados, arredondados ou bem arredondados, como mostrado na Figura 1. O cascalho pode conter ainda grãos com forma plana. Algumas areias contêm percentagem bastante alta de partículas de mica que concedem-lhe elasticidade. O silte e a argila constituem as frações mais finas do solo, geralmente qualquer grão desta fração é constituído por apenas um mineral. As partículas podem ser angulares, em forma de flocos ou, por vezes, semelhante a agulhas (Murthy, 2002).

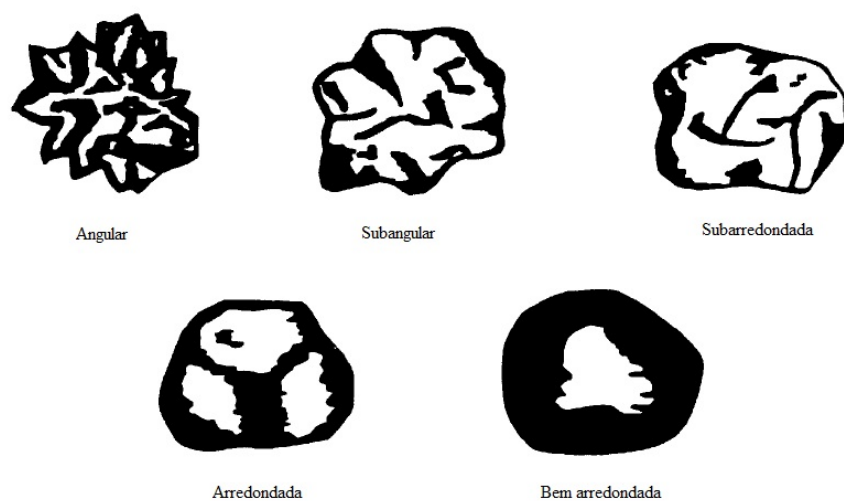


Figura 1 – Formas das partículas grossas dos solos. Fonte: Adaptado de MURTHY (2002).

A forma das partículas possui grande influência nas propriedades físicas do solo como, por exemplo, máximo e mínimo índice de vazios, parâmetros da resistência ao cisalhamento, compressibilidade, entre outros.

As características do depósito de solo *in situ* devem idealmente ser determinadas no campo, mas em muitos casos podem ser inferidas a partir de amostras não perturbadas, ou seja, amostras em que a estrutura do solo foi preservada. Uma descrição das características do depósito deve incluir uma avaliação do estado de compactação *in situ* (solos de grão grosso) ou rigidez (solos de grão fino), e detalhes de qualquer tipo de discontinuidades e intemperismo. (Craig & Knappett, 2012).

É fundamental perceber a distinção entre descrição do solo e classificação do solo. A descrição do solo inclui detalhes das características do material e do depósito, sendo improvável que quaisquer dois solos apresentem a mesma descrição. No entanto, na classificação do solo, um solo é alocado a um grupo de um número limitado de grupos com base apenas nas características do material. A classificação do solo é, portanto, independente da condição *in situ* do solo. Se o solo for empregado em sua condição não perturbada, por exemplo, para suportar uma fundação, uma descrição completa do solo será adequada e a adição da classificação do solo será discricionária. No entanto, a classificação é particularmente útil se o solo em questão for usado como material de construção quando for remodelado - por exemplo, em um aterro. Os engenheiros também podem se basear em experiências passadas do comportamento de solos de classificação semelhante (Craig & Knappett, 2012).

Solos são materiais naturais multifásicos, sendo compostos por uma fase sólida, uma líquida e uma gasosa. Cada uma dessas fases influencia o comportamento do solo como um todo. A fase sólida pode ser formada por minerais, matéria orgânica, ou ambos. Os espaços entre os sólidos são chamados de vazios, sendo preenchido por gases e/ou líquidos, predominantemente água e ar. Se todos os vazios estiverem preenchidos por água, o solo está saturado. Caso contrário, o solo está insaturado. Se todos os vazios estiverem preenchidos por ar, o solo está seco (Budhu, 2011). Na Figura 2 está representada a composição de um solo, distinguindo-se as fases sólida, líquida e gasosa.

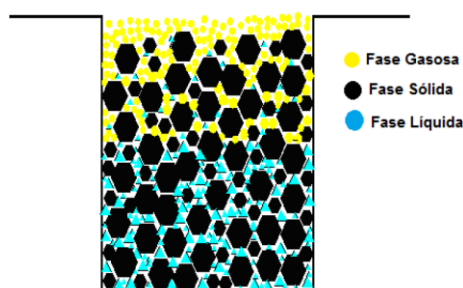


Figura 2 – Composição do solo no estado natural. Fonte: VARELA (2011).

Para deduzir as relações entre peso e volume, deve-se diferenciar as três fases, conforme representado na Figura 3. Assim, o volume total (V) de uma dada amostra de solo é determinado pela soma do volume de sólidos (V_s) com o volume de vazios (V_v) que consiste na soma do volume da água (V_w) e volume do ar (V_a) nos vazios. Assumindo-se que o peso do ar (W_a) é insignificante, o peso total (W) da amostra de solo é determinado pela soma do peso dos sólidos (W_s) mais o peso da água (W_w).

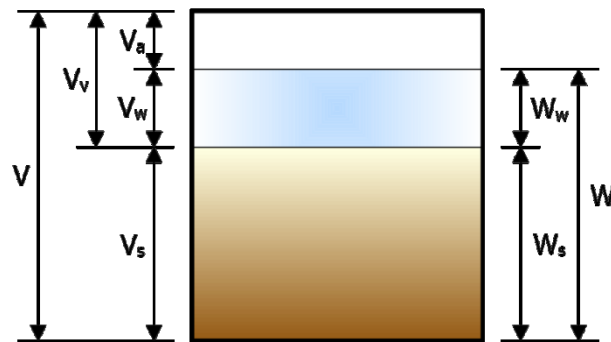


Figura 3 – Três fases do elemento de solo. Fonte: VARELA (2011).

As relações de volume mais empregadas são o índice de vazios, a porosidade e o grau de saturação. O índice de vazios (e) é a proporção do volume de vazios em relação ao volume de sólidos, conforme demonstrado na Equação (2.1). A porosidade (n) determina a proporção do volume de vazios em relação ao volume total, de acordo com a Equação (2.2). O grau de saturação (S_r) estabelece a proporção do volume de água em relação ao volume de vazios, conforme Equação (2.3) (Das, 2007).

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (2.1)$$

$$n = \frac{V_v}{V} \quad (2.2)$$

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} \quad (2.3)$$

Onde:

e = índice de vazios, adimensional;

n = porosidade, expressa em percentagem (%);

S_r = grau de saturação, expresso em percentagem (%);

V = Volume total, expresso em metro cúbico (m^3);

V_s = Volume de sólidos, expresso em metro cúbico (m^3);

V_v = Volume de vazios, expresso em metro cúbico (m^3);

V_w = Volume de água, expresso em metro cúbico (m^3).

As relações de peso mais utilizadas são o teor em água (ω) e o peso volúmico das partículas sólidas (γ_s). O teor em água é definido como a proporção entre o peso de água e o peso dos sólidos em um dado volume de solo, conforme expresso na Equação (2.4). O peso volúmico das partículas sólidas é o peso dos sólidos pelo volume dos sólidos, definido na Equação (2.5) e expresso em quilonewtons por metro cúbico (kN/m^3). Esta grandeza é comumente trabalhada como massa volúmica das partículas (ρ_s), expressa em quilogramas por metro cúbico (kg/m^3) e determinado de acordo com a Equação (2.6) (Das, 2007).

$$\omega = \frac{W_w}{W_s} \quad (2.4)$$

$$\gamma_s = \frac{W_s}{V_s} \quad (2.5)$$

$$\rho_s = \frac{m_s}{V_s} \quad (2.6)$$

Onde:

ω = teor em água, expresso em percentagem (%);

γ_s = peso volúmico das partículas sólidas, expresso em quilonewton por metro cúbico (kN/m^3);

ρ_s = massa volúmica das partículas sólidas, expressa em quilogramas por metro cúbico (kg/m^3);

W_w = Peso da água, expresso em quilonewton (kN);

W_s = Peso dos sólidos, expresso em quilonewton (kN);

V_s = Volume dos sólidos, expresso em metro cúbico (m^3);

m_s = massa dos sólidos, expresso em quilogramas (kg).

2.3.1. Massa volúmica das partículas

A massa volúmica das partículas do solo é definida como a relação entre a massa da substância sólida pelo volume ocupado por esta, sendo expressa no Sistema Internacional em quilogramas por metro cúbico (kg/m^3), conforme demonstrado anteriormente na Equação (2.6). Esta grandeza é definida experimentalmente por meio de ensaios laboratoriais. A nova norma que descreve o procedimento para a determinação da massa volúmica das partículas, EN ISO 17892-3:2015,

determina que os valores de massa volúmica devam ser expressos em megagrama por metro cúbico (Mg/m^3).

Cardoso (2002) correlacionou as propriedades físicas, químicas e mineralógicas dos solos do Distrito Federal no centro-oeste brasileiro por meio de diversos ensaios de laboratório e análises estatísticas. Cardoso (2002) descreve que a massa volúmica dos grãos depende unicamente da composição mineralógica do solo, estando a massa volúmica dos minerais entre $2300 \text{ kg}/\text{m}^3$ e $5300 \text{ kg}/\text{m}^3$. O que faz com que a massa volúmica das partículas do solo varie entre $2650 \text{ kg}/\text{m}^3$ e $2850 \text{ kg}/\text{m}^3$, geralmente. O valor varia de acordo com o tipo e composição do solo, decrescendo para solos com elevado teor de matéria orgânica e aumentando para solos ricos em óxido de ferro, por exemplo.

Existem diferentes metodologias para se determinar a massa volúmica das partículas de um solo no âmbito do reconhecimento geotécnico. Essas metodologias estão descritas em normas técnicas regulamentadas por órgãos de controlo. Em Portugal e em todos os outros países membros da CEN, o procedimento atualizado para a determinação deste parâmetro encontra-se descrito na norma europeia EN ISO 17892-3:2015. Esta norma descreve dois métodos, o método do picnómetro de volume de líquido deslocado e o método do picnómetro de volume de gás deslocado.

O primeiro pode ser aplicado em partículas de solos com dimensões menores a 4 mm ou em solos triturados que cumpram essa condição. No método do picnómetro de volume de gás deslocado, o tamanho das partículas de solos adequado para o ensaio depende das dimensões do picnómetro utilizado. As metodologias deste ensaio serão pormenorizadas nas próximas seções.

A determinação da massa volúmica das partículas não é suficiente para identificação do solo, porém é fundamental para sua caracterização, servindo de base para definição de outros parâmetros geotécnicos. A partir desse valor é possível estabelecer correlações com algumas propriedades, sendo a massa volúmica das partículas utilizada para diversos cálculos na mecânica dos solos.

A densidade das partículas pode ser determinada pela razão entre a massa da parte sólida e a massa de igual volume de água pura a $4 \text{ }^\circ\text{C}$, sendo a massa volúmica da água a $4 \text{ }^\circ\text{C}$ igual a $1000 \text{ kg}/\text{m}^3$. No entanto, a densidade é adimensional e a massa volúmica é expressa em quilogramas por metro cúbico (kg/m^3). A partir da massa volúmica das partículas (ρ_s) pode-se obter também o peso volúmico das partículas (γ_s) do solo, basta para isso multiplicar o valor da massa volúmica pela aceleração da gravidade (Caputo, 1988).

Para além da massa volúmica das partículas, pode-se determinar ainda a massa volúmica do solo (ρ), para isso divide-se a soma da massa de sólidos com a massa de água pelo volume total do solo, conforme apresentado na Equação (2.7). Diferente do que ocorre para a massa volúmica das partículas (ρ_s), esta grandeza varia de acordo com outras grandezas básicas descritivas do estado físico do solo. Por exemplo, quanto maior a porosidade e o índice de vazios, menor será a massa volúmica do solo. Quanto maior o teor em água, para um dado índice de vazios, maior a massa volúmica do solo.

$$\rho = \frac{m_s + m_w}{V} \quad (2.7)$$

Onde:

ρ = massa volúmica do solo, expressa em quilogramas por metro cúbico (kg/m^3);

m_w = massa da água, expresso em quilograma (kg);

m_s = massa dos sólidos, expresso em quilograma (kg);

V = Volume total, expresso em metro cúbico (m^3).

Nos solos granulares, a massa volúmica do solo (ρ) varia de acordo com a forma e o tamanho dos grãos, com a natureza mineralógica das partículas, com o empacotamento dos grãos e com o teor em água. Se todos os grãos forem considerados esferas de tamanho uniforme e empacotados conforme a Figura 4 (a), o índice de vazios dessa massa é de cerca de $e = 0,90$. No entanto, se os grãos estiverem empacotados conforme a Figura 4 (b), o índice de vazios da massa é de cerca de $e = 0,35$. O solo correspondente ao maior índice de vazios é chamado de solto e o com menor índice é chamado de compacto. Se os grãos do solo não são uniformes, então grãos menores preenchem o espaço entre os maiores e as razões de vazios de tais solos são reduzidas para tão baixo quanto $e = 0,25$, estado muito compacto. Se os grãos são angulosos, eles tendem a formar estruturas mais soltas do que o arredondado, porque suas bordas alongadas mantêm os grãos mais afastados. (Murthy, 2002).

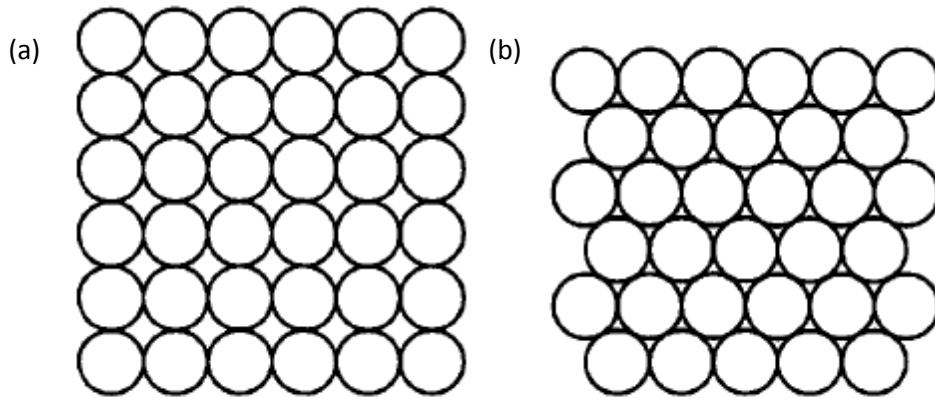


Figura 4 – Empacotamento dos grãos de tamanho uniforme: (a) Estado solto; (b) Estado compacto. Fonte: Murthy (2002).

Ainda de acordo com Murthy (2002), a mudança no índice de vazios altera a massa volúmica do solo e isso, por sua vez, modifica as características de resistência dos solos granulares. A relação entre os vazios e a massa volúmica pode ser usada para comparar as características de resistência de amostras de solos granulares de mesma origem.

O índice de compactidade (I_D) é expresso de acordo com a Equação (2.8), com base de índices de vazios. O índice de compactidade (I_D) compara o índice de vazios de ocorrência (e) e os valores máximo e mínimo que aquela grandeza pode assumir (Fernandes, 2011), podendo ser definido ainda em termos de massa volúmica, conforme a Equação (2.9) (Murthy, 2002).

$$I_D = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}} \times 100 \quad (2.8)$$

Sendo:

e_{max} = índice de vazios do solo granular em seu estado mais solto, com massa volúmica seca de ρ_{dmin} ;

e_{min} = índice de vazios do solo granular em seu estado mais compacto, com massa volúmica seca de ρ_{dmax} ;

e = índice de vazios de ocorrência, na condição *in situ*, com massa volúmica de ρ_d .

$$I_D = \frac{\rho_{dmax}}{\rho_d} \times \frac{\rho_{dmin}}{\rho_{dmax} - \rho_{dmin}} \times 100 \quad (2.9)$$

Em que:

ρ_{dmin} = massa volúmica seca do solo granular em seu estado mais solto, com índice de vazios e_{max} ;

ρ_{dmax} = massa volúmica seca do solo granular em seu estado mais compacto, com índice de vazios e_{min} ;

ρ = massa volúmica seca do solo na condição *in situ*, com índice de vazios e .

O índice de compactação varia de 0 a 100% e, a partir desta grandeza, podem-se classificar os solos granulares como soltos, médios ou compactos, de acordo com a Tabela 1. A importância desse parâmetro deve-se ao fato de fornecer indicações quanto à compressibilidade do solo, ou seja, é possível definir a maior ou menor suscetibilidade do solo em experimentar deformações volumétricas quando carregado. Pode-se concluir que quanto melhor graduado for o solo, menor será o índice de vazios que a compactação pode conferir e melhor será o seu comportamento diante das cargas atuantes (Fernandes, 2011).

Tabela 1 – Classificação dos solos granulares quanto à compactação. Fonte: Fernandes (2011).

Índice de compactação, I_p (%)	Tipo de areia
0-20	Muito solta
20-40	Solta
40-60	Medianamente compacta
60-80	Compacta ou Densa
80-100	Muito compacta ou muito densa

Os solos coesivos, em que ocorre um predomínio de partículas muito finas, são classificados de acordo com a sua consistência. A sua definição não é feita diretamente a partir do teor em água ou da massa volúmica das partículas, mas sim por meio dos limites Atterberg. Os limites de Atterberg (limite de retração, limite de plasticidade e limite de liquidez) são os três valores do teor em água que limitam as quatro zonas de comportamento dos solos (volume constante, friável, moldável e fluido). A partir da diferença entre o limite de liquidez (ω_L) e o limite de plasticidade (ω_P) obtém-se o índice de plasticidade (I_p) do solo, expresso em percentagem (Fernandes, 2011).

A consistência dos solos coesivos é determinada pela comparação do teor em água natural (ω) com os limites de Atterberg, denominado como índice de consistência (I_c) e expresso pela Equação (2.10). A partir desse índice os solos argilosos são classificados de acordo com a Tabela 2.

$$I_c = \frac{\omega_L - \omega}{I_p} \quad (2.10)$$

Sendo:

I_c = índice de consistência, adimensional;

ω_L = limite de liquidez, expresso em percentagem (%);

ω = teor em água, expresso em percentagem (%);

I_p = índice de plasticidade, expresso em percentagem (%).

Tabela 2 – Classificação dos solos argilosos quanto à consistência. Fonte: Fernandes (2011).

Índice de consistência, I_c	Tipo de argila
0,00 – 0,25	Muito mole
0,25 – 0,50	Mole
0,50 – 0,75	Média
0,75 – 1,00	Rija
> 1,00	Dura
<i>Nota:</i> O índice de consistência pode apresentar valores negativos para solos que se apresentem com comportamento líquido.	

2.3.2. Granulometria

Existem diferentes metodologias para a descrição do solo com base na distribuição do tamanho de suas partículas, cada uma desenvolvida para um uso específico desse material. Ou seja, a análise da distribuição granulométrica das partículas pode ser utilizada na engenharia para diversos fins como, por exemplo, a seleção de agregados para o betão, a definição de solos aptos para a construção de barragens e rodovias, o uso do solo como material para tratamento de outros solos, entre outros (Budhu, 2011).

A distribuição granulométrica é definida como a distribuição em percentagem ponderal das partículas do solo de acordo com as suas dimensões (Fernandes, 2011), representa uma das características físicas básicas do solo, devendo ser sempre determinada antes de qualquer outra, uma vez que a classificação do material será baseada principalmente na distribuição dos tamanhos das partículas. Essa propriedade prevê a descrição do solo de acordo com uma divisão da proporção em massa de partículas dentro dos diferentes intervalos de tamanho, sendo determinada por ensaios realizados em laboratório.

O solo é, habitualmente, formado por partículas de tamanhos variados. Conforme mencionado anteriormente, o solo pode ser classificado como bloco ou calhaus quando as partículas forem maiores que 60 mm, seixos ou cascalhos quando as partículas se encontram entre 2 e 60 mm, areia quando as dimensões das partículas são entre 0,06 e 2 mm, siltes quando estão entre 0,002 e 0,06 mm e como argilas quando as partículas são inferiores a 0,002 mm (Fernandes, 2011).

Para a determinação da distribuição granulométrica é realizado um ensaio que envolve o peneiramento e/ou a sedimentação das partículas. Para partículas de maiores dimensões o método convencional é o da peneiração, enquanto para as partículas de menores dimensões se adota, geralmente, o método da sedimentação (Fernandes, 2011).

O método de peneiração consiste em passar o material em uma série de peneiros e em seguida pesar o material retido em cada um desses peneiros, após o cálculo da percentagem de passados acumulados, essa percentagem que passa é representada em função da abertura do peneiro, num

gráfico semilogarítmico. A abertura do peneiro é considerada como o diâmetro equivalente da partícula, uma vez que as partículas não são esferas perfeitas. A determinação do diâmetro das partículas finas está limitada pela malha de abertura do menor peneiro empregado, geralmente o de 0,074 mm ou 0,063 mm, consoante à norma utilizada. Dessa forma, quando há interesse em determinar a distribuição granulométrica da fração fina do solo, deve-se prosseguir o ensaio aplicando a essa fração o método de sedimentação. Esse método baseia-se na Lei de Stokes, ou seja, baseia-se na velocidade de queda das partículas esféricas num fluido, que atinge um valor limite relacionado com a massa volúmica das partículas, a massa volúmica do fluido, a viscosidade do fluido e o diâmetro da partícula (Pinto, 2006).

O ensaio para determinação da análise granulométrica por sedimentação consiste basicamente na suspensão do provete a ser ensaiado numa solução dispersante que garante que todas as partículas assentam individualmente. Após agitação, a suspensão é colocada em repouso, sendo a densidade igual ao longo de toda a proveta de sedimentação. À medida que as partículas de maior dimensão vão assentando, a densidade vai diminuindo. As densidades são determinadas por meio de um densímetro, no qual as leituras são realizadas em intervalos de tempo definidos. Com base na Lei de Stokes é possível determinar o diâmetro equivalente das partículas (Craig & Knappett, 2012).

O procedimento para a realização desse ensaio será pormenorizado no Capítulo IV. No entanto, cabe salientar que um passo fundamental para sua correta execução consiste na dispersão das partículas de forma que elas consigam se sedimentar individualmente. No solo em condições naturais, as partículas geralmente encontram-se agregadas ou floculadas. Para que seja determinado o correto diâmetro das partículas isoladas, é essencial a utilização do agente dispersante e da agitação da suspensão (Pinto, 2006).

A análise granulométrica é representada por uma curva granulométrica traçada em um diagrama semilogarítmico. Os logaritmos das dimensões das partículas são marcados no eixo das abcissas, no eixo das ordenadas são marcadas as percentagens em peso do material que tem dimensão média menor que a dimensão considerada. Esse tipo de diagrama permite uma melhor representação da fração fina do solo. A Figura 5 apresenta alguns exemplos de curvas granulométricas. De acordo com a configuração da curva é possível identificar os diferentes tipos de granulometria (Caputo, 1988).

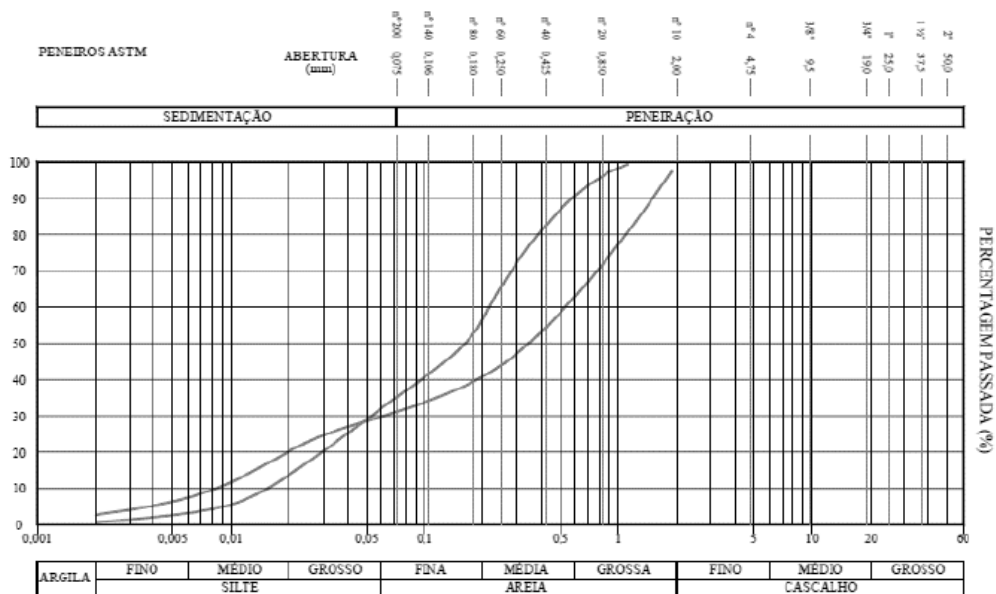


Figura 5 – Exemplos de curvas granulométricas. Fonte: Fernandes (2011).

De acordo com a curva granulométrica, o solo pode ser identificado como bem graduado ou mal graduado, dependendo da presença, ou não, de um predomínio das frações grossas e suficiente percentagem das frações finas. Essas diferentes graduações estão apresentadas na Figura 6.

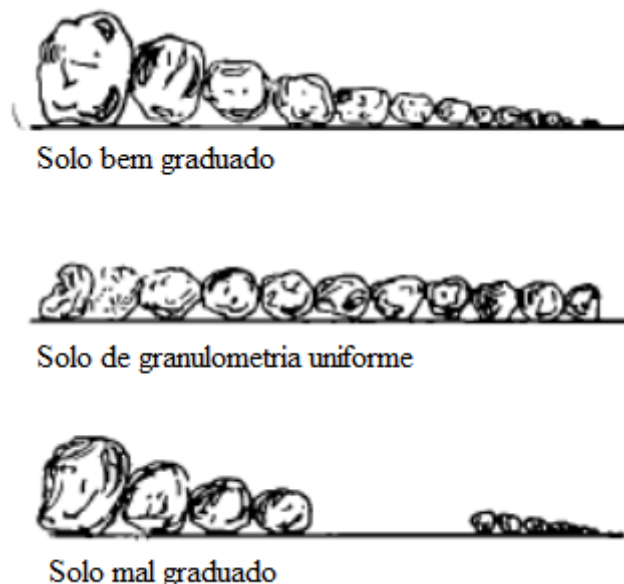


Figura 6 – Diferentes tipos de granulometria. Fonte: Adaptado de Caputo (1988).

A curva de distribuição granulométrica pode ser utilizada para determinar algumas grandezas que fornecem informações úteis sobre o solo, como por exemplo: o diâmetro efetivo (D_{10}), o coeficiente de uniformidade (C_u), o coeficiente de curvatura (C_c). O diâmetro efetivo é aquele que

na curva de distribuição granulométrica corresponde a 10 % em peso total das partículas mais finas (Das, 2007). O diâmetro efetivo de um solo granular é uma medida correlacionável com o coeficiente de permeabilidade do solo (Fernandes, 2011).

O coeficiente de uniformidade (C_u) é determinado pela razão entre o diâmetro correspondente a 60% em peso total das partículas mais finas (D_{60}) e o diâmetro efetivo (D_{10}), conforme a Equação (2.11). Esse parâmetro indica a uniformidade do material, dando uma ideia da variedade de dimensões que as partículas do solo possuem, assumindo menores valores para solos mais uniformes. São considerados muito uniformes os materiais com $C_u \leq 5$, de uniformidade média com $5 < C_u \leq 15$ e extensos com $C_u > 15$ (Caputo, 1988).

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (2.11)$$

O coeficiente de curvatura (C_c) é definido pela Equação (2.12). Onde D_{30} é o diâmetro das partículas de solo em que 30% das partículas são mais finas. O coeficiente de curvatura está entre 1 e 3 para solos bem graduados. Valores fora do alcance de 1 a 3 representam solos de graduação com ausência de certos tamanhos de partículas (Budhu, 2011).

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{60} \times D_{10}} \quad (2.12)$$

Segundo Fernandes (2011), os processos utilizados na análise granulométrica da fração fina do solo são passíveis de erros mais ou menos grosseiros. No entanto, como é nos solos mais grosseiros (granulares) que o comportamento é mais influenciado pela forma e dimensão dos grãos das partículas constituintes, este problema não assume particular relevância na maioria das situações.

Capítulo III

Massa Volúmica das Partículas

3.1. Introdução

Em Portugal a determinação da densidade das partículas vem sendo, há algumas décadas, realizada de acordo com a norma NP-83:1965. A nova normalização europeia proposta para determinar a massa volúmica das partículas constituintes dos solos está definida na norma EN ISO 17892-3:2015, com o título geral: “Reconhecimento e ensaios geotécnicos – Ensaios de laboratório em solos – Parte 3: Determinação da massa volúmica das partículas”. No presente trabalho, com o intuito de avaliar as condições de operação e os resultados obtidos com a aplicação desta nova norma (EN ISO 17892-3:2015), foram ensaiados dois tipos de solo, sobre os quais se fizeram várias determinações. Foi utilizado um solo residual granítico (Solo A) e um solo argiloso de natureza caulínica (Solo B).

A norma em estudo propõe dois métodos para execução do ensaio, o método do picnómetro de volume de líquido deslocado e o método do picnómetro de volume de gás deslocado. O método do picnómetro de gás consiste na determinação da diferença de pressão do gás no interior do aparelho, entre o ensaio com o provete e o ensaio de referência sem o provete, sendo a massa volúmica calculada com base na massa seca do provete e na diferença de pressão transformada em volume por meio da Lei de Boyle.

No método do picnómetro de volume de líquido deslocado, o provete pode ser ensaiado húmido ou seco em estufa e a determinação da massa volúmica é feita com base na diferença entre os volumes de líquido necessários para preencher o picnómetro com e sem amostra e na massa seca das partículas de solo ensaiadas (EN ISO 17892-3:2015). Neste trabalho será abordado apenas o método do picnómetro de volume líquido deslocado, tanto com o provete previamente seco em estufa (método A) quanto com o provete húmido (método B).

O método do líquido deslocado permite que o controle da temperatura de ensaio seja feita por meio de um banho-maria ou por uma câmara de temperatura controlada, no entanto optou-se por utilizar o banho-maria para a realização de todos os ensaios executados.

A norma exige que o líquido de referência para preenchimento dos picnómetros possua uma massa volúmica conhecida ou determinada, sendo indicado o uso água destilada, desmineralizada ou desionizada. Pode, também, ser utilizado um solvente orgânico adequado como, por exemplo, petróleo ou querosene. Recomenda-se ainda o uso de líquidos de referência com uma tensão superficial menor que a água, caso pretenda-se saturar rapidamente os solos finos. Contudo, no decurso deste trabalho, optou-se pelo uso da água destilada em todos os ensaios de determinação da massa volúmica realizados.

Esta nova norma não define a forma como o ar aprisionado deve ser retirado do provete, apenas recomenda a utilização de agitação mecânica, ligeiro aquecimento, ebulição ou aplicação de vácuo. Diante disso, a principal variável na execução destes ensaios está no método de retirada do ar aprisionado para que seja possível observar a influência da escolha do método nos resultados obtidos. No presente trabalho, para retirar o ar aprisionado nos provetes foram utilizados, para ambos os tipos de solo, os seguintes procedimentos:

- Vácuo a 40 hPa, durante 10 min;
- Vácuo a 133 hPa, durante 10 min;
- Ligeiro aquecimento (inferior a 50 °C), durante 10 min;
- Ebulição, durante 10 min;
- Agitação manual, durante 1 min.

A norma exige que se efetuem pelo menos duas determinações de massa volúmica, caso os valores divergirem mais de 0,03 Mg/m³, o ensaio deve ser repetido. Para validar os resultados obtidos, foram executadas, para cada um dos tipos de solo, pelo menos cinco repetições para cada um dos métodos de retirada do ar aprisionado, tanto para o provete seco em estufa, como para o provete húmido. São apresentados a seguir os equipamentos e a metodologia de ensaio preconizados na EN ISO 17892-3:2015 e utilizados no âmbito dessa tese, bem como os resultados obtidos e suas análises.

3.2. Equipamentos

3.2.1. Equipamentos de uso geral

Na preparação dos provetes e na execução dos ensaios foram utilizados os seguintes equipamentos:

- Balança com exatidão de leitura de 0,01 g ou 0,1% da massa do solo a pesar, consoante o valor que for maior.
- Exsicador com dimensão adequada e contendo um indicador dessecante seco.
- Repartidor de amostra com dimensões suficientes para se obter uma parte representativa da amostra.
- Estufa com ventilação forçada capaz de manter uma temperatura uniforme em toda a câmara de secagem.

- Equipamento de desagregação de amostras, almofariz e pilão macio para desagregar amostras de solo seco.

Os equipamentos supracitados estão apresentados na Figura 7.



a) Balança



b) Exsicador



c) Repartidor de amostra



d) Estufa



e) Almofariz e pilão macio



f) Tabuleiros e recipientes para amostra

Figura 7 – Equipamentos de uso geral para ensaio de determinação da massa volúmica das partículas.

3.2.1. Equipamentos para medição de volume de líquido deslocado

Na medição de volume de líquido deslocado foram usados os seguintes equipamentos/materiais:

- Picnómetro de líquido com volume de pelo menos 50 ml, com rolha de vidro e tubo capilar.
- Banho-maria controlado termostaticamente, com variação não superior a $\pm 0,5$ °C.
- Termómetro com resolução de leitura de 0,1 °C, acoplado ao banho-maria.
- Aparelho para remover o ar retido: bomba de vácuo e placa de aquecimento.

- Líquido de referência: água destilada, com massa volúmica conhecida, em quantidade suficiente para preencher o picnómetro.

Os equipamentos acima referidos estão apresentados na Figura 8.

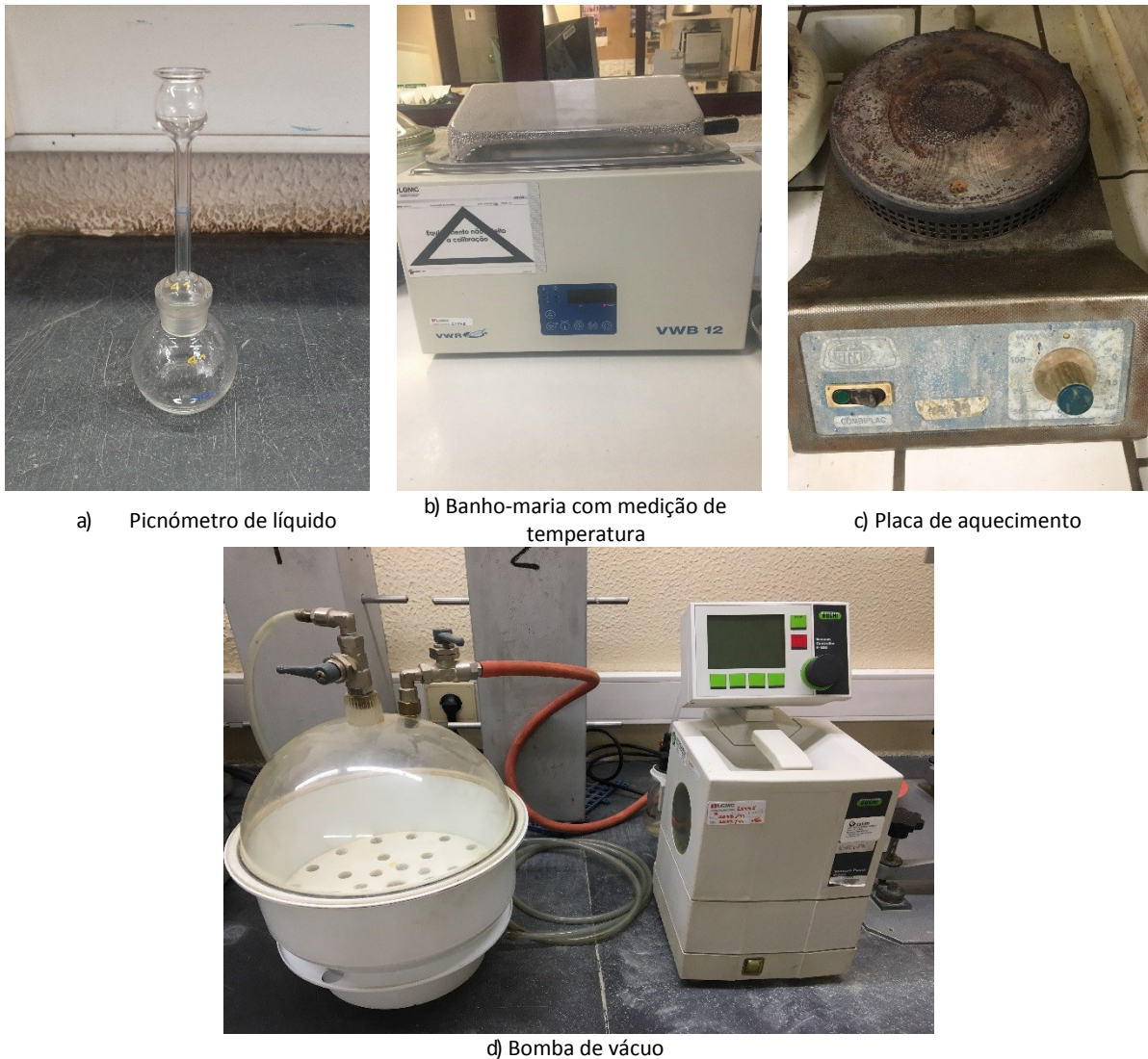


Figura 8 – Equipamentos para medição de volume de líquido deslocado.

3.3. Metodologia de ensaio

3.3.1. Medições de referência

Para ambos os métodos (provetes seco ou húmido) devem ser feitos os seguintes procedimentos para determinar as medições de referência:

- Determinar a massa do picnómetro seco e limpo (m_0) com uma aproximação de 0,01 g ou 0,1 % de massa de solo pesado, consoante o maior valor.
- Preencher o picnómetro com o líquido de referência sem que fique ar aprisionado no picnómetro ou no tubo capilar.

-
- Colocar o picnómetro no banho-maria, de forma que emerja apenas o gargalo, a tampa e o tubo capilar. Deixar por pelo menos 1 h para que o líquido de referência atinja a mesma temperatura do banho-maria e registrar a temperatura
 - Verificar o nível do líquido de referência e ajustar, caso necessite.
 - Retirar o picnómetro do banho-maria e secar imediatamente o seu exterior.
 - Determinar imediatamente a massa total do picnómetro cheio com o líquido de referência (m_1), com aproximação de 0,01 g ou 0,1% de massa de solo pesado, consoante o maior valor.

3.3.2. *Preparação do provete*

- Caso opte-se por secar o provete em estufa, deve-se proceder de acordo com a EN ISO 17892-1:2014.
- Separar um provete representativo do solo a ensaiar. Se a amostra passar por um peneiro com abertura de 4 mm (ou equivalente mais próximo), utilizar um picnómetro de 50 ml e a massa seca do provete de pelo menos 10 g.
- Caso existam partículas de maiores dimensões, esmagar as partículas de forma que satisfaça a esta condição ou utilizar um picnómetro de maior capacidade para provetes maiores.

3.3.3. *Execução do ensaio*

a) Provetes secos em estufa (Método A)

- Assegurar que o picnómetro encontra-se limpo e seco.
- Adicionar o provete seco no picnómetro e determinar a massa total (m_2), com uma aproximação de 0,01 g ou 0,1% da massa de solo pesado, consoante o maior valor.
- Adicionar o líquido de referência ao picnómetro até cobrir o provete com 10 mm a 20 mm de líquido.
- Remover o ar aprisionado. Tal como foi referido, a norma permite recorrer a diferentes métodos, optou-se por testar, em diferentes ensaios, as seguintes metodologias: agitação manual por 1 min, aplicação de vácuo a 40 hPa por 10 min, aplicação de vácuo a 133 hPa por 10 min, ligeiro aquecimento (inferior a 50 °C) por 10 min e ebulição por 10 min.

- Encher o picnómetro com o líquido de referência, sem deixar ficar ar.
- Colocar o picnómetro no banho-maria, de forma que emerja apenas o gargalo, a tampa e o tubo capilar. Deixar por pelo menos 1 h para que o provete saturado com o líquido de referência atinja a mesma temperatura do banho-maria e registrar a temperatura.
- Verificar o nível do líquido de referência e ajustar, caso necessite.
- Retirar o picnómetro do banho-maria e secar imediatamente o seu exterior.
- Determinar imediatamente a massa total do picnómetro cheio com o provete saturado e com o líquido de referência (m_3), com aproximação de 0,01 g ou 0,1% de massa de solo pesado, consoante o maior valor.

Para o solo argiloso de natureza caulínica (Solo B), ao realizar o ensaio com o provete previamente seco em estufa, algumas partículas de tonalidade escura emergiram para a parte superior do picnómetro, dificultando o correto fechamento da tampa e permitindo que parte da água vazasse do picnómetro, alterando os resultados obtidos. Por apresentar uma densidade inferior a da água destilada e massa desprezível, estas partículas foram removidas para a correta execução do ensaio. A Figura 9 a) apresenta as partículas ao emergirem para a parte superior do picnómetro, a Figura 9 b) apresenta estas partículas após a sua remoção.

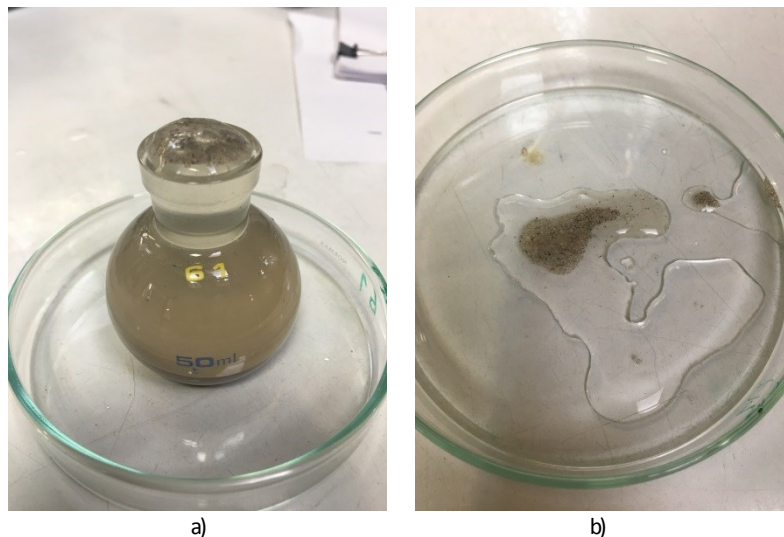


Figura 9 – Solo B – Provete previamente seco em estufa. a) partículas ao emergirem para a parte superior do picnómetro; b) partículas após a sua remoção.

b) Provetes húmidos (Método B)

- Assegurar que o picnómetro encontra-se limpo e seco.

-
- Adicionar o provete húmido no picnómetro.
 - Adicionar o líquido de referência ao picnómetro até cobrir o provete com 10 mm a 20 mm de líquido.
 - Remover o ar aprisionado. A norma recomenda diferentes métodos, optou-se por agitação manual por 1 min, aplicação de vácuo a 40 hPa por 10 min, aplicação de vácuo a 133 hPa por 10 min, ligeiro aquecimento (inferior a 50 °C) por 10 min e ebulição por 10 min.
 - Encher o picnómetro com o líquido de referência, sem deixar ficar ar.
 - Colocar o picnómetro no banho-maria, de forma que emerja apenas o gargalo, a tampa e o tubo capilar. Deixar por pelo menos 1 h para que o provete saturado com o líquido de referência atinja a mesma temperatura do banho-maria.
 - Verificar o nível do líquido de referência e ajustar, caso necessite.
 - Retirar o picnómetro do banho-maria, registrar a temperatura e secar imediatamente o seu exterior.
 - Determinar imediatamente a massa total do picnómetro cheio com o provete saturado e com o líquido de referência (m_3), com aproximação de 0,01 g ou 0,1% de massa de solo pesado, consoante o maior valor.
 - Retirar o provete do picnómetro e secá-lo até massa constante de acordo com a norma EN ISO 17892-1:2014.
 - Registrar a massa do provete seco (m_4).

3.3.4. Resultados do ensaio

- Para provetes secos em estufa (Método A), determinar a massa seca do provete (m_4) através da Equação (3.1).
- Para provetes húmidos, determinar o valor da massa do picnómetro com o provete seco por meio da Equação (3.2).

$$m_4 = m_2 - m_0 \quad (3.1)$$

$$m_2 = m_4 - m_0 \quad (3.2)$$

Sendo:

m_0 = massa do picnómetro seco, em gramas (g);

m_2 = massa do picnómetro com o provete seco, em gramas (g);

m_4 = massa seca do provete ensaiado, em gramas (g).

- Determinar a massa volúmica das partículas por meio da Equação (3.3).

$$\rho_s = \frac{m_4}{(m_1 - m_0) - (m_3 - m_2)} \times \rho_L \quad (3.3)$$

Sendo:

ρ_s = massa volúmica das partículas, em megagramas por metro cúbico (Mg/m³);

m_0 = massa do picnómetro seco, em gramas (g);

m_1 = massa do picnómetro cheio com o líquido de referência, em gramas (g);

m_2 = massa do picnómetro com o provete seco, em gramas (g);

m_3 = massa do picnómetro cheio com o provete saturado e com o líquido de referência, em gramas (g);

m_4 = massa seca do provete ensaiado, em gramas (g);

ρ_L = massa volúmica do líquido de referência à temperatura de ensaio, em megagramas por metro cúbico (Mg/m³). No caso da água destilada ou desionizada os valores estão representados na Tabela 3.

Tabela 3 - Massa volúmica da água destilada ou desionizada a várias temperaturas, corrigida para a pressão de 1 atm. Fonte: EN ISO 17892-3:2015.

Temperatura T (°C)	Massa volúmica ρ_w (Mg/m ³)	Temperatura T (°C)	Massa volúmica ρ_w (Mg/m ³)
10	0,99973	21	0,99802
11	0,99963	22	0,99780
12	0,99953	23	0,99757
13	0,99941	24	0,99733
14	0,99927	25	0,99708
15	0,99913	26	0,99681
16	0,99897	27	0,99654
17	0,99880	28	0,99626
18	0,99862	29	0,99598
19	0,99842	30	0,99568
20	0,99823		

-
- Se as massas m_1 e m_3 forem determinadas a diferentes temperaturas, determinar a massa volúmica das partículas por meio da Equação (3.4).

$$\rho_s = \frac{m_4}{[(m_1 - m_0)/\rho_{L1}] - [(m_3 - m_2)/\rho_{L3}]} \quad (3.4)$$

Sendo:

ρ_s = massa volúmica das partículas, em megagramas por metro cúbico (Mg/m³);

m_0 = massa do picnómetro seco, em gramas (g);

m_1 = massa do picnómetro cheio com o líquido de referência, em gramas (g);

m_2 = massa do picnómetro com o provete seco, em gramas (g);

m_3 = massa do picnómetro cheio com o provete saturado e com o líquido de referência, em gramas (g);

m_4 = massa seca do provete ensaiado, em gramas (g);

ρ_{L1} = massa volúmica do líquido de referência à temperatura de ensaio para qual foi determinada m_1 , em megagramas por metro cúbico (Mg/m³). No caso da água destilada ou desionizada os valores estão representados na Tabela 3;

ρ_{L3} = massa volúmica do líquido de referência à temperatura de ensaio para qual foi determinada m_3 , em megagramas por metro cúbico (Mg/m³). No caso da água destilada ou desionizada os valores estão representados na Tabela 3.

3.4. Apresentação dos resultados

Conforme descrito anteriormente, a determinação da massa volúmica foi executada para o Solo A e para o Solo B por ambos os métodos (húmido e seco em estufa), variando a forma de remoção do ar aprisionado no provete. A seguir são apresentados os resultados obtidos.

3.4.1. Solo A

A Tabela 4 apresenta os resultados obtidos para o Solo A por meio do método A (com provete seco em estufa), para as diferentes formas de remover o ar aprisionado. Também estão definidos os valores máximos, mínimos, médios, as variâncias e desvios padrões para cada uma das técnicas.

Tabela 4 – Massa volúmica – Solo A – Método A (provetete seco em estufa).

Determinação da massa volúmica das partículas (EN ISO 17892-3) - Método do picnómetro líquido										
Referência da amostra	Solo A									
Método do Ensaio	Método A (provetete seco em estufa)									
Número repetição	ρ_s - Massa volúmica das partículas do solo (Mg/m^3)					Mínimo (Mg/m^3)	Máximo (Mg/m^3)	Média (Mg/m^3)	Variância (Mg/m^3)	Desvio padrão (Mg/m^3)
	1	2	3	4	5					
Vácuo - 40hPa (10 min)	2,67	2,67	2,67	2,67	2,65	2,65	2,67	2,66	0,00008	0,0089
Vácuo - 133hPa (10 min)	2,66	2,66	2,66	2,65	2,67	2,65	2,67	2,66	0,00005	0,0068
Agitação manual (1 min)	2,61	2,60	2,60	2,63	2,61	2,60	2,63	2,61	0,00011	0,0103
Ebulição (10 min)	2,67	2,66	2,66	2,66	2,67	2,66	2,67	2,66	0,00003	0,0052
Ligeiro aquecimento (10 min)	2,65	2,68	2,68	2,67	2,65	2,65	2,68	2,67	0,00020	0,0143

O gráfico apresentado na Figura 10 permite observar a diferença entre os valores determinados em cada uma das repetições executadas para as diferentes técnicas de retirar o ar aprisionado para o método A.

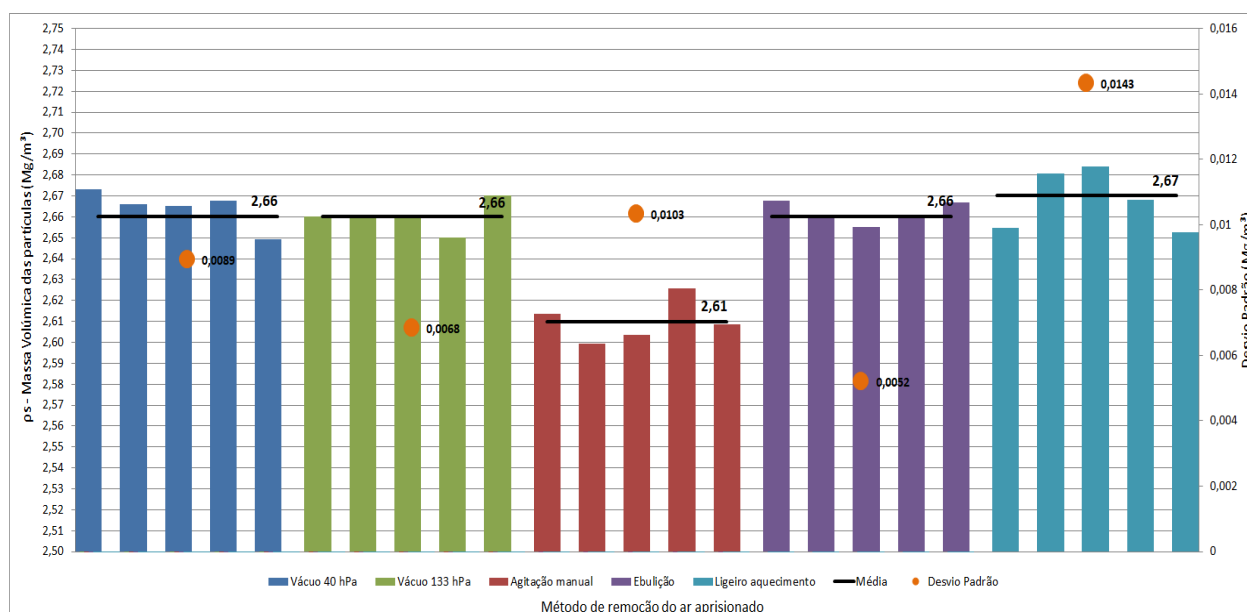


Figura 10 – Massa volúmica – Solo A – Método A (provetete seco em estufa).

A Tabela 5 apresenta os resultados obtidos para o Solo A por meio do método B (com provete húmido), para as diferentes formas de remover o ar aprisionado. Também estão definidos os valores máximos, mínimos, médios, as variâncias e desvios padrões para cada uma das técnicas.

Tabela 5 – Massa volúmica – Solo A – Método B (provete húmido).

Determinação da massa volúmica das partículas (EN ISO 17892-3) - Método do picnómetro líquido										
Referência da amostra	Solo A									
Método do Ensaio	Método B (provete húmido)									
Número repetição	ρ_s - Massa volúmica das partículas do solo (Mg/m^3)					Mínimo (Mg/m^3)	Máximo (Mg/m^3)	Média (Mg/m^3)	Variância (Mg/m^3)	Desvio padrão (Mg/m^3)
	1	2	3	4	5					
Vácuo - 40hPa (10 min)	2,68	2,66	2,66	2,67	2,68	2,66	2,68	2,67	0,00007	0,0082
Vácuo - 133hPa (10 min)	2,63	2,64	2,63	2,65	2,64	2,63	2,65	2,64	0,00007	0,0086
Agitação manual (1 min)	2,60	2,59	2,61	2,61	2,62	2,59	2,62	2,61	0,00015	0,0124
Ebulição (10 min)	2,68	2,66	2,66	2,67	2,67	2,66	2,68	2,67	0,00009	0,0095
Ligeiro aquecimento (10 min)	2,64	2,68	2,63	2,68	2,65	2,63	2,68	2,66	0,00058	0,0240

O gráfico apresentado na Figura 11 permite observar a diferença entre os valores determinados em cada uma das repetições executadas para as diferentes técnicas de retirar o ar aprisionado para o método B.

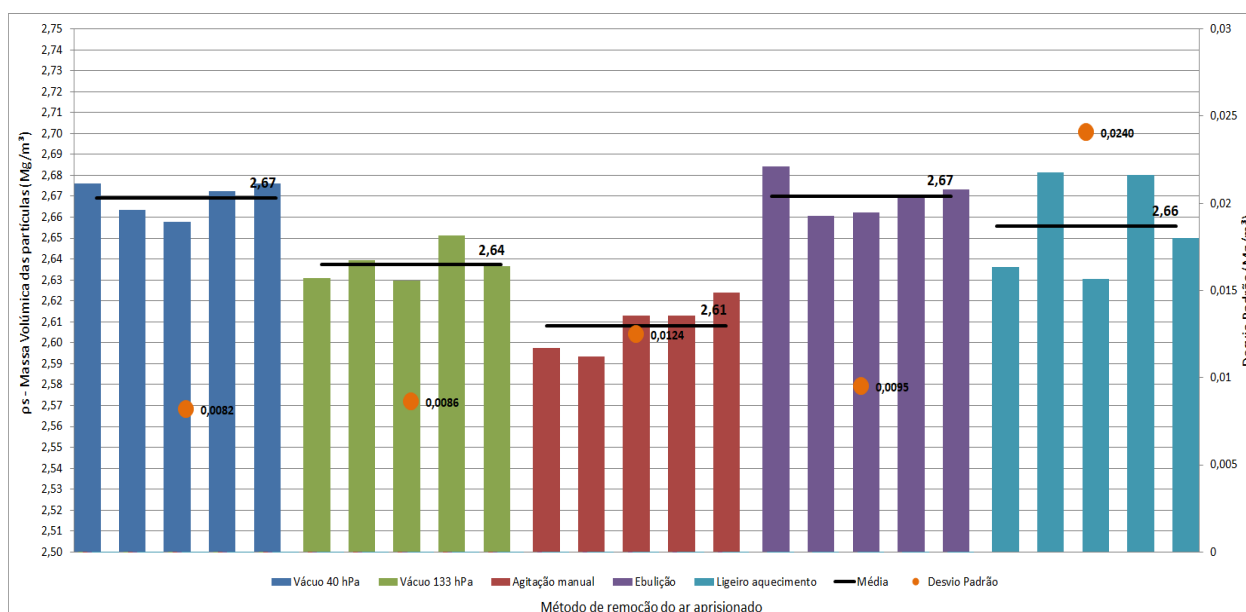


Figura 11 – Massa volúmica – Solo A – Método B (provete húmido).

3.4.2. Solo B

A Tabela 6 apresenta os resultados obtidos para o Solo B por meio do método A (com provete seco em estufa), para as diferentes formas de remover o ar aprisionado. Também estão definidos os valores máximos, mínimos, médios, as variâncias e desvios padrões para cada uma das técnicas.

Tabela 6 – Massa volúmica – Solo B – Método A (provetete seco em estufa).

Determinação da massa volúmica das partículas (EN ISO 17892-3) - Método do picnómetro líquido										
Referência da amostra	Solo B									
Método do Ensaio	Método A (provetete seco em estufa)									
ρ_s - Massa volúmica das partículas do solo (Mg/m^3)						Mínimo (Mg/m^3)	Máximo (Mg/m^3)	Média (Mg/m^3)	Variância (Mg/m^3)	Desvio padrão (Mg/m^3)
Número repetição	1	2	3	4	5					
Vácuo - 40hPa (10 min)	2,70	2,69	2,69	2,70	2,69	2,69	2,70	2,69	0,00005	0,0068
Vácuo - 133hPa (10 min)	2,64	2,70	2,67	2,68	2,68	2,64	2,70	2,67	0,00048	0,0219
Agitação manual (1 min)	2,60	2,62	2,65	2,67	2,64	2,60	2,67	2,63	0,00070	0,0264
Ebulição (10 min)	2,70	2,69	2,69	2,69	2,68	2,68	2,70	2,69	0,00006	0,0078
Ligeiro aquecimento (10 min)	2,71	2,70	2,70	2,70	2,69	2,69	2,71	2,70	0,00004	0,0061

O gráfico apresentado na Figura 12 permite observar a diferença entre os valores determinados em cada uma das repetições executadas para as diferentes técnicas de retirar o ar aprisionado para o método A.

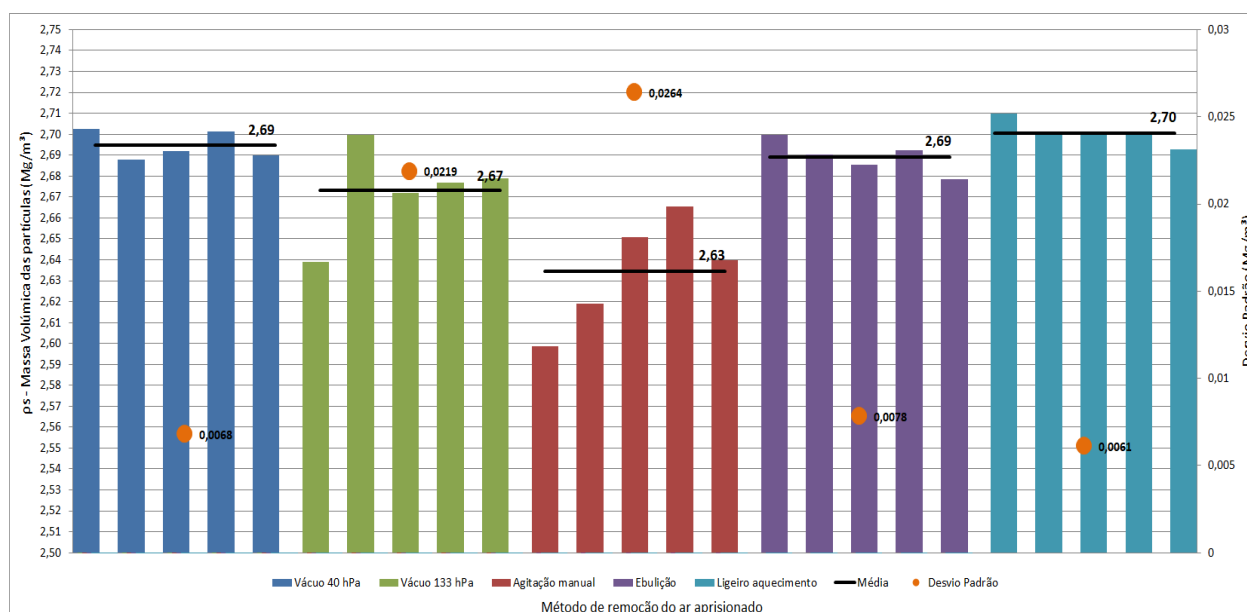


Figura 12 – Massa volúmica – Solo B – Método A (provetete seco em estufa).

A Tabela 7 apresenta os resultados obtidos para o Solo B por meio do método B (com provete húmido), para as diferentes formas de remover o ar aprisionado. Também estão definidos os valores máximos, mínimos, médios, as variâncias e desvios padrões para cada uma das técnicas.

Tabela 7 – Massa volúmica – Solo B – Método B (provetes húmidos).

Determinação da massa volúmica das partículas (EN ISO 17892-3) - Método do picnómetro líquido										
Referência da amostra	Solo B									
Método do Ensaio	Método B (provetes húmidos)									
Número repetição	ρ_s - Massa volúmica das partículas do solo (Mg/m^3)					Mínimo (Mg/m^3)	Máximo (Mg/m^3)	Média (Mg/m^3)	Variância (Mg/m^3)	Desvio padrão (Mg/m^3)
	1	2	3	4	5					
Vácuo - 40hPa (10 min)	2,67	2,67	2,70	2,69	2,68	2,67	2,70	2,68	0,00023	0,0151
Vácuo - 133hPa (10 min)	2,71	2,68	2,69	2,66	2,70	2,66	2,71	2,69	0,00038	0,0194
Agitação manual (1 min)	2,64	2,63	2,60	2,62	2,66	2,60	2,66	2,63	0,00055	0,0234
Ebulição (10 min)	2,69	2,67	2,69	2,69	2,69	2,67	2,69	2,69	0,00009	0,0097
Ligeiro aquecimento (10 min)	2,70	2,68	2,69	2,67	2,67	2,67	2,70	2,68	0,00021	0,0146

O gráfico apresentado na Figura 13 permite observar a diferença entre os valores determinados em cada uma das repetições executadas para as diferentes técnicas de retirar o ar aprisionado para o método B.

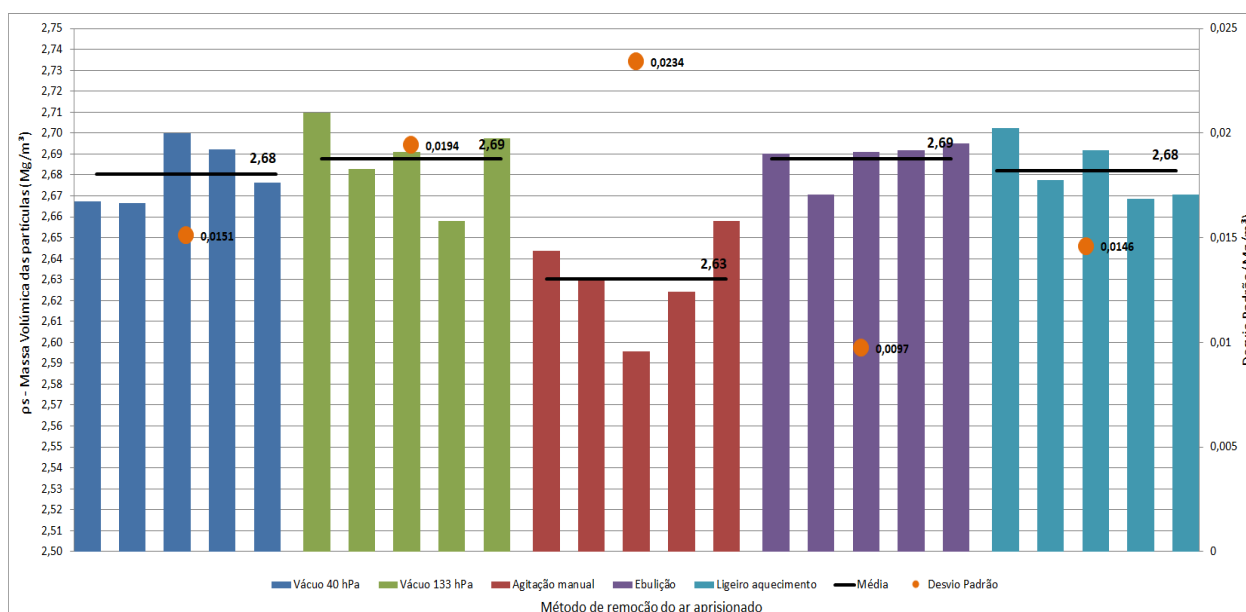


Figura 13 – Massa volúmica – Solo B – Método B (provetes húmidos).

3.5. Análise e discussão dos resultados obtidos

Os resultados obtidos para ambos os solos podem ser avaliados de acordo com três perspetivas diferentes. A primeira é com relação à repetitividade dos ensaios para cada um dos casos estudados. A segunda está relacionada com a comparação entre os valores obtidos para o método A (provetes secos em estufa) e para o método B (provetes húmidos). A terceira diz respeito à

comparação entre os resultados determinados para cada uma das diferentes formas de retirar o ar aprisionado no provete.

A seguir apresenta-se a análise dos resultados obtidos para cada um dos tipos de solo.

3.5.1. Solo A

A norma recomenda que, tanto para provetes secos em estufa quanto para provetes húmidos, sejam executadas pelo menos duas determinações e que os resultados não diverjam mais do que $0,03 \text{ Mg/m}^3$ entre si. Para o solo residual granítico (Solo A), foram realizadas cinco repetições para as diferentes formas de remoção do ar aprisionado no provete.

Com base nos valores apresentados para este tipo de solo, na Tabela 4 para o método A (proвете seco em estufa) e na Tabela 5 para o método B (proвете húmido), foram calculadas as diferenças entre os valores máximos e mínimos de massa volúmica determinados para todos os métodos de remoção de ar. Os valores encontram-se na Tabela 8.

Tabela 8 – Diferença entre os valores máximos e mínimos de massa volúmica determinados para o solo A.

Remoção do Ar	Método A (proвете seco em estufa)			Método B (proвете húmido)		
	Mínimo (Mg/m^3)	Máximo (Mg/m^3)	Diferença (Mg/m^3)	Mínimo (Mg/m^3)	Máximo (Mg/m^3)	Diferença (Mg/m^3)
Vácuo - 40hPa (10 min)	2,65	2,67	0,02	2,66	2,68	0,02
Vácuo - 133hPa (10 min)	2,65	2,67	0,02	2,63	2,65	0,02
Agitação manual (1 min)	2,60	2,63	0,03	2,59	2,62	0,03
Ebulição (10 min)	2,66	2,67	0,01	2,66	2,68	0,02
Ligeiro aquecimento (10 min)	2,65	2,68	0,03	2,63	2,68	0,05

É possível observar que, em todos os métodos de retirada do ar, as repetições não divergem entre si mais do que $0,03 \text{ Mg/m}^3$, com exceção da remoção por ligeiro aquecimento para o método B, em que houve uma divergência de $0,05 \text{ Mg/m}^3$. Neste caso, os valores que divergem mais do que $0,03 \text{ Mg/m}^3$ entre si podem ser desconsiderados para efeitos de cálculo. No entanto, para este trabalho, todos os valores determinados foram considerados para que fosse possível uma melhor comparação entre as diferentes metodologias. Uma vez que a divergência pode estar relacionada não apenas com a execução dos ensaios, mas também com a eficiência do método utilizado para a remoção do ar.

Com relação à comparação entre os resultados obtidos para o método A e para o método B, ao analisar a Tabela 4 e a Tabela 5 observa-se que os valores foram bem semelhantes. Ou seja, para esse tipo de solo o método escolhido (proвете seco em estufa ou proвете húmido) não tem

influência nos resultados obtidos. Na Tabela 9 são apresentados os valores das médias e dos desvios padrões para cada uma das formas de retirada do ar, que permite observar melhor a semelhança entre os valores calculados para ambos os métodos.

Tabela 9 - Comparação entre os métodos A (proвете seco em estufa) e B (proвете húmido) para o solo A.

Remoção do Ar	Média (Mg/m ³)		Desvio padrão (Mg/m ³)	
	Método A	Método B	Método A	Método B
Vácuo - 40hPa (10 min)	2,66	2,67	0,0089	0,0082
Vácuo - 133hPa (10 min)	2,66	2,64	0,0068	0,0086
Agitação manual (1 min)	2,61	2,61	0,0103	0,0124
Ebulição (10 min)	2,66	2,67	0,0052	0,0095
Ligeiro aquecimento (10 min)	2,67	2,66	0,0143	0,0240

Ao comparar os resultados obtidos entre os diferentes métodos de retirada do ar é possível verificar uma grande diferença entre os valores. A Tabela 10 apresenta o valor mínimo, máximo, a média, a variância e o desvio padrão calculados para a massa volúmica do Solo A para as diferentes formas de retirada do ar do proвете, tanto para o método A (proвете seco em estufa) quanto para o método B (proвете húmido).

Tabela 10 - Comparação entre os valores obtidos para as diferentes formas de retirada do ar aprisionado nos provetes – Solo A.

Massa volúmica (Mg/m ³)		
Remoção do Ar	Método A	Método B
Vácuo - 40hPa (10 min)	2,66	2,67
Vácuo - 133hPa (10 min)	2,66	2,64
Agitação manual (1 min)	2,61	2,61
Ebulição (10 min)	2,66	2,67
Ligeiro aquecimento (10 min)	2,67	2,66
Mínimo	2,61	2,61
Máximo	2,67	2,67
Média	2,65	2,65
Variância	0,0006	0,0007
Desvio padrão	0,0239	0,0259

Para ambos os métodos, o valor médio da massa volúmica variou entre 2,61 Mg/m³ e 2,67 Mg/m³. O menor valor obtido foi para os provetes em que se removeu o ar por agitação manual. Isso se deve ao fato da agitação aplicada não ser suficiente para a remoção total do ar aprisionado no proвете. Os vazios são preenchidos não somente por água, mas também por ar, ocupando um

maior volume do ocuparia se o solo estivesse saturado e, por consequência, o valor da massa volúmica é menor.

Durante a execução dos ensaios é possível perceber este efeito. Ao mover o picnómetro notam-se partículas de ar emergindo do provete. Isso ocorre também para a remoção de ar por vácuo a 133 hPa e por ligeiro aquecimento. Os valores de desvio padrão foram maiores para os ensaios em que o ar foi removido por ligeiro aquecimento, o que demonstra que a técnica utilizada não é tão eficiente. Para o ar removido com vácuo a 133 hPa, os resultados obtidos não divergiram tanto para o método A, porém nota-se que para o método B os valores encontrados foram ligeiramente mais baixos.

Para os ensaios em que o ar foi removido por vácuo a 40 hPa e por ebulição pode-se constatar que os valores obtidos são mais semelhantes e consistentes, o que demonstra que a remoção do ar foi mais eficiente nestes casos.

3.5.2. Solo B

Para o solo argiloso de natureza caulínica (Solo B), também foram realizadas cinco repetições para as diferentes formas de remoção do ar aprisionado no provete. Com base nos valores apresentados para este tipo de solo, na Tabela 6 para o método A (provete seco em estufa) e na Tabela 7 para o método B (provete húmido), foram calculadas as diferenças entre os valores máximos e mínimos de massa volúmica para todos os métodos de remoção de ar. Os valores encontram-se na Tabela 11.

Tabela 11 – Diferença entre os valores máximos e mínimos de massa volúmica determinados para o solo B.

Remoção do Ar	Método A (provete seco em estufa)			Método B (provete húmido)		
	Mínimo (Mg/m ³)	Máximo (Mg/m ³)	Diferença (Mg/m ³)	Mínimo (Mg/m ³)	Máximo (Mg/m ³)	Diferença (Mg/m ³)
Vácuo - 40hPa (10 min)	2,69	2,70	0,01	2,67	2,70	0,03
Vácuo - 133hPa (10 min)	2,64	2,70	0,06	2,66	2,71	0,05
Agitação manual (1 min)	2,60	2,67	0,07	2,60	2,66	0,06
Ebulição (10 min)	2,68	2,70	0,02	2,67	2,69	0,02
Ligeiro aquecimento (10 min)	2,69	2,71	0,02	2,67	2,70	0,03

É possível verificar que as repetições divergem entre si mais do que 0,03 Mg/m³ apenas para os ensaios em que o ar foi removido por vácuo a 133 hPa e por agitação manual, tanto para o método A quanto para o método B. Nestes casos, os valores que divergem mais do que 0,03 Mg/m³ entre si podem ser desconsiderados para efeitos de cálculo. No entanto, para este

trabalho, todos os valores determinados foram considerados para que fosse possível uma melhor comparação entre as diferentes metodologias, uma vez que a divergência pode estar relacionada não apenas com a execução dos ensaios, mas também com a eficiência do método utilizado para remoção do ar.

Com relação à comparação entre os resultados obtidos para o método A e para o método B, ao analisar a Tabela 6 e a Tabela 7 observa-se que os valores foram bem semelhantes. Ou seja, para esse tipo de solo o método escolhido (proвете seco em estufa ou proвете húmido) não tem muita influência nos resultados obtidos. Na Tabela 12 são apresentados os valores das médias e dos desvios padrões para cada uma das formas de retirada do ar, que permite observar melhor a semelhança entre os valores calculados para ambos os métodos.

Tabela 12 - Comparação entre os métodos A (proвете seco em estufa) e B (proвете húmido) para o solo B.

Remoção do Ar	Média (Mg/m ³)		Desvio padrão (Mg/m ³)	
	Método A	Método B	Método A	Método B
Vácuo - 40hPa (10 min)	2,69	2,68	0,0068	0,0151
Vácuo - 133hPa (10 min)	2,67	2,69	0,0219	0,0194
Agitação manual (1 min)	2,63	2,63	0,0264	0,0234
Ebulição (10 min)	2,69	2,69	0,0078	0,0097
Ligeiro aquecimento (10 min)	2,70	2,68	0,0061	0,0146

Ao comparar os resultados obtidos entre os diferentes métodos de retirada do ar é possível verificar uma grande diferença entre os valores. A Tabela 13 apresenta o valor mínimo, máximo, a média, a variância e o desvio padrão calculados para a massa volúmica do Solo B para as diferentes formas de retirada do ar do proвете. Tanto para o método A (proвете seco em estufa) quanto para o método B (proвете húmido).

Para o método A (proвете seco em estufa), o valor médio da massa volúmica variou entre 2,63 Mg/m³ e 2,70 Mg/m³. Já para o método B (proвете húmido), o valor da massa volúmica variou entre 2,63 Mg/m³ e 2,69 Mg/m³. O menor valor obtido, em ambos os métodos, foi para os provetes em que se removeu o ar por agitação manual. Isso se deve ao fato da agitação aplicada não ser suficiente para a remoção total do ar aprisionado no proвете, em consequência o valor da massa volúmica calculada é menor.

Tabela 13 - Comparação entre os valores obtidos para as diferentes formas de retirada do ar aprisionado nos provetes – Solo B.

Massa volúmica (Mg/m³)		
Remoção do Ar	Método A	Método B
Vácuo - 40hPa (10 min)	2,69	2,68
Vácuo - 133hPa (10 min)	2,67	2,69
Agitação manual (1 min)	2,63	2,63
Ebulição (10 min)	2,69	2,69
Ligeiro aquecimento (10 min)	2,70	2,68
Mínimo	2,63	2,63
Máximo	2,70	2,69
Média	2,68	2,67
Variância	0,0007	0,0006
Desvio padrão	0,0265	0,0245

Esse efeito é visível durante a execução do ensaio, ao mover o picnómetro notam-se partículas de ar emergindo do provete, tanto para a remoção por agitação manual quanto para a remoção por vácuo a 133 hPa e por ligeiro aquecimento. Para os ensaios em que o ar foi removido por vácuo a 40 hPa e por ebulição verifica-se que os valores obtidos são mais semelhantes e consistentes, demonstrando que a remoção do ar foi mais eficiente nestes casos.

3.5.3. Conclusão

Conclui-se que, para ambos os tipos de solo ensaiados, a remoção de ar deve ser realizada por vácuo a 40 hPa ou por ebulição, uma vez que estes métodos apresentaram resultados mais coerentes. Os demais métodos não garantiram a remoção total do ar aprisionado no provete, sendo o método da remoção por agitação manual aquele que apresentou os piores resultados para os dois solos ensaiados.

Capítulo IV
Análise Granulométrica

4.1. Introdução

Em Portugal a análise granulométrica de solos vem sendo, há algumas décadas, realizada de acordo com as especificações LNEC E 239:1970 e E 196:1966, precedidas pela aplicação da E 195:1966. A nova normalização europeia propõe para a determinação da distribuição granulométrica das partículas a norma EN ISO 17892-4:2016, com o título geral: “Reconhecimento e ensaios geotécnicos – Ensaios de laboratório em solos – Parte 4: Determinação da distribuição granulométrica”. Esta norma descreve os métodos por peneiração, por sedimentação e a combinação dos dois.

A peneiração pode ser aplicada a todos os solos não cimentados e que possuam partículas menores que 125 mm (EN ISO 17892-4: 2016). A sedimentação pode ser realizada pelo método do densímetro ou da pipeta, ambos estão descritos na norma. Neste trabalho a distribuição granulométrica dos solos foi determinada por peneiração e por sedimentação pelo método do densímetro.

Primeiramente deve ser definido o método do ensaio ou a combinação entre eles, de acordo com as seguintes condições:

- Se a amostra possuir menos de 10 % de partículas com dimensão inferior a 0,063 mm, não é exigida a realização do ensaio de sedimentação.
- Se todas as partículas da amostra tiverem dimensão inferior a 2,0 mm, contendo menos de 10 % de partículas com dimensão superior a 0,063 mm, não é exigida a realização do ensaio de peneiração com a totalidade dos peneiros.
- Para todas as outras amostras, deve ser realizada uma combinação dos ensaios de peneiração e de sedimentação para determinação completa da distribuição granulométrica.

Neste trabalho, foram ensaiados dois tipos de solo, uma amostra designada como Solo A, constituída por um solo residual granítico e outra amostra designada como Solo B, constituída por um solo argiloso de natureza caulínica. Ambos os solos, por se enquadrarem na terceira condição, foram ensaiados pela combinação dos métodos de peneiração e sedimentação.

Na preparação da amostra para o ensaio por sedimentação, a norma não especifica o método de agitação que deve ser utilizado para a dispersão das partículas. Optou-se por testar dois tipos de agitação, variando o tempo e a velocidade de agitação, utilizando-se um agitador mecânico com velocidade de 18 000 rpm por 10 min para uma agitação mais vigorosa e um agitador magnético com velocidade de 300 rpm durante 4 h para uma agitação mais suave.

A nova normalização determina que os ensaios por peneiração e sedimentação sejam realizados em provetes distintos provenientes da mesma amostra e que os resultados sejam combinados em uma única curva granulométrica, ou seja, cada provete passa por uma preparação diferente. Além deste procedimento, optou-se ainda, por passar o material retido no peneiro com abertura de 0,063 mm no ensaio por sedimentação pela série de peneiros utilizados no ensaio por peneiração, com o objetivo de comparar os resultados obtidos no procedimento descrito na nova norma com os resultados obtidos ao utilizar um único provete para ambos os métodos. Para o Solo B foi realizada ainda uma análise granulométrica de acordo com a antiga normalização, E 196: 1966, sendo possível comparar os resultados obtidos.

Para simplificar a nomenclatura dos ensaios realizados, foram definidas designações diferentes de acordo com o método utilizado. Os ensaios de análise granulométrica por peneiração serão designados pela letra *P*. Os ensaios por sedimentação receberão como designação a letra *S*, sendo *Sv* quando utilizada uma agitação vigorosa para dispersão as partículas e *Ss* quando a dispersão for feita com uma agitação suave. Para os ensaios combinados, adotou-se o número 2 para os ensaios realizados com provetes distintos de acordo com a EN ISO 17892-4:2016 e o número 1 para os ensaios realizados utilizando um único provete, passando o material retido no peneiro de abertura 0,063 mm durante o ensaio por sedimentação na série de peneiros com malha mais grossa. A Tabela 14 apresenta um resumo com as designações adotadas para cada um dos ensaios.

Tabela 14 - Designação dos ensaios de análise granulométrica.

Designação	Ensaio
P_A	Análise granulométrica por peneiração – Solo A
P_B	Análise granulométrica por peneiração – Solo B
Sv_A	Análise granulométrica por sedimentação com agitação vigorosa – Solo A
Sv_B	Análise granulométrica por sedimentação com agitação vigorosa – Solo B
Ss_A	Análise granulométrica por sedimentação com agitação suave – Solo A
Ss_B	Análise granulométrica por sedimentação com agitação suave – Solo B
PSv_2_A	Combinação entre a análise granulométrica por peneiração e por sedimentação com agitação vigorosa (18 000 rpm por 10 min) – Solo A
PSv_2_B	Combinação entre a análise granulométrica por peneiração e por sedimentação com agitação vigorosa (18 000 rpm por 10 min) – Solo B
PSs_2_A	Combinação entre a análise granulométrica por peneiração e por sedimentação com agitação suave (300 rpm por 4 h) utilizando dois provetes distintos – Solo A
PSs_2_B	Combinação entre a análise granulométrica por peneiração e por sedimentação com agitação suave (300 rpm por 4 h) utilizando dois provetes distintos – Solo B
PSv_1_A	Combinação entre a análise granulométrica por peneiração e por sedimentação com agitação vigorosa (18 000 rpm por 10 min) utilizando o mesmo provete – Solo A
PSv_1_B	Combinação entre a análise granulométrica por peneiração e por sedimentação com agitação vigorosa (18 000 rpm por 10 min) utilizando o mesmo provete – Solo B
PSs_1_A	Combinação entre a análise granulométrica por peneiração e por sedimentação com agitação suave (300 rpm por 4 h) utilizando o mesmo provete – Solo A
PSs_1_B	Combinação entre a análise granulométrica por peneiração e por sedimentação com agitação suave (300 rpm por 4 h) utilizando o mesmo provete – Solo A

A seguir são apresentados os equipamentos e a metodologia do ensaio, bem como os resultados obtidos com suas análises.

4.2. Equipamentos

4.2.1. Equipamentos de uso geral

Em ambos os métodos, tanto para a preparação quando para a execução dos ensaios foram utilizados os seguintes equipamentos:

- Balança com exatidão de leitura de 0,01 g ou 0,1% da massa do solo pesado, consoante o valor que for maior.
- Estufa com ventilação forçada capaz de manter uma temperatura uniforme em toda a câmara de secagem.
- Cronómetro com resolução de 1 s.
- Termómetro com a gama de temperaturas utilizada na parte correspondente do ensaio e com resolução de leitura de 0,1°C.
- Exsicador com dimensão adequada e contendo indicador dessecante seco.
- Recipientes para os provetes de um material que quando sujeito a ciclos repetidos de secagem não altere a sua massa.

A Figura 14 apresenta os equipamentos de uso geral utilizados para a realização destes ensaios.



Figura 14 – Equipamentos de uso geral para ensaio de análise granulométrica.

4.2.2. Método da peneiração

Para o método da peneiração, para além dos equipamentos de uso geral, foi necessário utilizar os seguintes equipamentos:

- Peneiros em conformidade com a ISO 3310-1 e a ISO 3310-2 e recipiente de fundo. Foram utilizados os peneiros com aberturas: 63,0 mm, 37,5 mm, 20,0 mm, 10,00 mm, 6,3 mm, 2,0 mm, 0,60 mm, 0,20 mm e 0,063 mm.
- Água destilada.
- Agente dispersante: solução de hexametáfosfato hexassódico, aproximadamente 2 g/l.
- Equipamentos auxiliares: colher; escovas para peneiros; copos gobelé; repartidores de amostras; almofariz e pilão; esguicho para lavagem.

A Figura 15 apresenta os principais equipamentos utilizados para a realização do ensaio de peneiração.



Figura 15 – Principais equipamentos e materiais utilizados para o ensaio por peneiração.

4.2.3. Sedimentação pelo método do densímetro

Na sedimentação pelo método do densímetro foram utilizados os seguintes equipamentos e materiais:

- Densímetro de vidro, em forma de torpedo, tanto quanto possível isento de defeitos visíveis, com haste e bolbo com secção transversal circular simétrica relativamente ao seu eixo principal e sem alterações abruptas da secção, com marcas e inscrições da escala nítidas e indeléveis e sem irregularidades aparentes no seu espaçamento, com gama de leitura de pelo menos 0,9950 g/ml a 1,0300 g/ml e com marcas de graduação espaçadas de 0,0005 g/ml no máximo.

- Provetas de sedimentação com graduação até 1000 ml, secção transversal constante em toda a sua altura e transparentes para facilitar a leitura, com diâmetro de pelo menos duas vezes o do bulbo do densímetro e altura suficiente para garantir que o densímetro flutue livremente em 1000 ml de água destilada.
- Agitador mecânico e agitador magnético que permitam manter a quantidade apropriada de solo e de água sob a forma de uma suspensão estável, sem provocar a fracturação nem a perda de partículas do solo.
- Água destilada.
- Agente dispersante: solução de hexametáfosfato hexassódico, aproximadamente 40 g/l.

A Figura 16 apresenta os principais equipamentos e materiais utilizados para a realização do ensaio de sedimentação pelo método do densímetro.

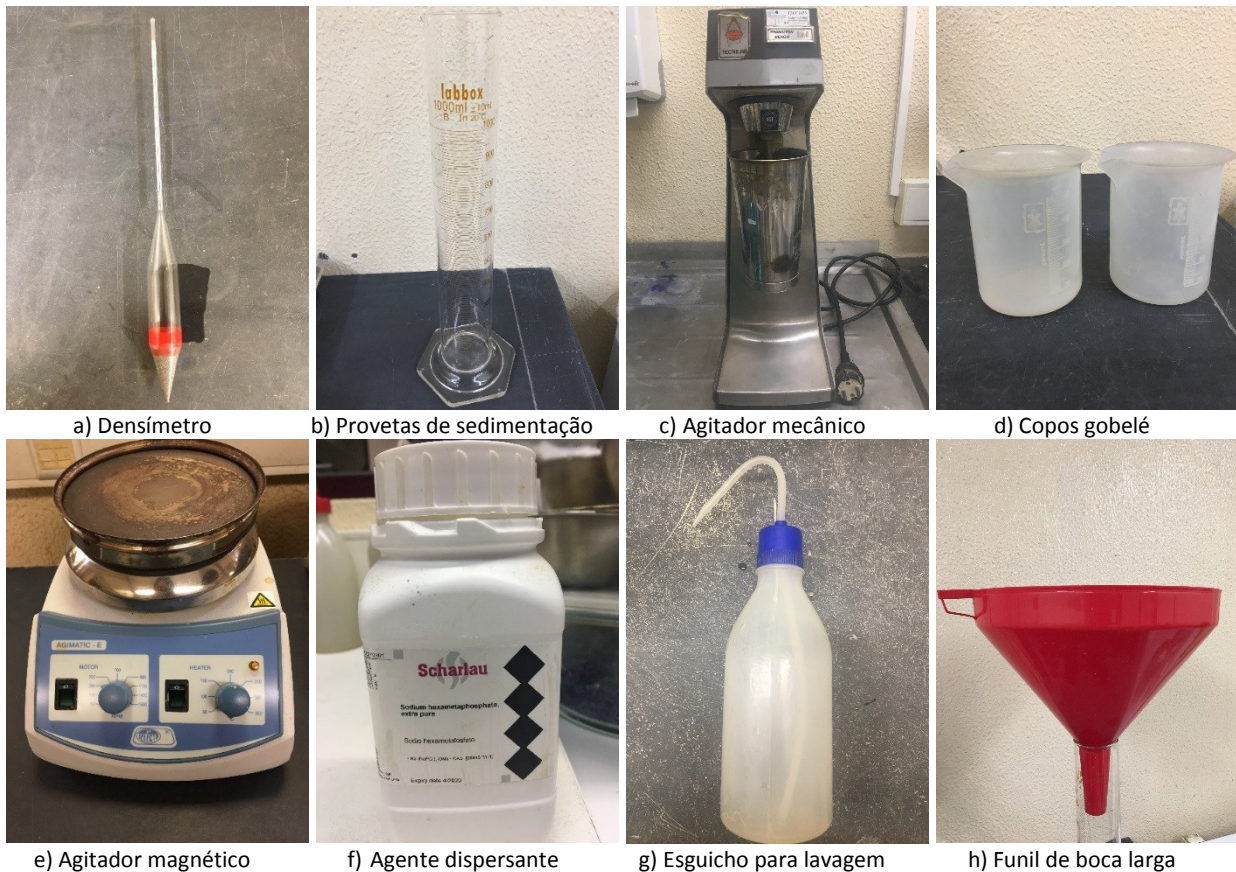


Figura 16 – Principais equipamentos e materiais utilizados para o ensaio de sedimentação pelo método do densímetro.

4.3. Metodologia de ensaio

4.3.1. Método de peneiração

O ensaio pode ser realizado com amostras húmidas ou secas, no entanto a determinação das massas de material retido em cada peneiro deve ser feito sempre com o provete seco. No caso de solos com partículas inferiores a 0,063 mm, é mais indicado a preparação por via húmida, uma vez que por via seca pode resultar em erros. Os ensaios por peneiração executados neste trabalho foram realizados por via húmida e repetido três vezes para cada um dos tipos de solo.

Quando necessário, a norma indica a utilização de agente dispersante para garantir que as partículas de solo estejam soltas. Para o ensaio de peneiração é recomendado o uso de hexametáfosfato hexassódico ou difosfato tetrassódico, aproximadamente 2 g/l dissolvido em água. Na peneiração realizada no Solo A não foi utilizado agente dispersante uma vez que, por se tratar de um solo granular, as partículas se dispersam com facilidade. Para a peneiração do solo B foi utilizado o hexametáfosfato hexassódico, com concentração de 2 g/l.

Na preparação da amostra para o ensaio por peneiração, a norma recomenda uma separação inicial no peneiro com abertura 20,0 mm porque esta dimensão corresponde ao limite entre o cascalho médio e grosso, porém permite que sejam utilizados outros peneiros. Uma vez que o Solo A possui apenas uma pequena quantidade de partículas retidas no peneiro de 20,0 mm, a separação foi feita no peneiro com abertura inferior, de 10,0 mm. Para o Solo B não foi utilizado peneiro de separação.

A seguir são apresentados os procedimentos definidos pela norma ISO EN 17892-4:2016, seguidos para a realização do método da peneiração.

a) Preparação do provete

- Separar da amostra inicial, por esquarteamento ou repartição, para a obtenção de um provete representativo. A massa húmida inicial do provete depende do diâmetro máximo das partículas (D_{max}) presentes e do teor em água do solo de acordo com os valores apresentados na Tabela 15.
- Determinar a massa húmida do provete (m_w) com uma aproximação de 0,1 g ou 0,1 % da massa, consoante o valor que for maior.
- Para provetes com partículas grosseiras de seixo ou calhau, separar com recurso a um peneiro adequado, foi utilizado o de 10 mm, para evitar sobrecarregar os peneiros subsequentes com abertura de menor dimensão.

Tabela 15 - Massas mínimas recomendadas para peneiração. Fonte: EN ISO 17892-4:2016.

D_{max}^a (mm)	Massas mínimas recomendadas ^b (g)
<2,0	100
2,0	100
6,3	300
10,0	500
20,0	2000
37,5	14000
63,0	40000
a) diâmetro máximo das partículas de solo, excluindo quaisquer partículas mais grosseiras eventualmente presentes. b) a utilização de um provete de massa menor do que a massa mínima recomendada exige ponderação, pois a referida massa pode ser suficiente para realizar o ensaio.	

- Determinar o teor em água de um provete representativo do material que passa no peneiro de separação descrito no item anterior, de acordo com a norma ISO 17892-1:2014.
- Limpar o material retido no peneiro de separação por escovagem ou lavagem suave para remover qualquer material fino que tenha ficado preso.
- Secar e pesar o material retido (m_r) com uma aproximação de 0,1 g ou 0,1 % da massa total (m), consoante o valor que for maior.
- Adicionar o material removido por limpeza do material retido no peneiro de separação, e que tem dimensão inferior à do peneiro de separação, ao material passado no peneiro de separação e misturar.
- Determinar a massa resultante (m_s) com uma aproximação de 0,1 g ou 0,1 % da massa total (m), consoante o valor que for maior.
- Caso necessário, reduzir a massa obtida do material através de repartição, desde que o provete que daí resulte respeite as massas mínimas apresentadas na Tabela 15, registrando a massa reduzida com uma aproximação de 0,1 g ou 0,1 % da massa total (m_s), consoante o valor que for maior.
- Colocar o material mais fino do que a abertura do peneiro de separação num tabuleiro ou balde e cobrir com água. Esperar, pelo menos uma hora, agitando com frequência. Se necessário, adicionar agente dispersante para desagregar as partículas de argila.

- Lavar o provete num peneiro de 2,0 mm encaixado noutro de 0,063 mm até a água sair praticamente limpa. Certificar de que nenhum dos peneiros contém peso em excesso. O material que passa através do peneiro de 0,063 mm não precisa ser recolhido.
- Combinar os materiais retidos nos peneiros de 2,0 mm e de 0,063 mm, secar em estufa até massa constante e pesar com uma aproximação de 0,1 g ou 0,1 % da massa total do provete (m_s), consoante o valor que for maior.

c) Execução do ensaio

Para evitar a sobrecarga dos peneiros com aberturas mais finas, a quantidade de solo pode ser novamente reduzida através do repartidor, ou de outro método semelhante, a qualquer momento da execução do ensaio. A seguir é apresentada a metodologia para a execução deste método.

- Caso tenha sido utilizado um peneiro de separação, peneirar o material seco, retido no peneiro de separação, através de uma série de peneiros de malha cada vez mais fina até à dimensão do peneiro de separação.
- Pesar o solo retido em cada um deles ($m_{ss1}, m_{ss2}, \dots, m_{ssn}$). As massas retidas em cada peneiro não devem exceder os valores apresentados na Tabela 15.
- Peneirar o material seco obtido da lavagem do material nos peneiros de 2,0 mm e 0,063 mm utilizando um conjunto de peneiros de malhas cada vez mais finas até 0,063 mm.
- Pesar solo retido em cada um dos peneiros ($m_{s1}, m_{s2}, \dots, m_{sn}$) e o material que passou através do peneiro de abertura 0,063 mm (m_p). As massas retidas em cada peneiro não devem exceder os valores apresentados na Tabela 16.

Tabela 16 - Massas máximas de solo retidas em cada peneiro. Fonte: EN ISO 17892-4:2016.

Abertura nominal do peneiro (mm)	Massa máxima de solo no peneiro de diâmetro		
	450 mm (kg)	300 mm (kg)	200 mm (g)
0,063	-	-	40
0,20	-	-	70
0,63	-	-	125
2,0	-	-	220
6,3	2,0	0,8	-
10,0	2,5	1,1	-
20,0	3,5	1,5	-
37,5	4,8	2,1	-
63,0	6,3	2,8	-

- A massa máxima retida em peneiros cujos diâmetros não estão referidos na Tabela 16 deverá ser determinada recorrendo à Equação (4.1).

$$M = \frac{A \times \sqrt{d}}{200} \quad (4.1)$$

Sendo:

M = Massa máxima retida no peneiro, em gramas (g);

A = Área da secção transversal do peneiro, em milímetros ao quadrado (mm²);

D = Diâmetro da malha do peneiro, em milímetros (mm).

- Em quase todos os solos, o provete deverá ser agitado, pelo menos, 10 min, no caso de utilizar-se um agitador mecânico. Ao realizar a peneiração manual, agitar cada peneiro por, pelo menos, 2 min.
- Finalizar a peneiração quando em 1 min de peneiração suplementar não ocorrer alteração superior a 1 % em massa, do material retido em cada peneiro.
- Somar a massa total retida em todos os peneiros e a massa da fração que passa no peneiro de abertura 0,063 mm. Caso a massa do provete tiver sido reduzida por divisão, as massas depois da etapa de divisão devem ser multiplicadas pela relação das massas antes e após da divisão. Se este valor diferir da massa (m) do início da peneiração em mais de 1 %, o ensaio deve ser repetido.

d) Resultados do ensaio

- Se a massa do provete foi reduzida por repartição, multiplicar as massas após repartição (m_{sn}) pela razão das massas antes e depois da repartição, para obter as massas retidas ajustadas (m'_{sn}).
- No caso dos provetes para os quais foi utilizado um peneiro de separação inicial, calcular a fração do solo que passa através do peneiro de malha dada n superior a do peneiro de separação, através da Equação (4.2) para as malhas dos peneiros superiores ou iguais à malha do peneiro de separação.

$$f_n = 100\% - \left[\frac{m'_{ss1} + m'_{ss2} + \dots + m'_{ssn}}{m} \times 100\% \right] \quad (4.2)$$

Em que:

f_n = a fração que passa através de um peneiro de malha n , em percentagem (%);

m'_{ss1}, m'_{ss2} = massas de solo retidas em cada peneiro para malhas de peneiros superiores à malha do peneiro de separação (se este foi utilizado), após o cálculo efetuado para cada etapa de repartição, em gramas (g);

m'_{ssn} = massa de solo retida no peneiro de malha n para peneiros com malha superior ou igual à malha do peneiro de separação (se este foi utilizado), após o cálculo efetuado para cada etapa de repartição, em gramas (g);

m'_{s1}, m'_{s2} = massas de solo retidas em cada peneiro de malha superior à do peneiro de malha n para peneiros com malhas inferiores à do peneiro de separação, após o cálculo efetuado para cada etapa de repartição, em gramas (g);

m'_{sn} = massa de solo retida no peneiro de malha n para peneiros com malha inferior à malha do peneiro de separação, após o cálculo efetuado para cada etapa de repartição, em gramas (g);

m = massa seca total inicial do provete de solo, em gramas (g).

- No caso de peneiros com malhas inferiores às do peneiro de separação ou no caso de os provetes não terem sido submetidos à etapa de separação inicial, calcular a fração do solo que passa através de um dado peneiro de malha n por meio da Equação (4.3).

$$f_n = 100\% - \left[\frac{m'_{ss1} + m'_{ss2} + \dots + m'_{ssn} + m'_{s1} + m'_{s2} + \dots + m'_{sn}}{m} \times 100\% \right] \quad (4.3)$$

Onde:

f_n = fração que passa através de um peneiro de malha dada n, em percentagem (%);

m'_{ss1}, m'_{ss2} = massas de solo retidas em cada peneiro para malhas de peneiros superiores à malha do peneiro de separação (se este foi utilizado), após o cálculo efetuado para cada etapa de repartição, em gramas (g);

m'_{ssn} = massa de solo retida no peneiro de malha n para peneiros com malha superior ou igual à malha do peneiro de separação (se este foi utilizado), após o cálculo efetuado para cada etapa de repartição, em gramas (g);

m'_{s1}, m'_{s2} = massas de solo retidas em cada peneiro de malha superior à do peneiro de malha n para peneiros com malhas inferiores à do peneiro de separação, após o cálculo efetuado para cada etapa de repartição, em gramas (g);

m'_{sn} = massa de solo retida no peneiro de malha n para peneiros com malha inferior à malha do peneiro de separação, após o cálculo efetuado para cada etapa de repartição, em gramas (g);

m = massa seca total inicial do provete de solo, em gramas (g).

- Apresentar os resultados num gráfico semilogarítmico. Quando os resultados forem obtidos através de peneiração e de sedimentação devem ser combinados num gráfico para se apresentar uma curva contínua e suave. Os resultados dos ensaios podem, também, ser apresentados num quadro pela ordem da dimensão das partículas e da percentagem de material que passa, arredondado a menos de 1 %;

4.3.2. *Sedimentação pelo método do densímetro*

Este método é aplicado para a porção da amostra que passa pelo peneiro de abertura 0,063 mm. Todas as leituras do densímetro, cálculos e calibrações devem ser empregadas com a parte decimal da leitura multiplicada por 1000.

O ensaio deve ser realizado com temperatura controlada, seja utilizando-se um banho-maria com um sistema de circulação que não introduza vibrações no provete de suspensão, seja numa sala com temperatura controlada dotada de um instrumento calibrado para registros de temperaturas máximas e mínimas. Optou-se pela realização do ensaio em uma sala com temperatura e humidades controladas. A temperatura da sala utilizada durante a execução do ensaio é mantida em $20\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ e a humidade relativa maior ou igual a 50 %.

A norma indica a utilização de agente dispersante para garantir que as partículas de solo estejam soltas. Para a sedimentação recomenda-se hexametáfosfato hexassódico, aproximadamente 40 g/l, ou difosfato tetrassódico aproximadamente 20 g/l, dissolvido em água. Utilizou-se como agente dispersante o hexametáfosfato hexassódico, com concentração de aproximadamente 40 g/l.

A norma indica que a suspensão deve ser agitada utilizando um agitador ou misturador mecânico o tempo suficiente para que as partículas do solo se dispersem completamente, não especificando as condições exatas de agitação, o que pode introduzir variabilidade no processo. Se for utilizada uma agitação suave, é recomendado um tempo de agitação de 4 h. Quando o método de agitação for mais vigoroso, pode-se utilizar um tempo mais curto, porém deve-se ter cuidado para não fragmentar as partículas. Foram realizadas três repetições para cada solo utilizando-se um agitador mecânico com uma agitação vigorosa e um tempo curto (18 000 rpm por 10 min) e três repetições para cada solo utilizando-se um agitador magnético com uma

agitação mais lenta e um período mais longo (300 rpm por 4h). O principal objetivo desta variação é perceber se a escolha do tipo de agitação influencia nos resultados obtidos neste ensaio.

A norma determina que, caso não tenha sido realizado o ensaio pelo método da peneiração, deve-se peneirar o material retido no peneiro de abertura 0,063 mm usando um conjunto de peneiros de malhas cada vez mais finas até 0,063 mm. Para este trabalho, optou-se por realizar este procedimento em todos os casos ensaiados, com o objetivo de comparar os resultados com os resultados obtidos pelo método da peneiração.

A seguir são apresentados os procedimentos definidos pela norma EN ISO 17892-4:2016 para a realização da sedimentação aplicando o método do densímetro.

a) Calibração do volume

- Pesar o densímetro com aproximação a 0,1 g e registrar a massa como o volume do densímetro em ml (V_h).

b) Calibração da escala

- Medir a distância (L) entre a marca de 100 ml na escala da proveta de sedimentação e a marca de 1000 ml, com aproximação ao milímetro. Para provetas com marca de escala somente em 1000 ml.
- Medir na haste do densímetro a distância (d_i) entre a marca de graduação inferior e cada uma das principais graduações da escala R_h .
- Medir a distância (N) entre o início do bolbo e a marca de graduação inferior da haste do densímetro.
- Calcular a distância (H), correspondente a qualquer leitura R_h , como a soma das distâncias anteriormente medidas ($N + d_1, N + d_2, \dots, N + d_7$).
- Medir a distância (h) do início do bolbo para a base do bolbo. Este procedimento assume que é utilizado um bolbo simétrico, se o bolbo utilizado é assimétrico, deve ser determinado o centro de gravidade. Neste caso, substituir h por duas vezes a distância do início do bolbo ao centro de gravidade do bolbo ou centro de impulsão do densímetro.
- Calcular a profundidade efetiva (H_r) para cada uma das principais graduações da escala de acordo com a Equação (4.4).

$$H_r = H + 0,5 \left(h - \frac{V_h}{900} L \right) \quad (4.4)$$

Sendo:

H = comprimento entre o início do bolbo e a graduação R_h , em milímetros (mm);

h = comprimento do bolbo, em milímetros (mm);

V_h = volume do bolbo, em mililitros (ml);

L = distância entre as marcas de 100 ml e de 1000 ml da escala da proveta de sedimentação, em milímetros (mm).

- Definir a relação $H_r = f(R_h)$ e calcular a profundidade efetiva da suspensão, H_r , para cada leitura no densímetro R_h .

c) Preparação do provete

- Separar um provete de solo inicial suficiente para obter de 20 g a 30 g de material com dimensão inferior a 0,063 mm.
- Determinar o teor em água do solo utilizando outro provete, de acordo com a EN ISO 17892-1:2014.
- Determinar a massa volúmica das partículas utilizando outro provete, de acordo com a ISO 17892-3:2015.
- Pesar o provete de solo (m_w) com uma aproximação de 0,1 g ou 0,1 % da sua massa consoante o valor que for maior.
- Remover as partículas de dimensão superior a 2,0 mm.
- Adicionar agente dispersante equivalente a 10 % do volume final da suspensão.
- Agitar a suspensão utilizando um agitador ou misturador mecânico o tempo suficiente para que as partículas do solo se dispersem completamente.
- Transferir a suspensão para um peneiro de abertura 0,063 mm, colocado sobre um recipiente limpo.
- Lavar as partículas finas através do peneiro utilizando água destilada, não excedendo 80% do volume final da suspensão. Se o volume total da suspensão que passa no peneiro exceder o volume final da suspensão, remover a água em excesso por evaporação.
- Transferir a suspensão que passa no peneiro para a proveta de sedimentação e completar o volume com água destilada até à marca de referência.

-
- Transferir o material retido no peneiro para um recipiente apropriado e secar em estufa. Depois de arrefecer, pesar com uma aproximação de 0,1 % ou 0,01 g da sua massa (m_s), consoante o valor que for maior.
 - Caso tenha sido feito um ensaio de peneiração sobre uma amostra de grandes dimensões, o material retido no peneiro pode ser rejeitado.
 - Caso contrário, peneirar esse material retido no peneiro de 0,063 mm, conforme a metodologia descrita no item 4.2.2. Qualquer material que passe no peneiro de abertura 0,063 mm deve ser adicionado à proveta de sedimentação.
 - Preparar a proveta de sedimentação com uma solução de referência, utilizando o mesmo volume de solução dispersante que é utilizado no ensaio e completar o volume com água destilada até à marca de graduação especificada. Tratar esta proveta de referência de forma idêntica à da proveta que contém a suspensão de solo.
 - Ensaiar a solução na proveta de referência ao mesmo tempo em que as amostras, ou antecipadamente. Em qualquer dos casos, esta solução deve ser ensaiada de cada vez que é preparado um novo lote de solução com reagente, devendo ser aplicado um fator de correção da temperatura.

d) Correção do menisco

Antes de utilizar o densímetro é necessário fazer a correção do menisco, seguindo os passos apresentados a seguir:

- Colocar o densímetro dentro de uma proveta para sedimentação com, aproximadamente, 800 ml de água.
- Começar a olhar ligeiramente abaixo do plano da superfície do líquido e levantar os olhos até que a superfície deixe de ser vista como uma elipse e passe a ser uma linha reta, determinar o ponto onde o plano interceta a escala do densímetro.
- Começar a olhar ligeiramente acima do plano da superfície do líquido e determinar o ponto onde o limite superior do menisco interceta a escala do densímetro.
- O cálculo da correção do menisco (C_m) é feito pela diferença entre o ponto do limite inferior e o ponto do limite superior.

e) Execução do ensaio

-
- Colocar o densímetro na solução de referência certificando que ele consegue flutuar livremente.
 - Ler o valor indicado no densímetro (R'_o) ao nível do bordo superior do menisco, com uma aproximação de 0,0005 g/ml.
 - Remover o densímetro e lavar com água destilada.
 - Agitar vigorosamente a suspensão com solo para obter-se uma suspensão completa.
 - Imediatamente após terminar a agitação, ligar o cronómetro.
 - Colocar a proveta na posição de ensaio, sem agitar a suspensão.
 - Prontamente introduzir o densímetro na solução, assegurando a sua livre flutuação.
 - Ler os valores indicados no densímetro (R'_h) ao nível do bordo superior do menisco. Fazer pelo menos três leituras durante os primeiros cinco minutos. As leituras aos 0,5 min, 1 min e 2 min são normalmente adequadas. Registrar as leituras com uma aproximação de 0,0005 g/ml.
 - Ao término das leituras iniciais, remover o densímetro lentamente e lavar com água destilada.
 - Exigem-se pelo menos três leituras adicionais. Leituras 4 min, 8 min, 30 min, 1 h, 2 h, 6 h e 24 h são normalmente adequadas, desde que o tempo efetivo seja registado.
 - Inserir lentamente o densímetro na suspensão cerca de quinze segundos antes de qualquer leitura. Registrar as leituras do densímetro com uma aproximação de 0,0005 g/ml.
 - Terminar o ensaio quando estiver determinada a proporção de partículas com dimensão inferior a 0,002 mm.
 - Registrar a temperatura da suspensão uma vez durante os primeiros quinze minutos e depois, após cada leitura do densímetro, com uma aproximação de 0,1 °C.
- f) Resultados do ensaio:
- Calcular a massa seca total do provete através da Equação (4.5):

$$m = m_w \times \frac{100}{100 + \omega} \quad (4.5)$$

Sendo:

m = massa seca total, em gramas (g);

m_w = massa húmida do solo, em gramas (g);

ω = teor em água, em percentagem (%).

- Se o solo foi pré-tratado, a massa seca após pré-tratamento substitui m na Equação (4.5).
- Se a massa do provete tiver sido reduzida por repartição, multiplicar as massas após repartição pela razão das massas ante e depois da repartição, obtendo-se as massas retidas ajustadas para cada peneiro.
- Corrigir, para o efeito do menisco, os valores indicados no densímetro, através da Equação (4.6).

$$R_h = R'_h + C_m \quad (4.6)$$

Onde:

R_h = leitura verdadeira do densímetro;

R'_h = leitura observada no densímetro;

C_m = correção do menisco.

- Calcular a profundidade efetiva, H_r , a partir da leitura verdadeira do densímetro utilizando a curva de calibração do densímetro.
- Calcular o diâmetro equivalente das partículas correspondentes à leitura R_h utilizando a lei de Stokes através da Equação (4.7).

$$d_i = 0,005531 \sqrt{\frac{\eta \times H_r}{(\rho_s - \rho_w) \times t}} \quad (4.7)$$

Onde:

d_i = diâmetro equivalente das partículas, em milímetros (mm);

η = viscosidade dinâmica da água à temperatura do ensaio, em milipascal segundo (mPa.s), conforme Tabela 17;

H_r = profundidade efetiva do densímetro, em milímetros (mm);

ρ_s = massa volúmica das partículas, em megagramas por metro cúbico (Mg/m³);

ρ_w = massa volúmica do fluido de sedimentação à temperatura de ensaio, em megagramas por metro cúbico (Mg/m³);

t = tempo decorrido desde o início da sedimentação, em minutos (min).

Tabela 17 - Viscosidade dinâmica da água. Fonte: EN ISO17892-4:2016.

Temperatura °C	Viscosidade mPa·s
10	1,304
15	1,137
20	1,002
25	0,891
30	0,798

Nota 1
Os valores intermédios podem ser estimados por interpolação. Alternativamente a viscosidade dinâmica pode ser calculada de forma aproximada, através da expressão:
$$\eta = 0,02414 \times 10^{(247,8 / (T+133))}$$
Onde: T = temperatura de ensaio, em °C, no intervalo acima indicado.

Nota 2
Assume-se que a viscosidade da solução com agente dispersante é a mesma que a da água.

- A massa volúmica da água pura pode ser admitida como 1,00 Mg/m³, uma vez que a sua variação com a temperatura é negligenciável durante a realização do ensaio e considerando a exatidão requerida.
- Corrigir o efeito da solução de referência na leitura do densímetro através da Equação (4.8).

$$R_d = R_h - R_0 \quad (4.8)$$

Onde:

R_d = Leitura corrigida do densímetro;

R_h = Leitura verdadeira do densímetro;

R_0 = Leitura observada no densímetro para solução de referência R'_0 corrigida para o menisco.

- Calcular a fração das partículas de dimensão inferior ao diâmetro equivalente por meio da Equação (4.9).

$$K = \frac{100 \times \rho_s}{m (\rho_s - 1)} R_d \quad (4.9)$$

Onde:

K = fração das partículas de dimensão inferior ao diâmetro equivalente, em percentagem (%);

ρ_s = massa volúmica das partículas de solo, em megagramas por metro cúbico (Mg/m³);

m = massa seca do provete, em gramas (g);

R_d = leitura corrigida do densímetro.

- Caso as partículas com dimensão superior a 2 mm tenham sido excluídas do ensaio, ajustar o valor de K para refletir a quantidade de material superior a 2 mm, através da Equação (4.10).

$$K_c = \frac{K \times f_{2.00}}{100} \quad (4.10)$$

Onde:

K_c = fração ajustada das partículas de dimensão inferior ao diâmetro equivalente, em percentagem (%);

K = fração das partículas de dimensão inferior ao diâmetro equivalente, em percentagem (%);

$f_{2.00}$ = fração que passa no peneiro de 2 mm no ensaio de peneiração, em percentagem (%).

4.3.3. Ensaio combinados

Os métodos por peneiração e por sedimentação podem ser combinados, para isso é necessário a realização de um ensaio de peneiração e outro de sedimentação em provetes diferentes retirados da mesma amostra, seguindo os procedimentos descritos em 4.3.1 e em 4.3.2, respetivamente. Os resultados devem ser combinados em um gráfico semilogarítmico para se apresentar uma curva contínua e suave.

4.4. Apresentação dos resultados

Os resultados que serão apresentados a seguir representam os ensaios de peneiração e sedimentação isolados e também a combinação entre eles.

No método da sedimentação, a separação das partículas foi realizada tanto com uma agitação mais vigorosa realizada por um agitador mecânico a 18 000 rpm, quanto para uma agitação mais suave em um agitador magnético a 300 rpm.

Apresenta-se ainda a combinação entre o ensaio por sedimentação com o ensaio por peneiração utilizando o mesmo provete.

Nos dois tipos de solos, foram realizadas três repetições para a análise granulométrica por peneiração e três repetições para a análise por sedimentação para cada um dos tipos de agitação.

A seguir são apresentados os resultados obtidos.

4.4.1. Solo A

O Solo A representa um solo residual granítico, este solo foi ensaiado por peneiração e por sedimentação. A Tabela 18 apresenta os resultados do ensaio por peneiração (ensaio P_A), ou seja, a fração do Solo A que passa através de cada um dos peneiros utilizados no ensaio. Também estão calculados e apresentados na Tabela 18 a média, o desvio padrão e a variância entre os ensaios para cada um dos peneiros.

Tabela 18 – Ensaio P_A.

Análise granulométrica por peneiração - Solo A										
f _n - fração que passa através do peneiro (%)										
Ensaio 1		Ensaio 2		Ensaio 3		Mínimo	Máximo	Média	Variância	Desvio padrão
Abertura dos peneiros (mm)	f _n (%)	Abertura dos peneiros (mm)	f _n (%)	Abertura dos peneiros (mm)	f _n (%)					
63,000	100	63,000	100	63,000	100	100	100	100	0,000	0,000
37,500	100	37,500	100	37,500	100	100	100	100	0,000	0,000
20,000	97	20,000	97	20,000	98	97	98	98	0,666	0,816
10,000	89	10,000	91	10,000	89	89	91	90	1,397	1,182
6,300	81	6,300	78	6,300	76	76	81	79	6,076	2,465
2,000	48	2,000	43	2,000	39	39	48	43	17,800	4,219
0,600	26	0,600	25	0,600	23	23	26	24	3,450	1,857
0,200	17	0,200	16	0,200	15	15	17	16	0,996	0,998
0,063	11	0,063	10	0,063	9	9	11	10	1,270	1,127

A Figura 17 apresenta o gráfico semilogarítmico com as curvas granulométricas obtidas em cada uma das três repetições realizadas para o ensaio por peneiração para o Solo A.

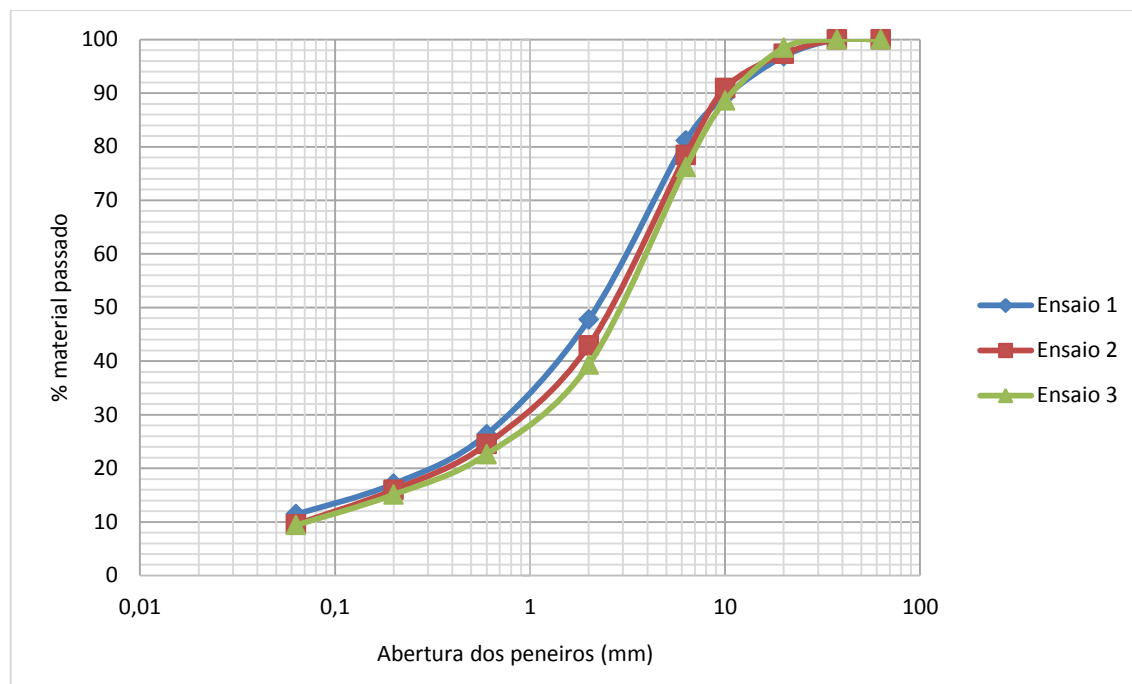


Figura 17 – Curvas granulométricas obtidas para o ensaio P_A.

A Tabela 19 apresenta os resultados obtidos para cada uma das repetições realizadas para o ensaio de análise granulométrica por sedimentação no Solo A. Para garantir que as partículas do solo se dispersem completamente, foi aplicada uma agitação vigorosa em um agitador mecânico com velocidade de 18 000 rpm por 10 min (ensaio Sv_A). A tabela também apresenta os valores máximos, mínimos, o desvio-padrão e a variância para cada um dos diâmetros equivalentes das partículas.

Tabela 19 – Ensaio Sv_A.

Análise granulométrica por sedimentação - Solo A - Agitação vigorosa (18 000 rpm por 10 min)										
K _C - fração corrigida das partículas de dimensão inferior ao diâmetro equivalente (%)										
Ensaio 1		Ensaio 2		Ensaio 3		Mínimo	Máximo	Média	Variância	Desvio padrão
Diâmetro equivalente das partículas (mm)	K _C (%)	Diâmetro equivalente das partículas (mm)	K _C (%)	Diâmetro equivalente das partículas (mm)	K _C (%)					
0,073	11	0,073	11	0,073	10	10	11	11	0,983	0,992
0,052	11	0,052	11	0,052	9	9	11	10	0,927	0,963
0,037	10	0,037	10	0,037	9	9	10	10	0,694	0,833
0,026	10	0,027	9	0,027	8	8	10	9	0,590	0,768
0,019	8	0,020	7	0,019	7	7	8	7	0,416	0,645
0,010	6	0,010	6	0,010	6	6	6	6	0,207	0,455
0,007	6	0,007	6	0,007	5	5	6	5	0,155	0,394
0,005	5	0,005	5	0,005	4	4	5	5	0,067	0,259
0,003	3	0,003	3	0,003	3	3	3	3	0,021	0,144
0,002	3	0,002	3	0,002	2	2	3	2	0,081	0,285

A Figura 18 apresenta as curvas granulométricas obtidas para ensaio Sv_A.

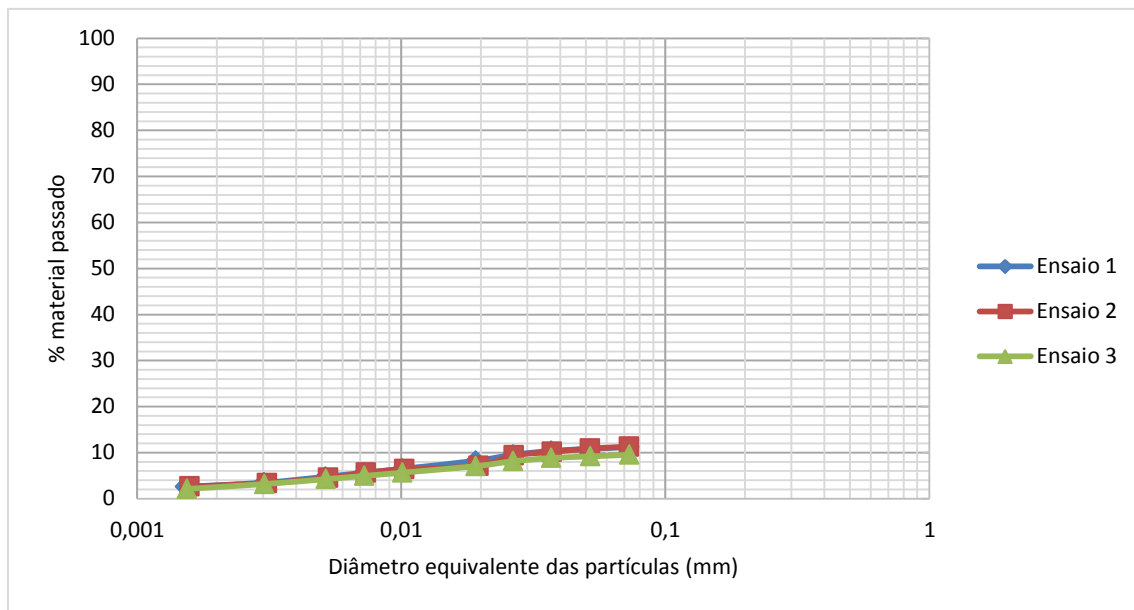


Figura 18 – Curvas granulométricas obtidas para o ensaio Sv_A.

Os resultados obtidos no ensaio por sedimentação foram combinados aos resultados obtidos por peneiração. A Figura 19 apresenta o gráfico semilogarítmico com as curvas granulométricas obtidas em cada uma das três repetições realizadas para o ensaio de análise granulométrica por peneiração e sedimentação com agitação vigorosa para o Solo A (ensaio PSv_2_A).

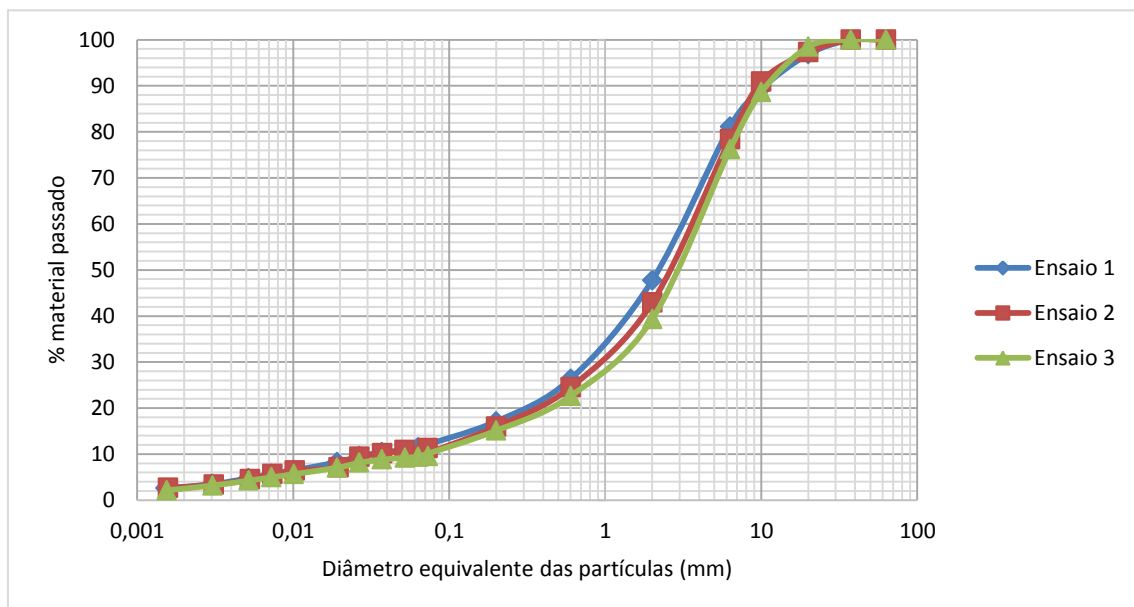


Figura 19 – Curvas granulométricas obtidas para o ensaio PSv_2_A.

A norma EN ISO 17892-4:2016 recomenda que os resultados do ensaio obtidos através de peneiração e de sedimentação sejam combinados num gráfico semilogarítmico de forma a se

apresentar uma curva contínua e suave. Com o objetivo de definir curvas mais suaves, o gráfico foi ajustado. O diâmetro equivalente definido pela primeira leitura do densímetro foi removida, uma vez que esta apresenta um valor superior à abertura do último peneiro do ensaio de peneiração. A Figura 20 apresenta o gráfico em que o primeiro ponto da análise por sedimentação foi removido.

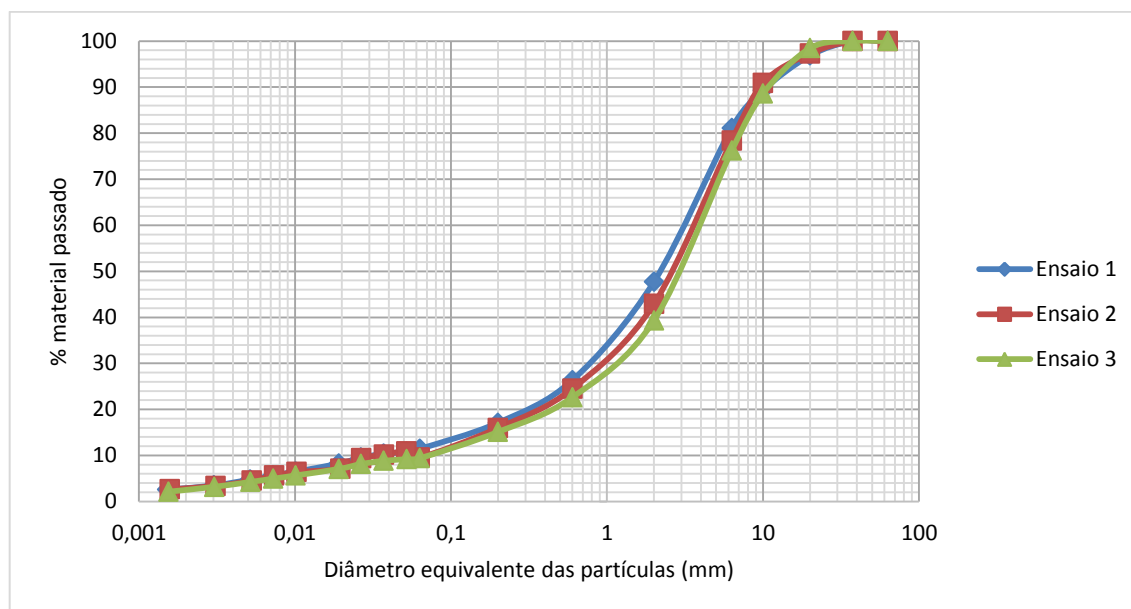


Figura 20 – Curvas granulométricas obtidas para o ensaio PSv_2_A – Gráfico ajustado.

Foram realizadas outras três repetições em que, para garantir que as partículas do solo se dispersem completamente, aplicou-se uma agitação suave em um agitador magnético com velocidade de 300 rpm, durante 4 h (ensaio Ss_A). A Tabela 20 apresenta os resultados obtidos para esse caso.

Tabela 20 – Ensaio Ss_A.

Análise granulométrica por sedimentação - Solo A - Agitação suave (300 rpm por 4 h)										
K _c - fração corrigida das partículas de dimensão inferior ao diâmetro equivalente (%)										
Ensaio 1		Ensaio 2		Ensaio 3		Mínimo	Máximo	Média	Variância	Desvio padrão
Diâmetro equivalente das partículas (mm)	K _c (%)	Diâmetro equivalente das partículas (mm)	K _c (%)	Diâmetro equivalente das partículas (mm)	K _c (%)					
0,060	15	0,067	12	0,062	12	12	15	13	3,085	1,756
0,044	14	0,048	12	0,045	12	12	14	13	2,455	1,567
0,032	14	0,035	11	0,033	11	11	14	12	2,597	1,611
0,024	12	0,025	10	0,024	10	10	12	11	1,603	1,266
0,017	11	0,018	9	0,018	9	9	11	10	1,083	1,041
0,010	8	0,010	7	0,010	7	7	8	7	0,753	0,868
0,007	7	0,007	6	0,007	6	6	7	6	0,715	0,845
0,005	6	0,005	5	0,005	5	5	6	5	0,492	0,701
0,003	5	0,003	4	0,003	4	4	5	4	0,322	0,568
0,002	3	0,002	3	0,002	3	3	3	3	0,198	0,444

A Figura 21 apresenta as curvas granulométricas obtidas para o ensaio Ss_A.

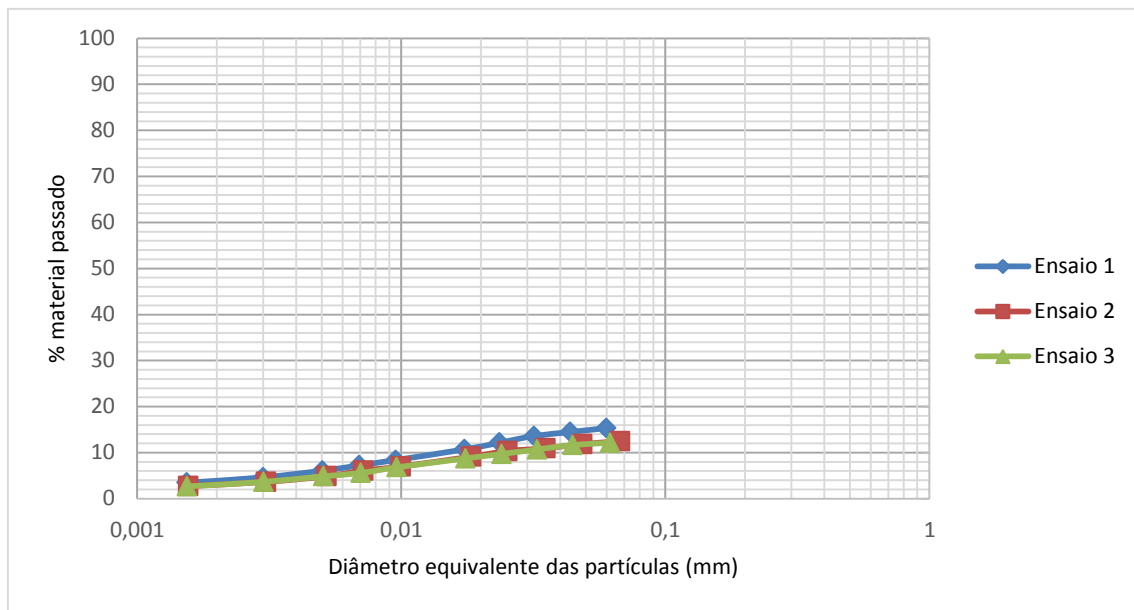


Figura 21 – Curvas granulométricas obtidas para o ensaio Ss_A.

A Figura 22 apresenta o gráfico semilogarítmico com as curvas granulométricas combinadas para o ensaio de análise granulométrica por peneiração e sedimentação com agitação suave para o Solo A (ensaio PSs_2_A).

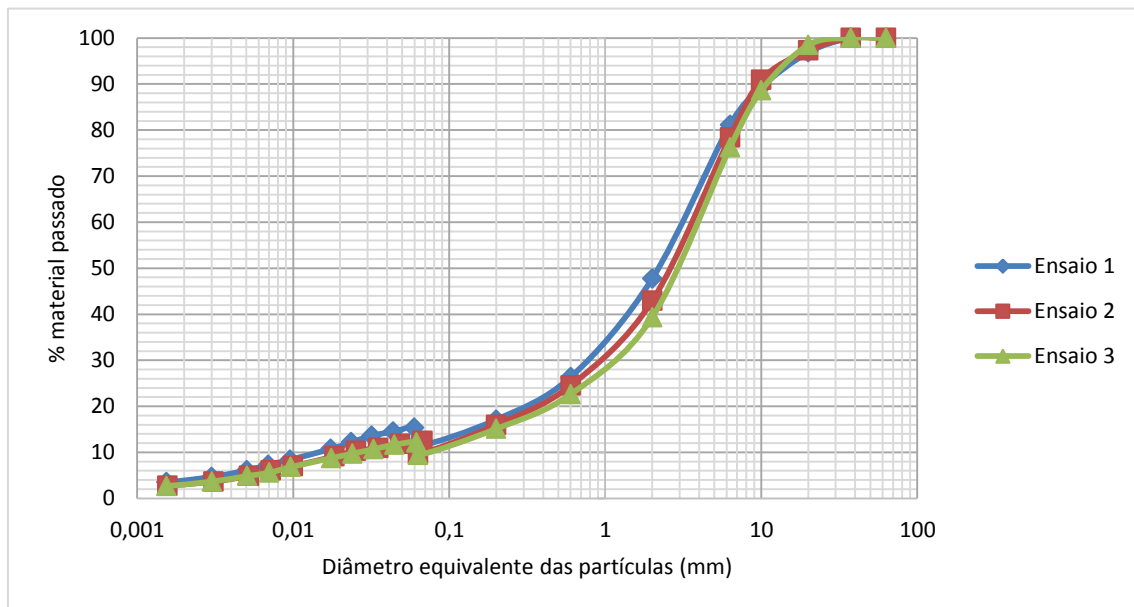


Figura 22 – Curvas granulométricas obtidas para o ensaio PSs_2_A.

Com o objetivo de definir curvas mais suaves, o gráfico foi ajustado. O diâmetro equivalente definido pela primeira leitura do densímetro foi removida, uma vez que esta apresenta um

valor próximo à abertura do último peneiro do ensaio de peneiração. A Figura 23 apresenta o gráfico em que o primeiro ponto da análise por sedimentação foi removido.

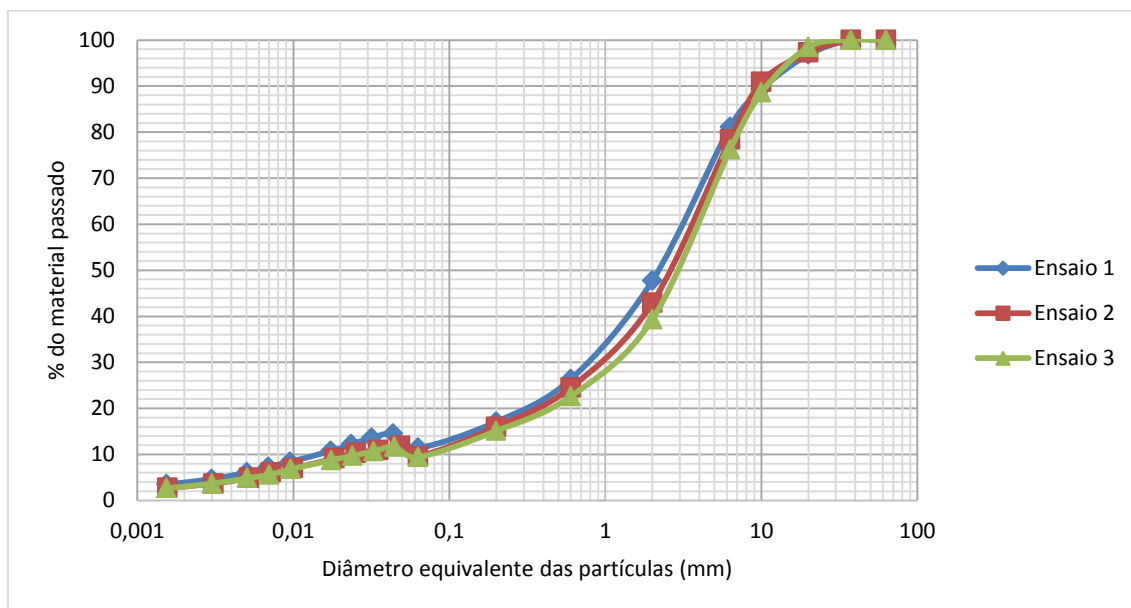


Figura 23 – Curvas granulométricas obtidas para o ensaio PSs_2_A - Gráfico ajustado.

A norma determina que, caso o ensaio de peneiração tenha sido realizado, não há necessidade de peneirar o material retido no peneiro de abertura 0,063 mm durante o ensaio por sedimentação. No entanto, optou-se por peneirar este material em todos os casos ensaiados, para que fosse possível uma comparação com os resultados obtidos no ensaio por peneiração.

A Tabela 21 apresenta a percentagem do material que passa através de cada um dos peneiros, o valor mínimo, máximo, médio, a variância e o desvio padrão para as três repetições realizadas para o ensaio de sedimentação com agitação vigorosa (ensaio PSv_1_A).

Tabela 21 – Ensaio PSv_1_A.

Análise granulométrica por sedimentação com agitação vigorosa										
f_n - fração que passa através do peneiro (%)										
Ensaio 1		Ensaio 2		Ensaio 3		Mínimo	Máximo	Média	Variância	Desvio padrão
Abertura dos peneiros (mm)	f_n (%)	Abertura dos peneiros (mm)	f_n (%)	Abertura dos peneiros (mm)	f_n (%)					
63,000	100	63,000	100	63,000	100	100	100	100	0,000	0,000
37,500	100	37,500	100	37,500	100	100	100	100	0,000	0,000
20,000	97	20,000	97	20,000	98	97	98	98	0,667	0,817
10,000	89	10,000	91	10,000	89	89	91	90	1,398	1,182
6,300	81	6,300	78	6,300	76	76	81	79	6,076	2,465
2,000	47	2,000	47	2,000	47	47	47	47	0,001	0,036
0,600	28	0,600	31	0,600	28	28	31	29	2,677	1,636
0,200	19	0,200	21	0,200	19	19	21	20	2,325	1,525
0,063	12	0,063	13	0,063	12	12	13	12	0,853	0,923

A Figura 24 apresenta as curvas granulométricas obtidas para o solo A por meio da peneiração do material retido no ensaio PSv_1_A.

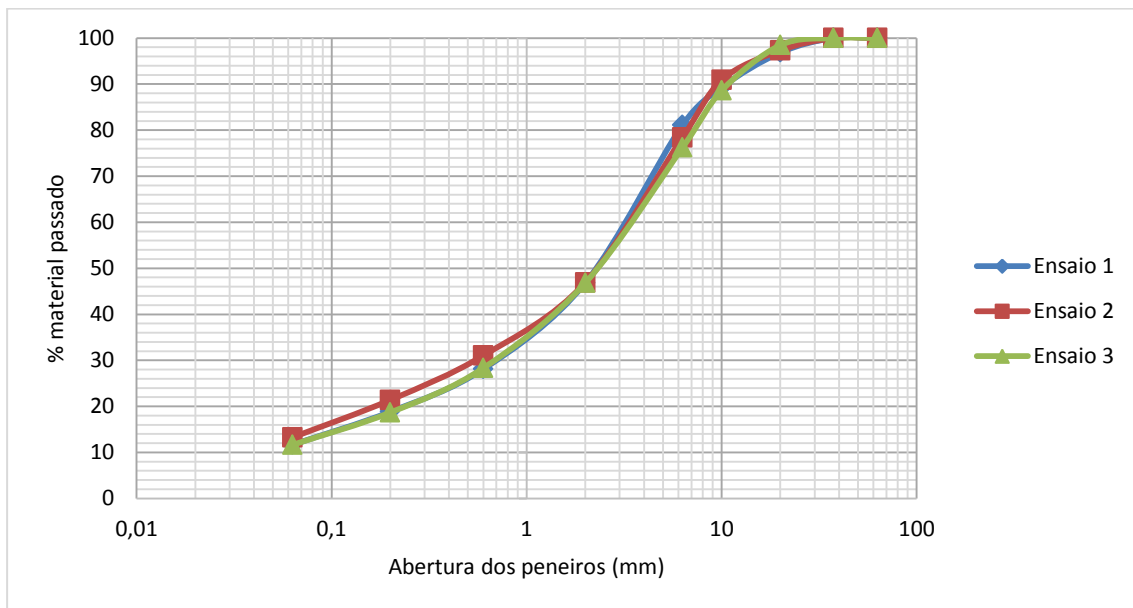


Figura 24 – Curvas granulométricas obtidas por peneiração – Ensaio PSv_1_A.

Ao combinar estas curvas com as curvas obtidas pelo ensaio de sedimentação com agitação vigorosa do provete, obtém-se o gráfico representado na Figura 25.

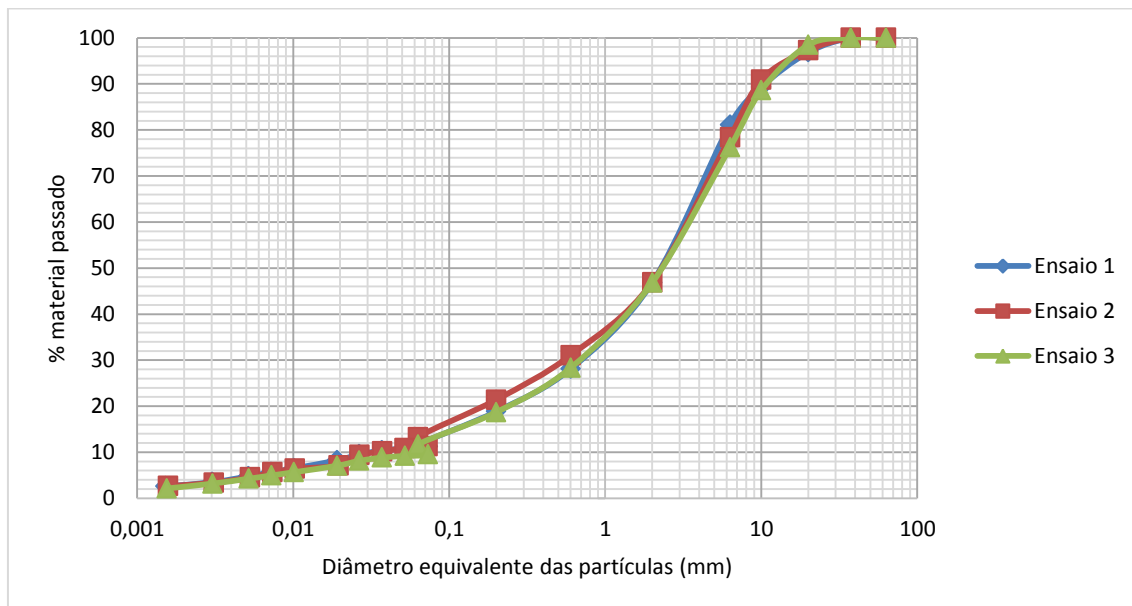


Figura 25 – Curvas granulométricas obtidas para o ensaio PSv_1_A.

Com o objetivo de obter um gráfico com curvas mais suaves, o diâmetro equivalente definido pela primeira leitura do densímetro foi removido. A Figura 26 apresenta o gráfico ajustado.

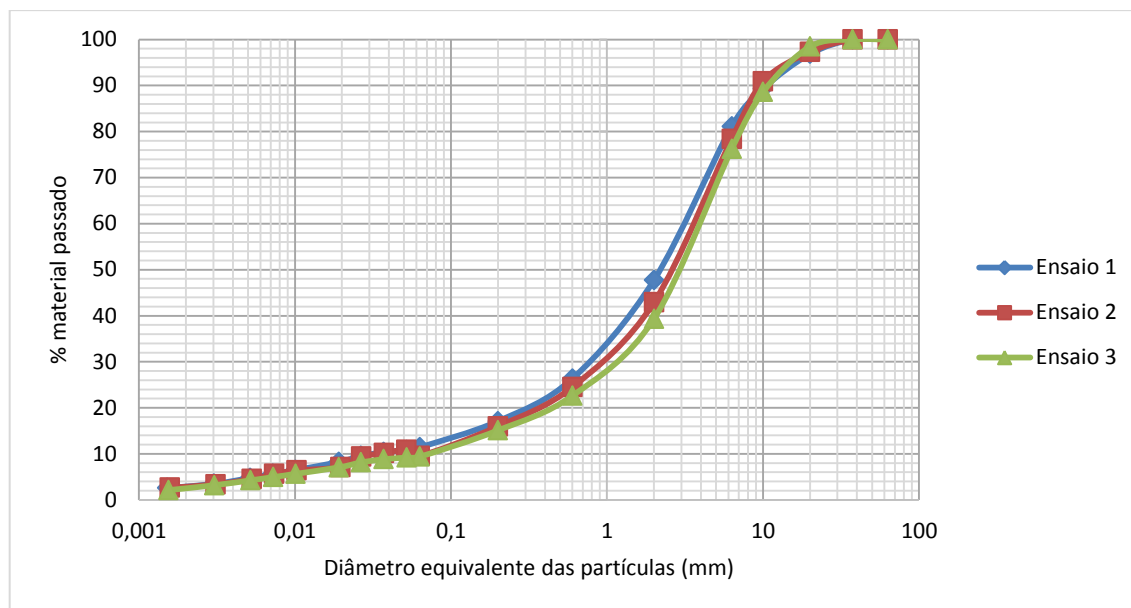


Figura 26 – Curvas granulométricas obtidas para o ensaio PSv_1_A – Gráfico ajustado.

A Tabela 22 apresenta a porcentagem do material que passa através de cada um dos peneiros, o valor mínimo, máximo, médio, a variância e o desvio padrão para as três repetições realizadas no material retido no peneiro com abertura de 0,063 mm durante o ensaio de sedimentação com agitação suave (ensaio PSs_1_A).

Tabela 22 – Ensaio PSs_1_A.

Análise granulométrica por sedimentação com agitação suave										
f _n - fração que passa através do peneiro (%)										
Ensaio 1		Ensaio 2		Ensaio 3		Mínimo	Máximo	Média	Variância	Desvio padrão
Abertura dos peneiros (mm)	f _n (%)	Abertura dos peneiros (mm)	f _n (%)	Abertura dos peneiros (mm)	f _n (%)					
63,000	100	63,000	100	63,000	100	100	100	100	0,000	0,000
37,500	100	37,500	100	37,500	100	100	100	100	0,000	0,000
20,000	97	20,000	97	20,000	98	97	98	98	0,666	0,816
10,000	89	10,000	91	10,000	89	89	91	90	1,397	1,182
6,300	81	6,300	78	6,300	76	76	81	79	6,076	2,465
2,000	48	2,000	46	2,000	47	46	48	47	1,013	1,007
0,600	36	0,600	35	0,600	36	35	36	35	0,733	0,856
0,200	26	0,200	25	0,200	27	25	27	26	0,956	0,978
0,063	16	0,063	15	0,063	15	15	16	15	0,285	0,534

A Figura 27 apresenta as curvas granulométricas obtidas para o solo A por meio da peneiração do material no ensaio PSs_1_A.

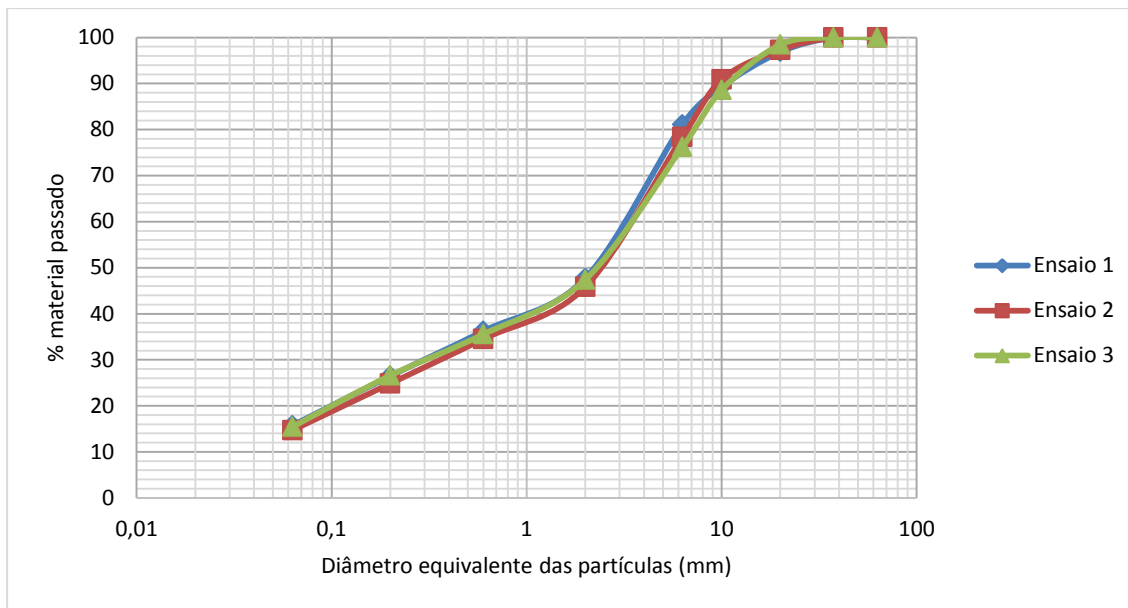


Figura 27 – Curvas granulométricas obtidas por peneiração – Ensaio PSs_1_A.

Ao combinar estas curvas com as curvas obtidas pelo ensaio de sedimentação com agitação suave, obtém-se o gráfico representado na Figura 28.

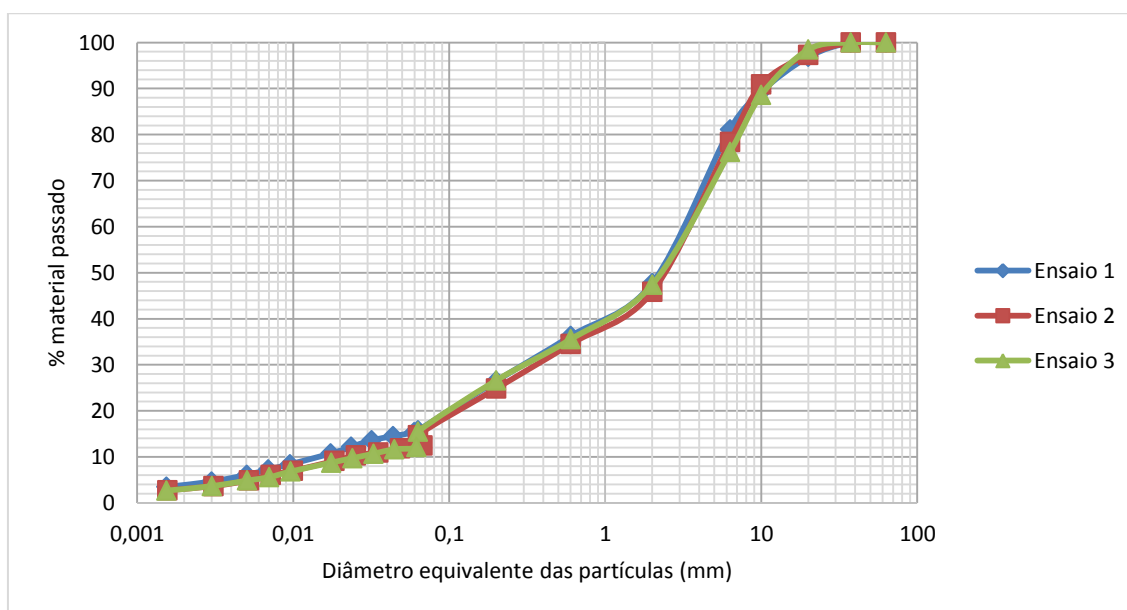


Figura 28 – Curvas granulométricas obtidas para o ensaio PSs_1_A.

Para obter um gráfico com curvas mais suaves, o diâmetro equivalente definido pela primeira leitura do densímetro foi removido. A Figura 29 apresenta o gráfico ajustado.

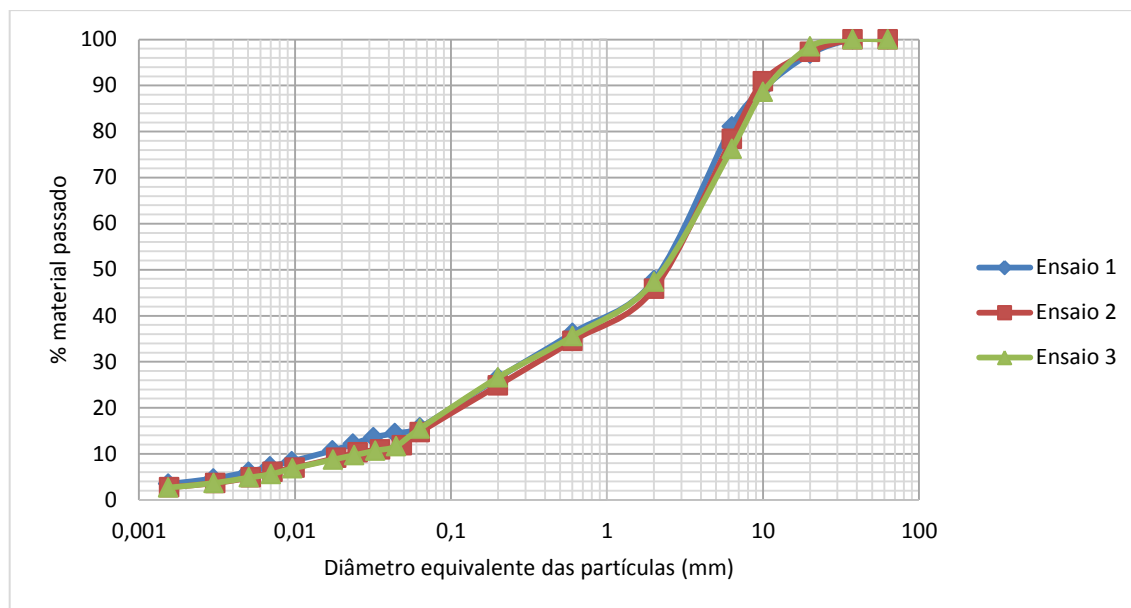


Figura 29 - Curvas granulométricas obtidas para o ensaio PSs_1_A - Gráfico ajustado.

4.4.2. Solo B

O Solo B representa um solo argiloso de natureza caulínica, este solo foi ensaiado por peneiração e por sedimentação. A Tabela 23 apresenta os resultados obtidos nas três repetições realizadas pelo método da peneiração (ensaio P_B), ou seja, a fração do Solo B que passa através de cada um dos peneiros utilizados no ensaio. Também estão calculados e apresentados na Tabela 23 a média, o desvio padrão e a variância entre os ensaios para cada um dos peneiros.

Tabela 23 – Ensaio P_B.

Análise granulométrica por peneiração - Solo B										
f _n - fração que passa através do peneiro (%)										
Ensaio 1		Ensaio 2		Ensaio 3		Mínimo	Máximo	Média	Variância	Desvio padrão
Abertura dos peneiros (mm)	f _n (%)	Abertura dos peneiros (mm)	f _n (%)	Abertura dos peneiros (mm)	f _n (%)					
63,000	100	63,000	100	63,000	100	100	100	100	0,000	0,000
37,500	100	37,500	100	37,500	100	100	100	100	0,000	0,000
20,000	100	20,000	100	20,000	100	100	100	100	0,000	0,000
10,000	100	10,000	100	10,000	100	100	100	100	0,000	0,000
6,300	100	6,300	100	6,300	100	100	100	100	0,000	0,000
2,000	100	2,000	100	2,000	100	100	100	100	0,002	0,050
0,600	98	0,600	98	0,600	98	98	98	98	0,004	0,064
0,200	88	0,200	88	0,200	88	88	88	88	0,016	0,125
0,063	69	0,063	70	0,063	70	69	70	70	0,367	0,605

A Figura 30 apresenta o gráfico semilogarítmico com as curvas granulométricas obtidas em cada uma das três repetições realizadas para o ensaio P_B.

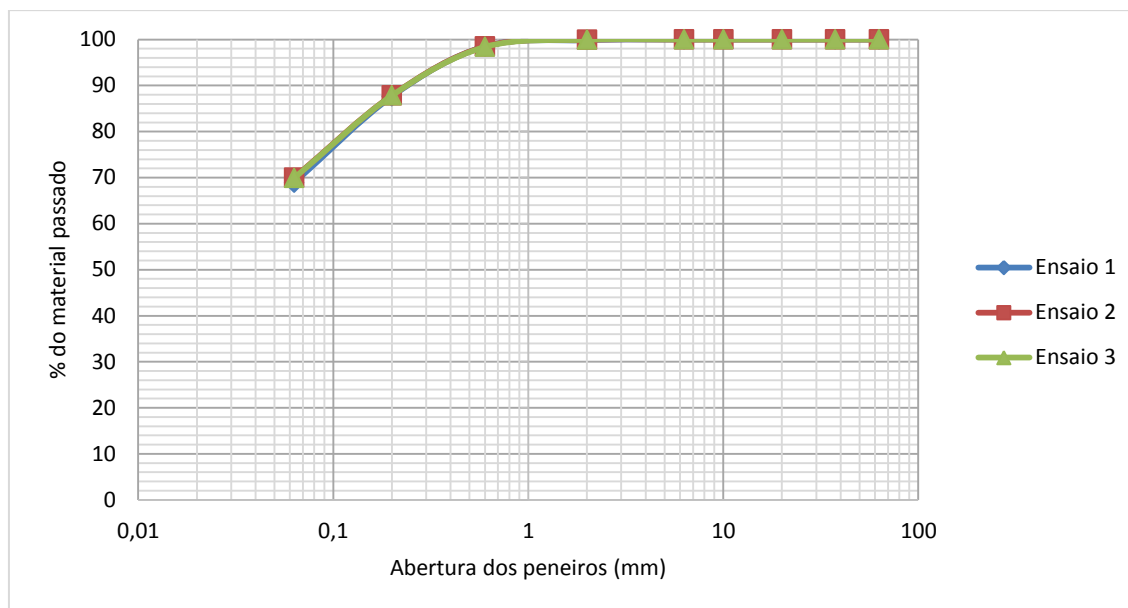


Figura 30 – Curvas granulométricas obtidas para o ensaio P_B.

A Tabela 24 apresenta os resultados obtidos para cada uma das repetições realizadas para o ensaio de análise granulométrica por sedimentação no Solo B. Neste caso, para garantir que as partículas do solo se dispersem completamente, foi aplicada uma agitação vigorosa em um agitador mecânico com velocidade de 18 000 rpm por 10 min (ensaio Sv_B). A tabela também apresenta os valores máximos, mínimos, o desvio-padrão e a variância para cada um dos diâmetros equivalentes das partículas.

Tabela 24 – Ensaio Sv_B

Análise granulométrica por sedimentação - Solo B - Agitação vigorosa (18 000 rpm por 10 min)										
K _c - fração corrigida das partículas de dimensão inferior ao diâmetro equivalente (%)										
Ensaio 1		Ensaio 2		Ensaio 3		Mínimo	Máximo	Média	Variância	Desvio padrão
Diâmetro equivalente das partículas (mm)	K _c (%)	Diâmetro equivalente das partículas (mm)	K _c (%)	Diâmetro equivalente das partículas (mm)	K _c (%)					
0,067	76	0,068	76	0,064	77	76	77	76	0,621	0,788
0,048	74	0,049	74	0,046	76	74	76	75	0,869	0,932
0,034	72	0,035	72	0,033	74	72	74	73	1,160	1,077
0,024	70	0,025	70	0,023	70	70	70	70	0,054	0,233
0,017	68	0,018	68	0,017	67	67	68	67	0,537	0,733
0,009	58	0,009	59	0,009	59	58	59	59	1,025	1,013
0,007	56	0,007	55	0,006	54	54	56	55	0,772	0,879
0,005	49	0,005	51	0,005	50	49	51	50	0,840	0,916
0,003	45	0,003	45	0,003	45	45	45	45	0,027	0,165
0,001	41	0,001	39	0,001	38	38	41	39	2,994	1,730

A Figura 31 apresenta as curvas granulométricas obtidas para o Solo B no ensaio Sv_B.

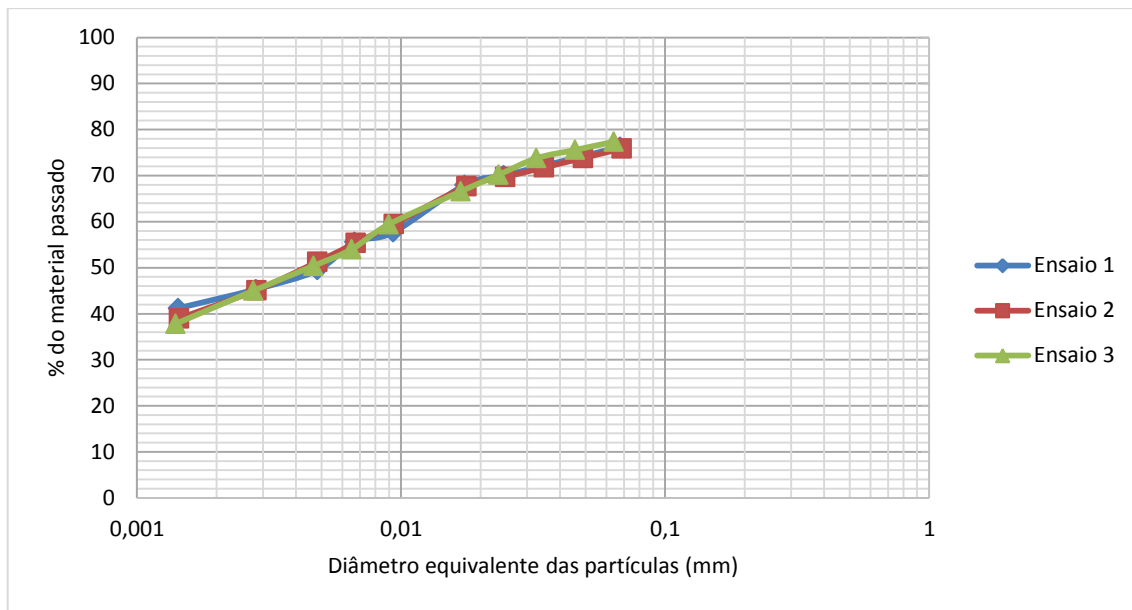


Figura 31 – Curvas granulométricas obtidas para o ensaio Sv_B.

Os resultados obtidos no ensaio por sedimentação foram combinados aos resultados obtidos por peneiração. A Figura 32 apresenta o gráfico semilogarítmico com as curvas granulométricas obtidas em cada uma das três repetições realizadas para o ensaio PSv_2_B.

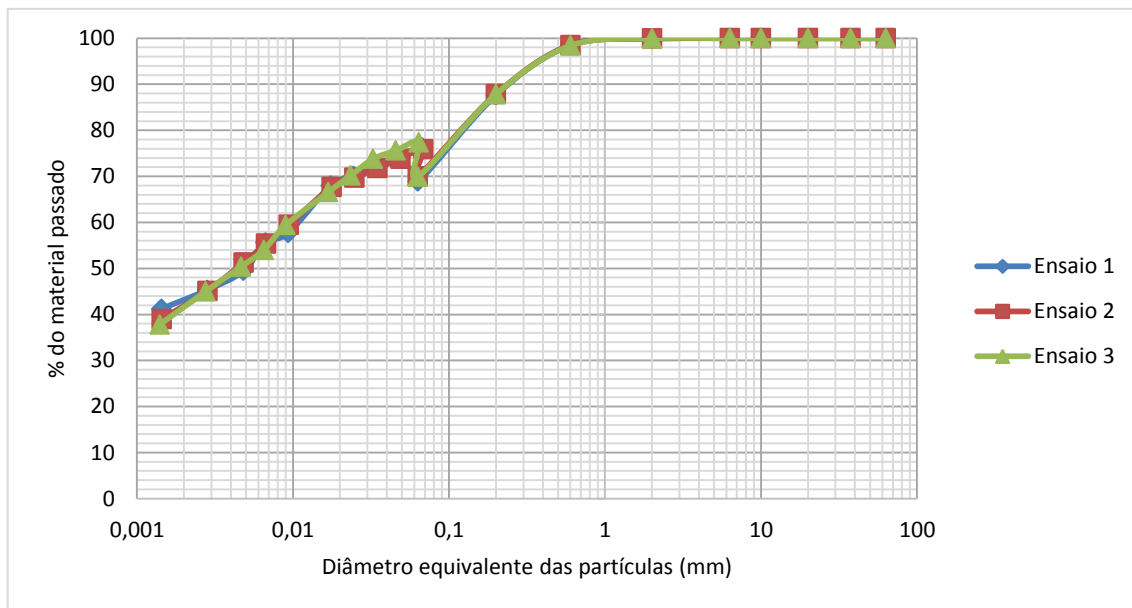


Figura 32 – Curvas granulométricas obtidas para ensaio PSv_2_B.

Com o objetivo de definir curvas mais suaves, o gráfico foi ajustado. A Figura 33 apresenta o gráfico em que o primeiro ponto da análise por sedimentação foi removido, tendo em vista que os valores de diâmetros equivalentes determinados pela primeira leitura foram superiores à abertura do último peneiro do ensaio de peneiração.

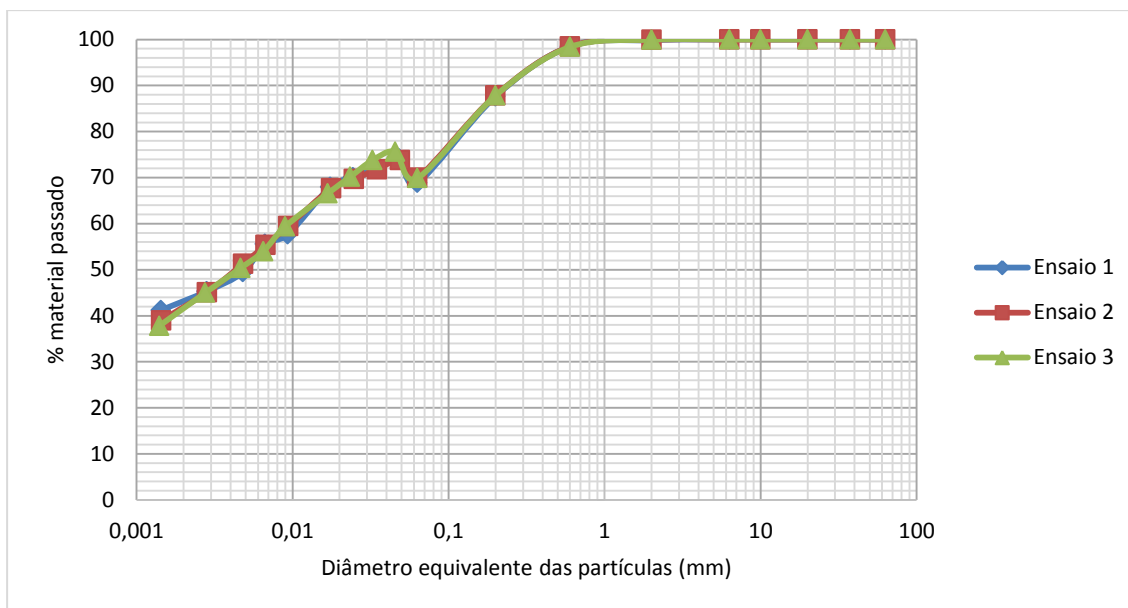


Figura 33 – Curvas granulométricas obtidas para ensaio PSv_2_B – Gráfico ajustado.

Foram realizadas outras três repetições em que, para garantir que as partículas do solo se dispersem completamente, aplicou-se uma agitação suave em um agitador magnético com velocidade de 300 rpm, durante 4 h (ensaio Ss_B). A Tabela 25 apresenta os resultados obtidos para esse caso.

Tabela 25 – Ensaio Ss_B.

Análise granulométrica por sedimentação - Solo B - Agitação suave (300 rpm por 4h)										
K _c - fração corrigida das partículas de dimensão inferior ao diâmetro equivalente (%)										
Ensaio 1		Ensaio 2		Ensaio 3		Mínimo	Máximo	Média	Variância	Desvio padrão
Diâmetro equivalente das partículas (mm)	K _c (%)	Diâmetro equivalente das partículas (mm)	K _c (%)	Diâmetro equivalente das partículas (mm)	K _c (%)					
0,071	83	0,071	84	0,072	81	81	84	83	2,598	1,612
0,050	80	0,051	82	0,051	78	78	82	80	2,572	1,604
0,036	78	0,036	79	0,037	76	76	79	78	2,547	1,596
0,026	73	0,026	76	0,026	73	73	76	74	3,933	1,983
0,018	70	0,018	74	0,019	71	70	74	72	3,862	1,965
0,010	63	0,010	66	0,010	63	63	66	64	3,652	1,911
0,007	58	0,007	61	0,007	61	58	61	60	3,455	1,859
0,005	53	0,005	56	0,005	56	53	56	55	3,326	1,824
0,003	48	0,003	51	0,003	51	48	51	50	3,199	1,789
0,001	43	0,001	43	0,001	43	43	43	43	0,108	0,329

A Figura 34 apresenta as curvas granulométricas obtidas no ensaio Ss_B.

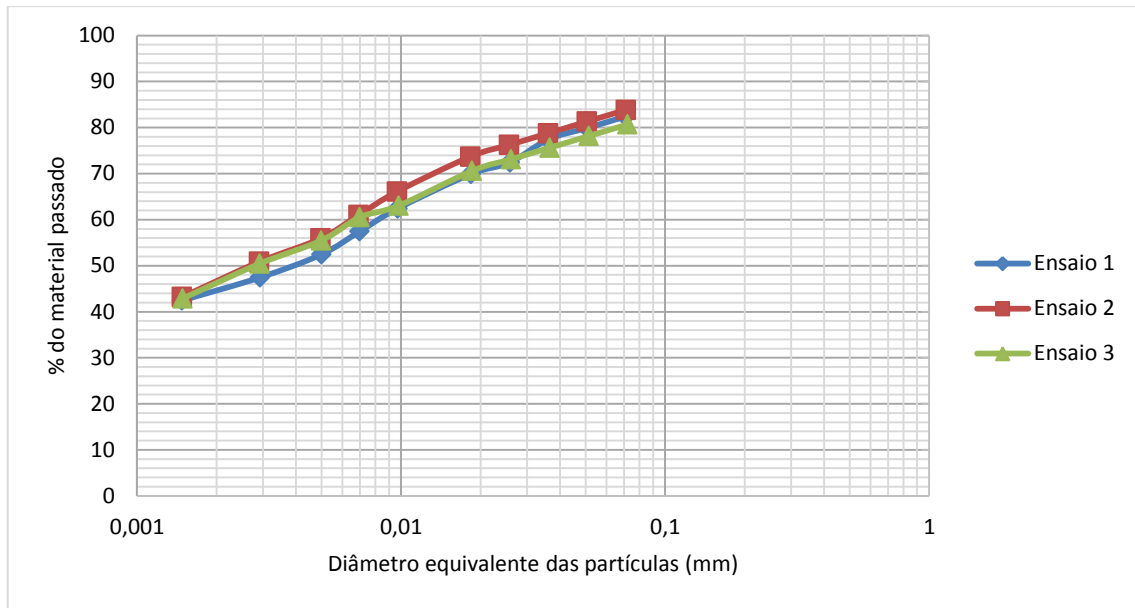


Figura 34 – Curvas granulométricas obtidas para ensaio Ss_B.

Os resultados obtidos no ensaio por sedimentação foram combinados aos resultados obtidos por peneiração. A Figura 35 apresenta o gráfico semilogarítmico com as curvas granulométricas obtidas em cada uma das três repetições realizadas para o ensaio PSs_2_B.

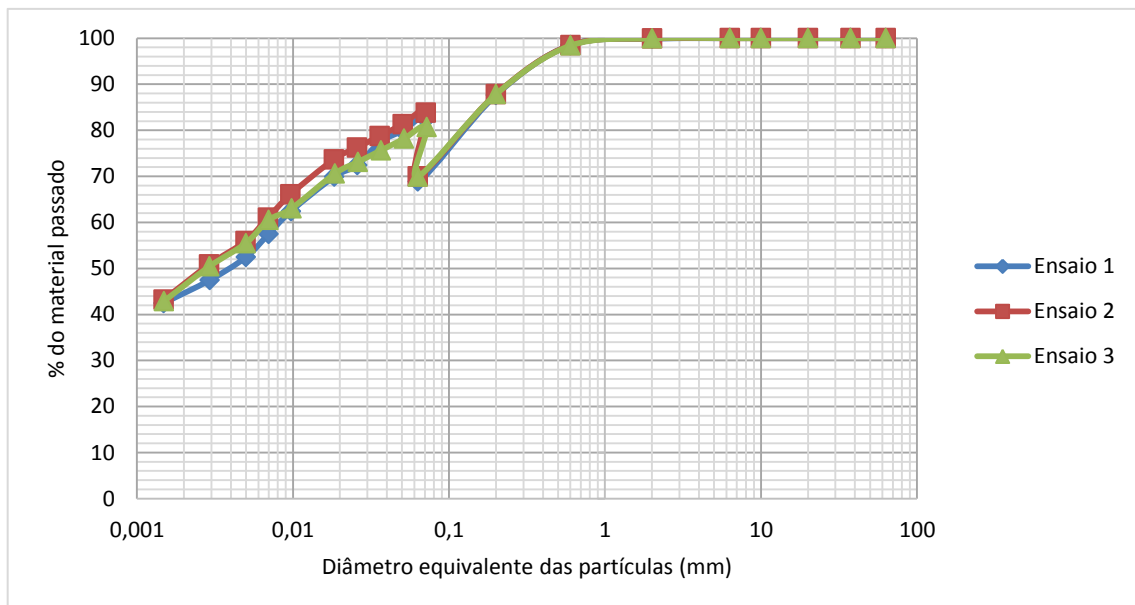


Figura 35 – Curvas granulométricas obtidas para ensaio PSs_2_B.

Com o objetivo de definir curvas mais suaves, o gráfico foi ajustado. A Figura 36 apresenta o gráfico em que o primeiro ponto da análise por sedimentação foi removido por apresentar valores superiores à abertura do último peneiro do ensaio por peneiração.

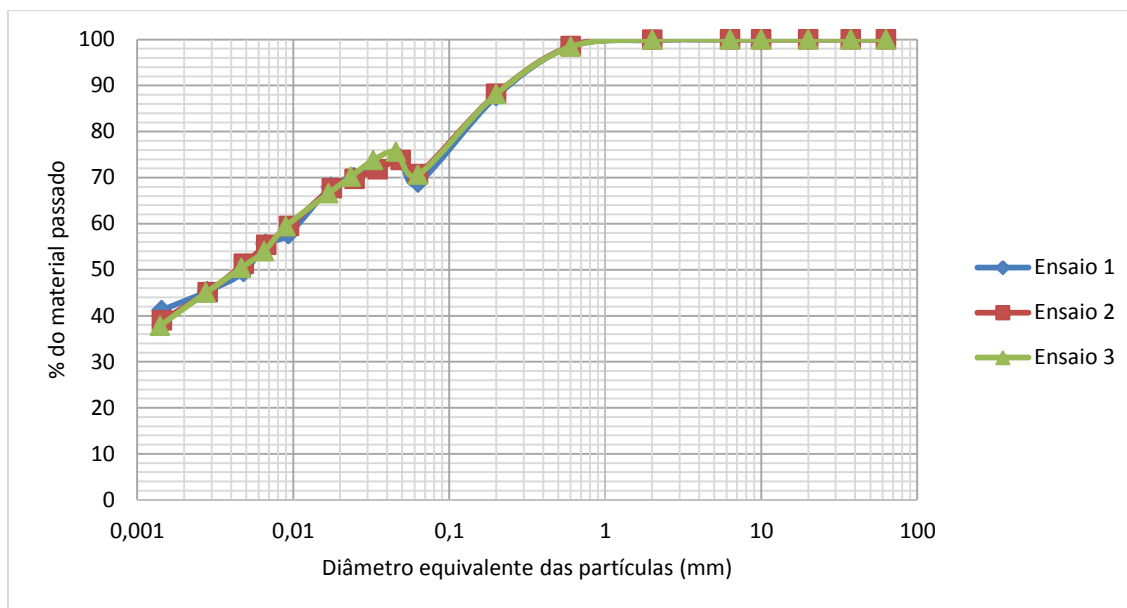


Figura 36 – Curvas granulométricas obtidas para ensaio PSs_2_B – Gráfico ajustado.

Optou-se por peneirar o material retido no peneiro de 0,063 mm, para que fosse possível uma comparação com os resultados obtidos no ensaio por peneiração. A Tabela 26 apresenta a percentagem do material que passa através de cada um dos peneiros, o valor mínimo, máximo, médio, a variância e o desvio padrão para as três repetições realizadas para o ensaio de sedimentação com agitação vigorosa (ensaio PSv_1_B).

Tabela 26 – Ensaio PSv_1_B.

Análise granulométrica por sedimentação com agitação vigorosa										
f_n - fração que passa através do peneiro (%)										
Ensaio 1		Ensaio 2		Ensaio 3		Mínimo	Máximo	Média	Variância	Desvio padrão
Abertura dos peneiros (mm)	f_n (%)	Abertura dos peneiros (mm)	f_n (%)	Abertura dos peneiros (mm)	f_n (%)					
63,000	100	63,000	100	63,000	100	100	100	100	0,000	0,000
37,500	100	37,500	100	37,500	100	100	100	100	0,000	0,000
20,000	100	20,000	100	20,000	100	100	100	100	0,000	0,000
10,000	100	10,000	100	10,000	100	100	100	100	0,000	0,000
6,300	100	6,300	100	6,300	100	100	100	100	0,000	0,000
2,000	100	2,000	100	2,000	100	100	100	100	0,003	0,057
0,600	98	0,600	99	0,600	99	98	99	98	0,098	0,313
0,200	90	0,200	91	0,200	91	90	91	91	0,277	0,527
0,063	76	0,063	78	0,063	78	76	78	77	0,845	0,919

A Figura 37 apresenta as curvas granulométricas obtidas para o ensaio PSv_1_B.

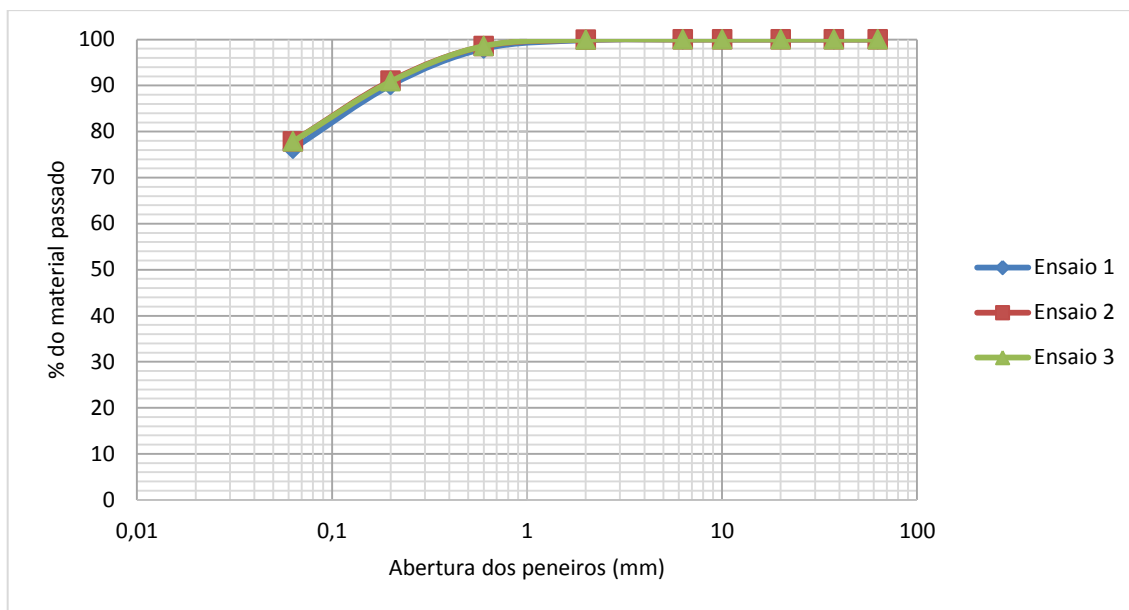


Figura 37 – Curvas granulométricas obtidas por peneiração – Ensaio PSv_1_B.

Ao combinar estas curvas com as curvas obtidas pelo ensaio de sedimentação com agitação vigorosa do provete, obtém-se o gráfico representado na Figura 38.

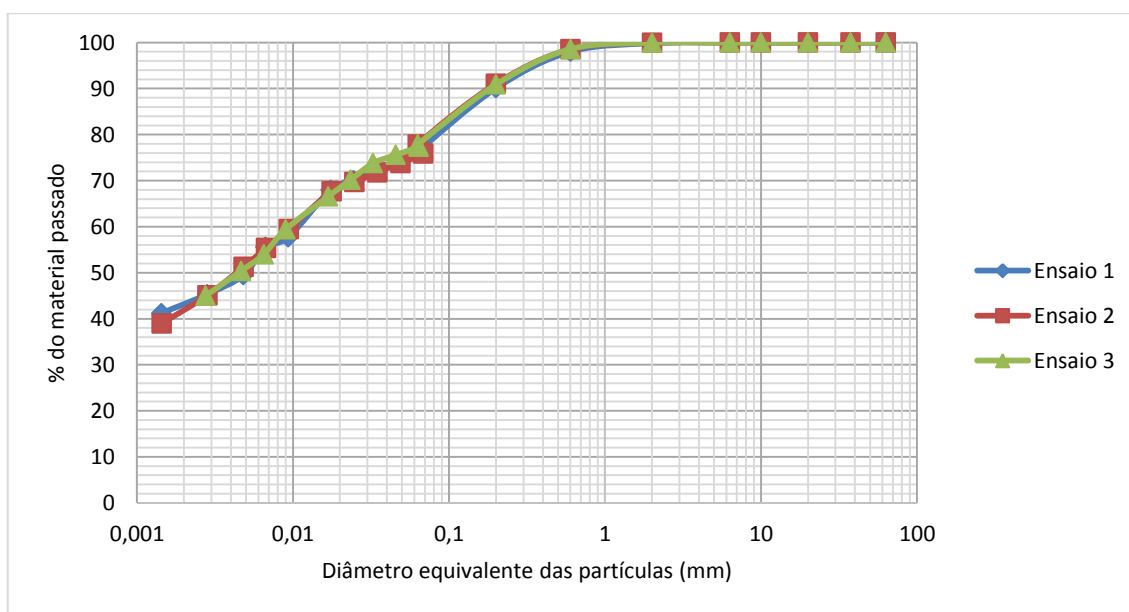


Figura 38 – Curvas granulométricas obtidas para o ensaio PSv_1_B.

Com o objetivo de obter um gráfico com curvas mais suaves, o diâmetro equivalente definido pela primeira leitura do densímetro foi removido. A Figura 39 apresenta o gráfico ajustado.

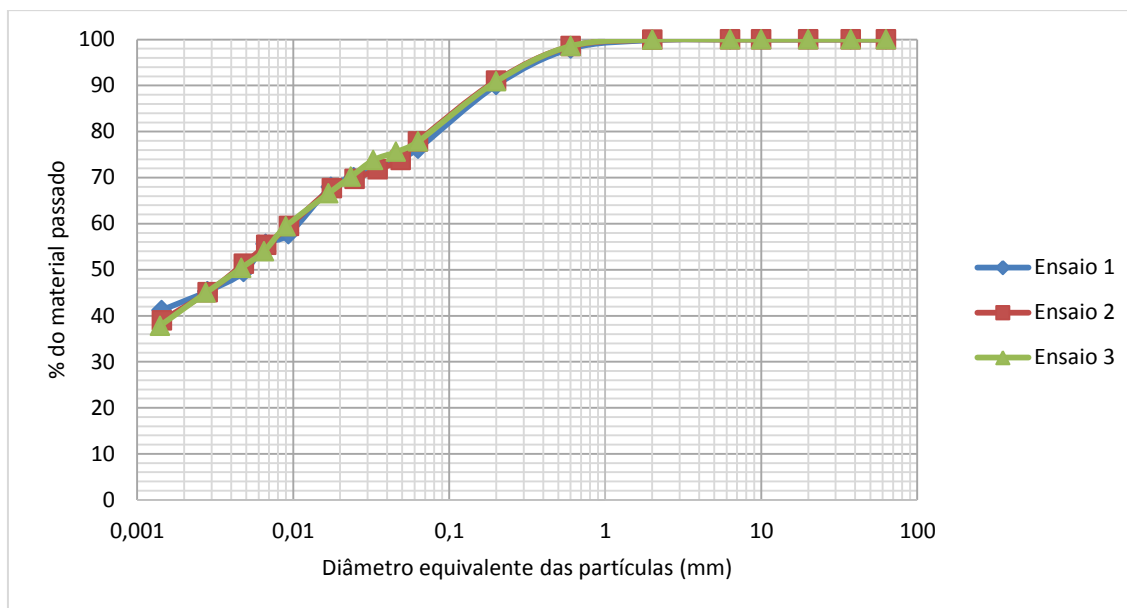


Figura 39 – Curvas granulométricas obtidas para o ensaio PSv_1_B – Gráfico ajustado.

A Tabela 27 apresenta a percentagem do material que passa através de cada um dos peneiros, o valor mínimo, máximo, médio, a variância e o desvio padrão para as três repetições realizadas no material retido no peneiro com abertura de 0,063 mm durante o ensaio de sedimentação com agitação suave (ensaio PSs_1_B).

Tabela 27 – Ensaia PSs_1_B.

Análise granulométrica por sedimentação com agitação suave										
f _n - fração que passa através do peneiro (%)										
Ensaio 1		Ensaio 2		Ensaio 3		Mínimo	Máximo	Média	Variância	Desvio padrão
Abertura dos peneiros (mm)	f _n (%)	Abertura dos peneiros (mm)	f _n (%)	Abertura dos peneiros (mm)	f _n (%)					
63,000	100	63,000	100	63,000	100	100	100	100	0,000	0,000
37,500	100	37,500	100	37,500	100	100	100	100	0,000	0,000
20,000	100	20,000	100	20,000	100	100	100	100	0,000	0,000
10,000	100	10,000	100	10,000	100	100	100	100	0,000	0,000
6,300	100	6,300	100	6,300	100	100	100	100	0,000	0,000
2,000	100	2,000	100	2,000	100	100	100	100	0,047	0,217
0,600	99	0,600	100	0,600	100	99	100	100	0,054	0,232
0,200	93	0,200	93	0,200	93	93	93	93	0,029	0,169
0,063	81	0,063	83	0,063	80	80	83	81	2,080	1,442

A Figura 40 apresenta as curvas granulométricas obtidas para o ensaio PSs_1_B.

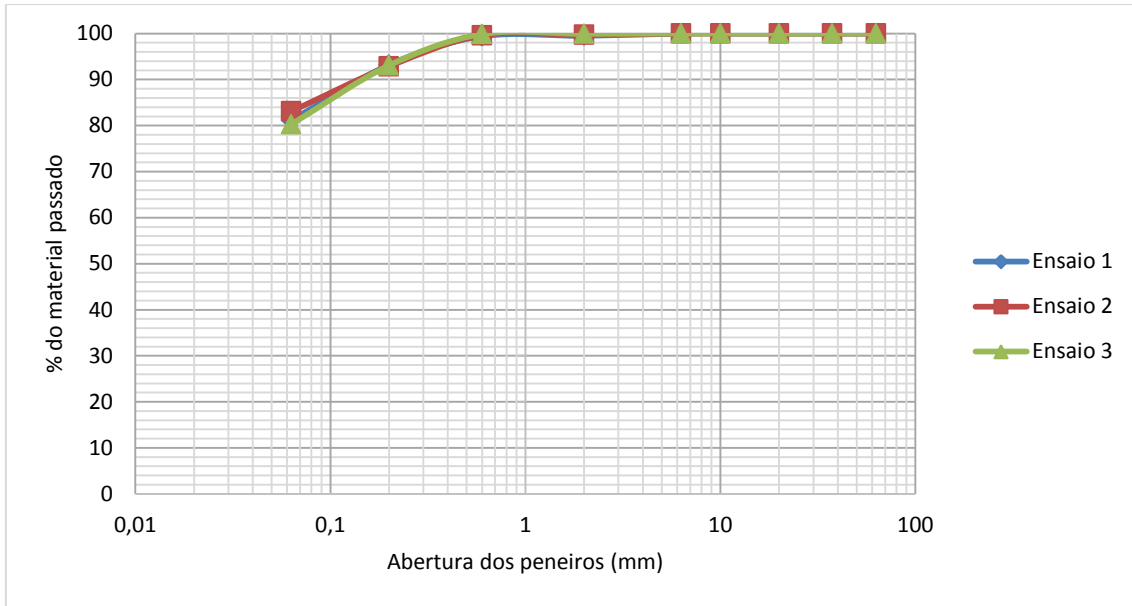


Figura 40 – Curvas granulométricas obtidas por peneiração – Ensaio PSs_1_B.

Ao combinar estas curvas com as curvas obtidas pelo ensaio de sedimentação com agitação suave, obtém-se o gráfico representado na Figura 41.

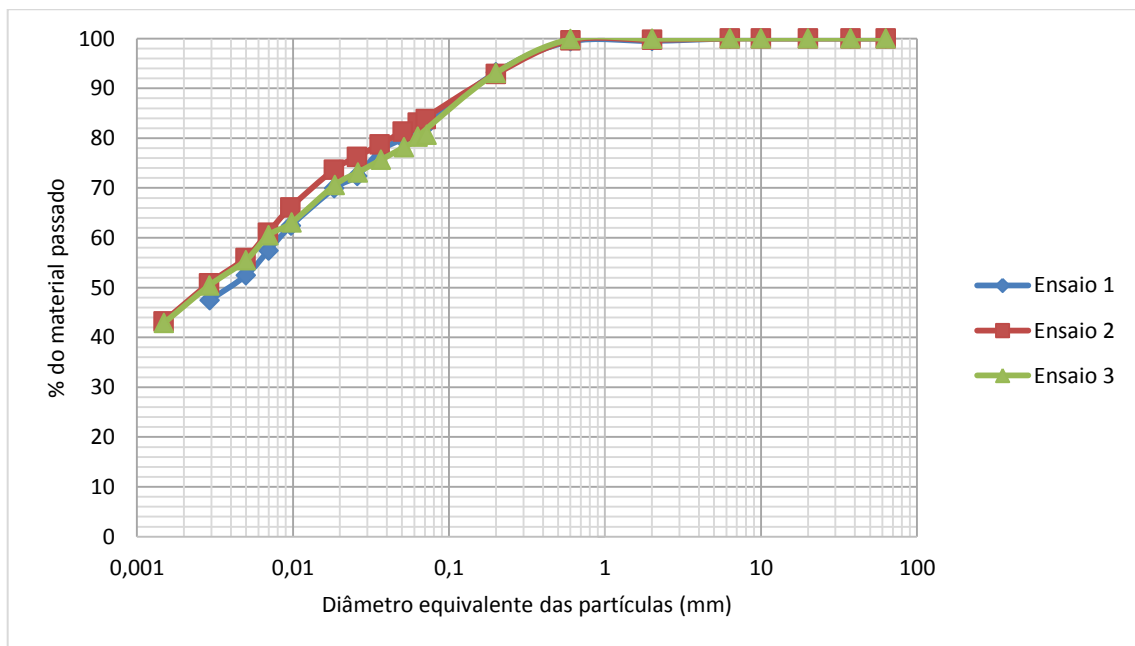


Figura 41 – Curvas granulométricas obtidas para o ensaio PSs_1_B.

Para obter um gráfico com curvas mais suaves, o diâmetro equivalente definido pela primeira leitura do densímetro foi removido. A Figura 42 apresenta o gráfico ajustado.

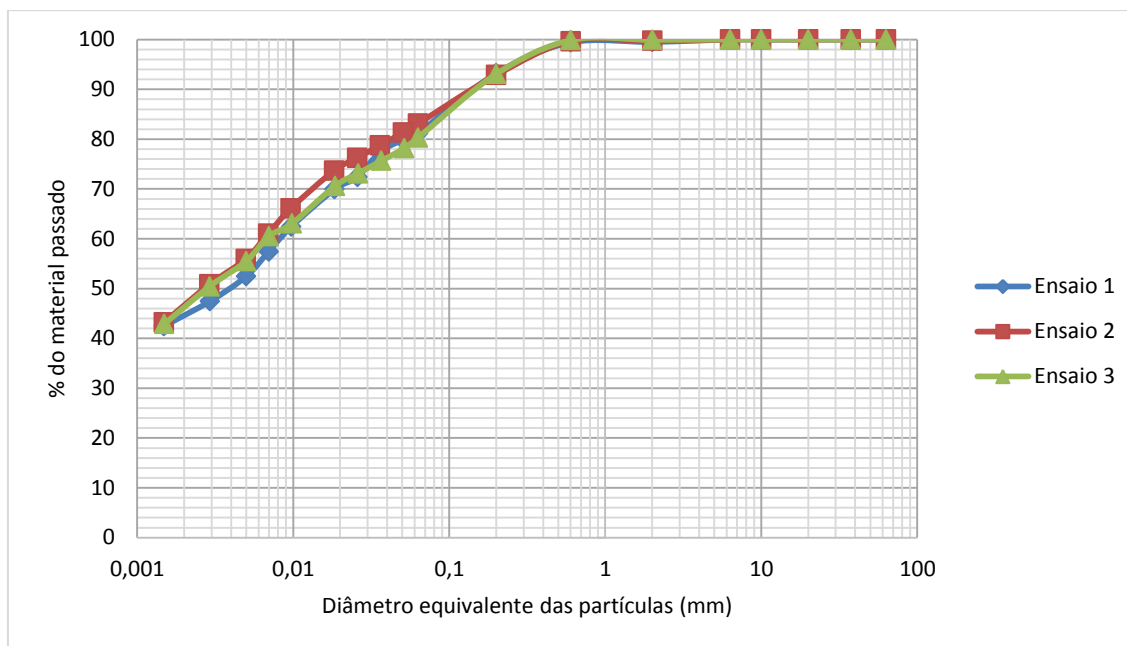


Figura 42 – Curvas granulométricas obtidas para o ensaio PSs_1_B – Gráfico ajustado.

4.5. Análise e discussão dos resultados obtidos

Com base nos ensaios de determinação da distribuição granulométrica realizados para ambos os solos, é possível identificar que o solo residual granítico (solo A) apresenta uma granulometria mais grossa, com 53% de cascalhos, 35% de areias, 9% de siltes e 3% de argilas. O solo argiloso de natureza caulínica (solo B), por sua vez, apresenta uma granulometria mais fina, sendo um solo predominantemente argiloso (45%), com 19% de areia e 36% de siltes.

Os resultados obtidos para ambos os solos podem ser avaliados de acordo com três perspectivas diferentes. A primeira com relação à repetitividade dos ensaios para cada um dos métodos realizados. A segunda está relacionada com a comparação entre os valores obtidos para as diferentes velocidades de agitação aplicadas no método da sedimentação. A terceira diz respeito à combinação entre os métodos de peneiração e sedimentação, avaliando a continuidade da curva granulométrica no ponto de transição entre os dois métodos e comparando os resultados obtidos nos ensaios realizados com provetes distintos com os resultados obtidos com os ensaios realizados utilizando um único provete.

A seguir apresenta-se a análise dos resultados obtidos para cada um dos solos ensaiados.

4.5.1. Solo A

A norma não prevê o número de determinações que devem ser realizadas para que o resultado seja considerado aceitável. No entanto, para cada um dos métodos utilizados foram realizadas

três determinações. Ao analisar os dados apresentados na Tabela 18, na Tabela 19, na Tabela 20, na Tabela 21 e na Tabela 22 é possível observar que os valores da variância e do desvio padrão para cada um dos métodos de ensaio. O desvio padrão indica a dispersão dos dados em relação à média. Porém, como a norma não referencia valores limites para comparação entre as repetições, não foi possível tirar conclusões quanto à repetitividade do ensaio. A Tabela 28 apresenta o valor de desvio padrão mais desfavorável e mais favorável para cada um dos casos.

Tabela 28 – Desvio padrão – Solo A

Ensaio P_A		
f_n - fração que passa através do peneiro (%)		
Abertura do peneiro	20,000 mm	2,000 mm
Ensaio 1	97 %	48 %
Ensaio 2	97 %	43 %
Ensaio 3	98 %	39 %
Média	98 %	43 %
Desvio padrão	0,816 %	4,219 %
Ensaio Sv_A		
K_C - fração corrigida das partículas de dimensão inferior ao diâmetro equivalente (%)		
Diâmetro equivalente das partículas	0,003 mm	0,073 mm
Ensaio 1	3 %	11 %
Ensaio 2	3 %	11 %
Ensaio 3	3 %	10 %
Média	3 %	11 %
Desvio padrão	0,144 %	0,992 %
Ensaio Ss_A		
K_C - fração corrigida das partículas de dimensão inferior ao diâmetro equivalente (%)		
Diâmetro equivalente das partículas	0,002 mm	0,063 mm
Ensaio 1	3 %	15 %
Ensaio 2	3 %	12 %
Ensaio 3	3 %	12 %
Média	3 %	13 %
Desvio padrão	0,444 %	1,756 %
Ensaio PSv_1_A		
f_n - fração que passa através do peneiro (%)		
Abertura do peneiro	2,000 mm	6,300 mm
Ensaio 1	47 %	81 %
Ensaio 2	47 %	78 %
Ensaio 3	47 %	76 %
Média	47 %	79 %
Desvio padrão	0,036 %	2,465 %
Ensaio PSs_1_A		
f_n - fração que passa através do peneiro (%)		
Abertura do peneiro	0,063 mm	6,300 mm
Ensaio 1	16 %	81 %
Ensaio 2	15 %	78 %
Ensaio 3	15 %	76 %
Média	15 %	79 %
Desvio padrão	0,534 %	2,465 %

Para o ensaio P_A, o menor valor de desvio padrão determinado foi para o peneiro com abertura de 20,00 mm, já o maior valor de desvio padrão calculado foi para o peneiro com abertura de 2,00 mm.

Para o ensaio Sv_A, o maior valor foi para o diâmetro equivalente de 0,073 mm e o menor para o diâmetro equivalente de 0,003 mm. Para o ensaio Ss_A, o desvio padrão assumiu um valor mais baixo para o diâmetro equivalente de 0,002 mm e mais alto para o diâmetro equivalente de 0,063 mm, conforme apresentado na Tabela 28.

Para o ensaio PSv_1_A, o menor valor do desvio padrão foi para o peneiro de abertura 2,00 mm e o maior valor foi para o peneiro de 6,30 mm. Para o ensaio PSs_1_A, o menor desvio padrão foi para o peneiro com abertura de 0,063 mm e o maior foi para o peneiro com abertura de 6,30 mm.

Ao comparar os valores obtidos para a sedimentação para uma agitação vigorosa e para uma agitação mais suave, apresentados na Tabela 29, observa-se que, para este tipo de solo, os resultados divergem consoantes ao método escolhido para a dispersão das partículas.

Tabela 29 – Comparação entre os valores obtidos para os ensaios Sv_A e Ss_A.

Análise granulométrica por sedimentação - Solo A											
Diâmetro equivalente das partículas (mm)		K _c - fração corrigida das partículas de dimensão inferior ao diâmetro equivalente (%)									
		Mínimo		Máximo		Média		Variância		Desvio padrão	
Agitação vigorosa	Agitação suave	Agitação vigorosa	Agitação suave	Agitação vigorosa	Agitação suave	Agitação vigorosa	Agitação suave	Agitação vigorosa	Agitação suave	Agitação vigorosa	Agitação suave
0,073	0,063	10	12	11	15	11	13	0,983	3,085	0,992	1,756
0,052	0,046	9	12	11	14	10	13	0,927	2,455	0,963	1,567
0,037	0,033	9	11	10	14	10	12	0,694	2,597	0,833	1,611
0,027	0,024	8	10	10	12	9	11	0,590	1,603	0,768	1,266
0,019	0,018	7	9	8	11	7	10	0,416	1,083	0,645	1,041
0,010	0,010	6	7	6	8	6	7	0,207	0,753	0,455	0,868
0,007	0,007	5	6	6	7	5	6	0,155	0,715	0,394	0,845
0,005	0,005	4	5	5	6	5	5	0,067	0,492	0,259	0,701
0,003	0,003	3	4	3	5	3	4	0,021	0,322	0,144	0,568
0,002	0,002	2	3	3	3	2	3	0,081	0,198	0,285	0,444

Ao analisar a Tabela 29, observa-se que a percentagem das partículas com dimensão inferior ao diâmetro equivalente assume valores ligeiramente superiores para a agitação mais suave. Esse comportamento também pode ser visualizado na Figura 43 que apresenta as curvas médias obtidas para a sedimentação pelo método da sedimentação para ambas as formas de agitação.

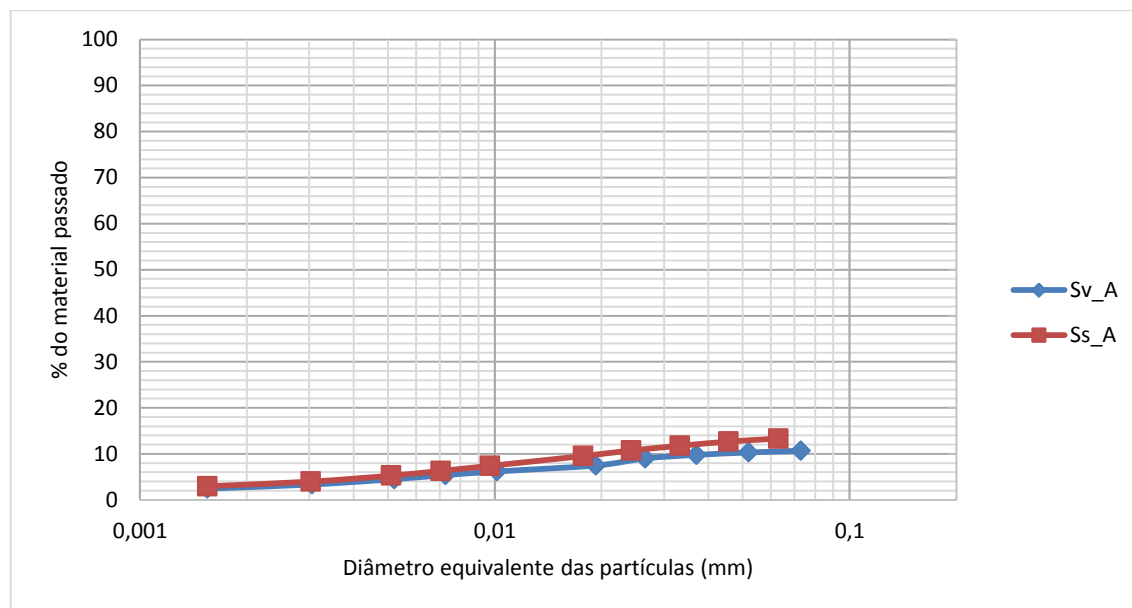


Figura 43 – Curvas médias obtidas para os Ensaios Sv_A e Ss_A.

Pode-se relacionar este efeito ao tempo de reação da suspensão com a solução dispersante, uma vez que, durante a agitação suave, o provete permanece por 4 h no agitador em contato com o agente antifloculante, provocando uma maior dispersão das partículas. Ou seja, para este tipo de solo (solo residual granítico), a escolha do tipo de agitação influencia os resultados obtidos no ensaio.

Com relação à combinação entre os dois métodos (peneiração e sedimentação), a norma determina que os ensaios devam ser realizados separadamente com provetes distintos retirados da mesma amostra. Para o Solo A, na Figura 19 está representada a combinação das curvas granulométricas obtidas pelo ensaio PSv_2_A e na Figura 22 para o ensaio PSs_2_A. Nestas figuras é possível observar que as ligações entre os dois métodos não constituem curvas contínuas e suaves.

Para os dois métodos de agitação, nota-se que o ponto determinado pela primeira leitura do densímetro, realizada 30 s após o início do ensaio, apresenta valores de diâmetro muito próximos ou superiores à abertura do último peneiro utilizado na peneiração (0,063mm). Isto pode estar relacionado com a forma das partículas do solo. Caso haja partículas com forma lamelar, em que uma das dimensões é superior as demais, estas podem ultrapassar a abertura do peneiro, mas possuir um dos lados com dimensão superior a 0,063 mm, sendo detetada sua dimensão através das leituras do densímetro.

No entanto, esta descontinuidade pode estar relacionada também com imprecisões na metodologia de cálculo. Uma vez que a determinação do diâmetro da partícula é calculada por

meio da Lei de Stokes que faz uma relação entre a velocidade de queda das partículas, com o seu diâmetro equivalente.

Em todos os casos ensaiados para o Solo A, mesmo após a retirada do primeiro ponto determinado pela sedimentação, as curvas granulométricas permanecem com uma leve descontinuidade na ligação entre os métodos, conforme observado na Figura 20 para o ensaio PSv_2_A e na Figura 23 para o ensaio PSs_2_A. Isto ocorre devido ao fato das preparações dos dois métodos serem realizadas de formas distintas.

Enquanto para a peneiração o agente dispersante utilizado possui uma concentração de 2 g/l de hexametáfosfato hexassódico dissolvido em água destilada, para a sedimentação a norma recomenda a concentração de 40 g/l de hexametáfosfato hexassódico dissolvido em água destilada. Ademais, para a sedimentação a suspensão deve ser agitada por um agitador ou misturador mecânico de forma a garantir que as partículas de solo se dispersem completamente, sendo que na peneiração recomenda-se que o material fique em um tabuleiro coberto por água por uma hora e seja agitado manualmente com frequência.

Ao comparar a percentagem de material que passa pelo peneiro de 0,063 mm, verifica-se que nos ensaios PSv_1_A e PSs_1_A este valor é superior ao determinado pelo ensaio P_A, conforme demonstrado na Tabela 30. É possível observar ainda que estas percentagens são superiores no caso em que a agitação é suave (PSs_1_A) em que o solo permanece mais tempo em contato com o agente dispersante.

Tabela 30 - Comparação da fração que passa através do peneiro de 0,063mm entre o ensaio P_A e os ensaios PSv_1_A e PSs_1_A.

Método do ensaio	Análise granulométrica por peneiração – Solo A		
	f _n - fração que passa através do peneiro com abertura de 0,063 mm (%)		
	P_A	PSv_1_A	PSs_1_A
Ensaio 1	11	11	16
Ensaio 2	10	13	15
Ensaio 3	9	12	15
Média	10	12	15

A Figura 44 permite visualizar melhor a diferença entre as curva granulométricas obtidas para o ensaio P_A, PSv_1_A e PSs_1_A.

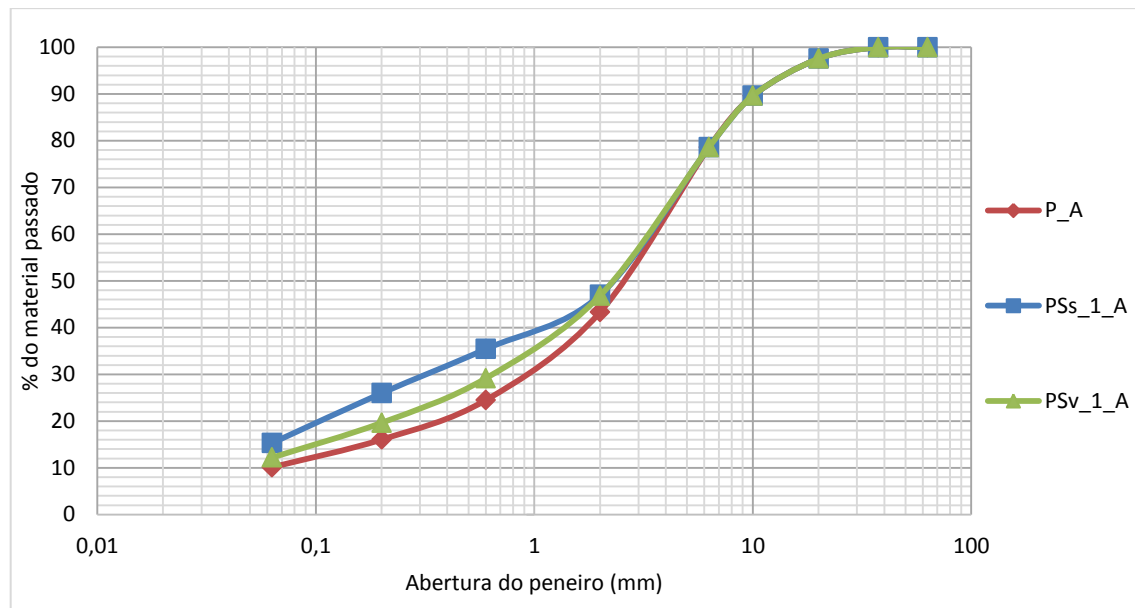
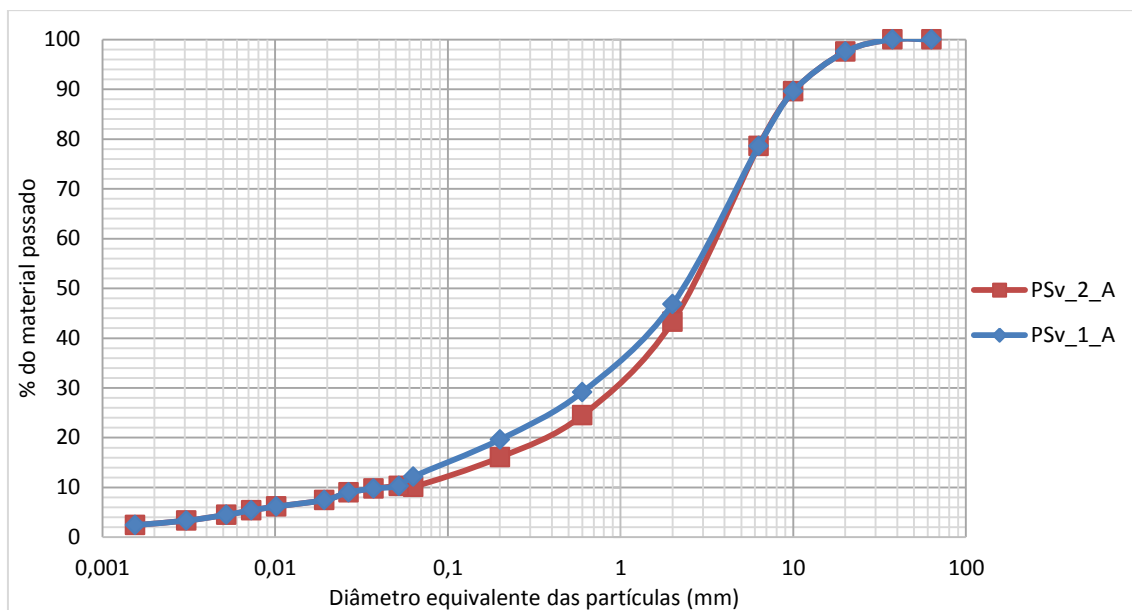


Figura 44 – Comparação entre as curvas granulométricas obtidas pela fração que passa através dos peneiros para os ensaios P_A, PSv_1_A e PSs_1_A.

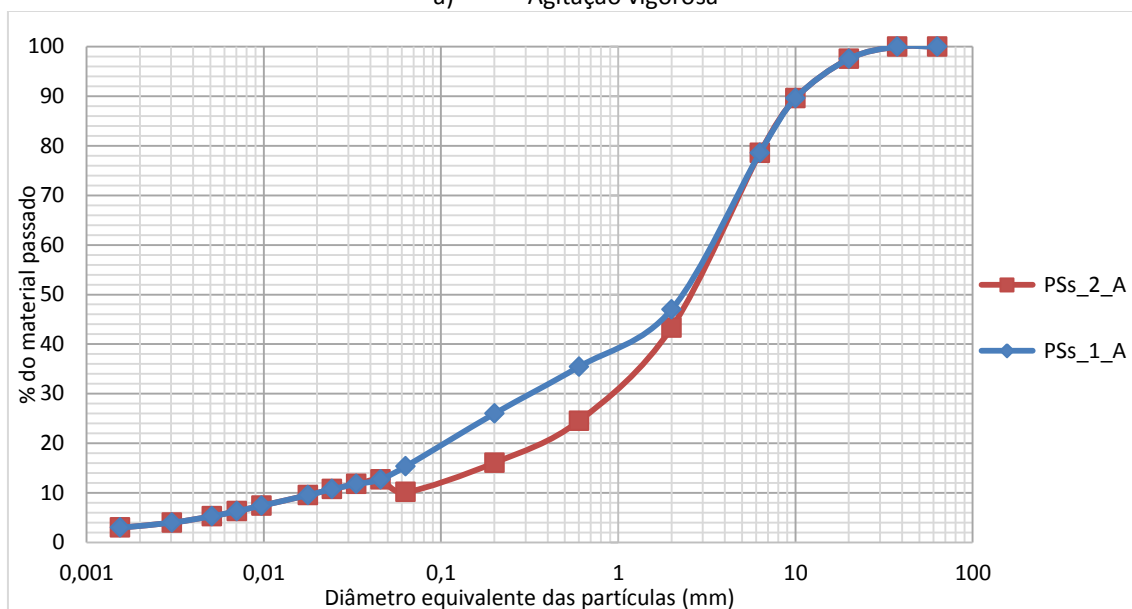
Ao combinar as curvas obtidas por peneiração com as obtidas por sedimentação, nota-se que ao realizar o ensaio utilizando o provete com a mesma preparação (ensaios PSv_1_A e PSs_1_A), a curva apresenta-se mais suave e contínua do que ao utilizar provetes distintos (ensaios PSv_2_A e PSs_2_A), conforme apresentado na Figura 45.

Diante do exposto, para este tipo de solo, é possível concluir que a escolha do tipo de agitação utilizada para a dispersão das partículas no método por sedimentação, influencia o resultado. Visto que, para uma agitação mais suave (300 rpm por 4 horas), a percentagem das partículas com dimensão inferior ao diâmetro equivalente assume valores ligeiramente superiores do que para uma agitação mais vigorosa (18 000 rpm por 10 min), devido ao maior contato com as partículas.

Conclui-se também que, ao realizar o ensaio com provetes distintos conforme definido na norma EN ISO 17892-4:2016, não é possível fazer uma ligação suave e contínua entre as curvas granulométricas obtidas por peneiração e por sedimentação. Uma vez que, ao utilizar preparos diferentes nos provetes, os resultados obtidos são diferentes.



a) Agitação vigorosa



b) Agitação suave

Figura 45 – Comparação entre as curvas granulométricas médias obtidas utilizando o mesmo provete e preparação e utilizando provetes e preparações diferentes.

4.5.2. Solo B

Para o solo B foram realizadas três determinações para cada um dos métodos utilizados. Ao analisar os dados apresentados na Tabela 23, na Tabela 24, na Tabela 25, na Tabela 26 e na Tabela 27 é possível observar que os valores da variância e do desvio padrão para cada um dos métodos de ensaio. Porém não foi possível tirar conclusões quanto à repetitividade do ensaio, uma vez que a norma não determina valores de referência. Para cada um dos casos, a Tabela 31 apresenta o valor de desvio padrão mais desfavorável e mais favorável.

Tabela 31 – Desvio padrão – Solo B

P_B f _n - fração que passa através do peneiro (%)		
Abertura do peneiro	2,000 mm	0,063 mm
Ensaio 1	100 %	69 %
Ensaio 2	100 %	70 %
Ensaio 3	100 %	70 %
Média	100 %	70 %
Desvio padrão	0,050 %	0,605 %
Sv_B K _c - fração corrigida das partículas de dimensão inferior ao diâmetro equivalente (%)		
Diâmetro equivalente das partículas	0,003 mm	0,001 mm
Ensaio 1	45 %	41 %
Ensaio 2	45 %	39 %
Ensaio 3	45 %	38 %
Média	45 %	39 %
Desvio padrão	0,165 %	1,730 %
Ss_B K _c - fração corrigida das partículas de dimensão inferior ao diâmetro equivalente (%)		
Diâmetro equivalente das partículas	0,001 mm	0,026 mm
Ensaio 1	42 %	73 %
Ensaio 2	43 %	76 %
Ensaio 3	43 %	73 %
Média	43 %	74 %
Desvio padrão	0,329 %	1,983 %
PSv_1_B f _n - fração que passa através do peneiro (%)		
Abertura do peneiro	2,000 mm	0,063 mm
Ensaio 1	100 %	76 %
Ensaio 2	100 %	78 %
Ensaio 3	100 %	78 %
Média	100 %	77 %
Desvio padrão	0,057 %	0,919 %
PSs_1_B f _n - fração que passa através do peneiro (%)		
Abertura do peneiro	0,200 mm	0,063 mm
Ensaio 1	93 %	81 %
Ensaio 2	93 %	83 %
Ensaio 3	93 %	80 %
Média	93 %	81 %
Desvio padrão	0,169 %	1,442 %

Para ensaio P_B, o menor valor de desvio padrão determinado foi para o peneiro com abertura de 2,00 mm, já o maior valor de desvio padrão calculado foi para o peneiro com abertura de 0,063 mm.

Para o ensaio Sv_B, o maior valor foi para o diâmetro equivalente de 0,001 mm e o menor para o diâmetro equivalente de 0,003 mm. Para o ensaio Ss_B, o desvio padrão assumiu um valor mais baixo para o diâmetro equivalente de 0,001 mm e mais alto para o diâmetro equivalente de 0,026 mm, conforme apresentado na Tabela 28.

Para o Psv_1_B, o menor valor do desvio padrão foi para o peneiro de abertura 2,00 mm e o maior valor foi para o peneiro de 0,063 mm. Para o Pss_1_B, o menor desvio padrão foi para o peneiro com abertura de 0,200 mm e o maior foi para o peneiro com abertura de 0,063 mm.

Ao comparar os valores obtidos para a sedimentação para uma agitação vigorosa e para uma agitação mais suave, apresentados na Tabela 32, observa-se que, para este tipo de solo, os resultados divergem consoantes o método escolhido para a dispersão das partículas.

Tabela 32 – Comparação entre os valores obtidos para os ensaios Sv_B e Ss_B

Análise granulométrica por sedimentação - Solo B											
Diâmetro equivalente das partículas (mm)		K _c - fração corrigida das partículas de dimensão inferior ao diâmetro equivalente (%)									
		Mínimo		Máximo		Média		Variância		Desvio padrão	
Agitação vigorosa	Agitação suave	Agitação vigorosa	Agitação suave	Agitação vigorosa	Agitação suave	Agitação vigorosa	Agitação suave	Agitação vigorosa	Agitação suave	Agitação vigorosa	Agitação suave
0,067	0,071	76	81	77	84	76	83	0,621	2,598	0,788	1,612
0,047	0,051	74	78	76	82	75	80	0,869	2,572	0,932	1,604
0,034	0,036	72	76	74	79	73	78	1,160	2,547	1,077	1,596
0,024	0,026	70	73	70	76	70	74	0,054	3,933	0,233	1,983
0,017	0,018	67	70	68	74	67	72	0,537	3,862	0,733	1,965
0,009	0,010	58	63	59	66	59	64	1,025	3,652	1,013	1,911
0,007	0,007	54	58	56	61	55	60	0,772	3,455	0,879	1,859
0,005	0,005	49	53	51	56	50	55	0,840	3,326	0,916	1,824
0,003	0,003	45	48	45	51	45	50	0,027	3,199	0,165	1,789
0,001	0,001	38	43	41	43	39	43	2,994	0,108	1,730	0,329

Ao analisar a Tabela 32, observa-se que a percentagem das partículas com dimensão inferior ao diâmetro equivalente assume valores ligeiramente superiores para o ensaio Ss_B. Este efeito está relacionado ao tempo de reação da suspensão com a solução dispersante, visto que durante a agitação suave, o provete permanece por 4 h no agitador em contato com o agente antifloculante, provocando uma maior dispersão das partículas. Ou seja, para este tipo de solo (solo argiloso de natureza caulínica), a escolha do tipo de agitação influencia os resultados obtidos no ensaio.

Esse comportamento também pode ser visualizado na Figura 46 que apresenta as curvas médias obtidas para os ensaios Sv_B e Ss_B.

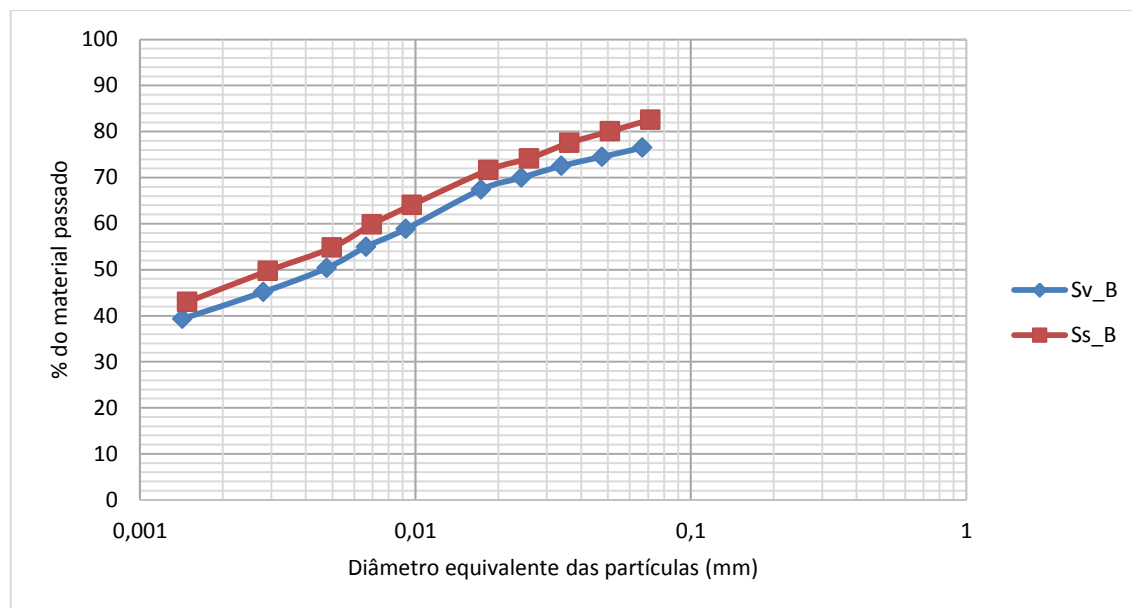


Figura 46 – Curvas médias obtidas para os Ensaios Sv_B e Ss_B.

Com relação à combinação entre os dois métodos para o solo B, na Figura 32 está representado o ensaio PSv_2_B e na Figura 35 para o PSs_2_B. Nestas figuras é possível observar, à semelhança do que aconteceu com o solo A, que as ligações entre os dois métodos não constituem curvas contínuas e suaves.

Para os dois métodos de agitação, nota-se que o ponto determinado pela primeira leitura do densímetro apresenta valores de diâmetro muito próximos ou superiores à abertura do último peneiro utilizado na peneiração (0,063mm). Isto pode estar relacionado com a forma das partículas do solo ou com imprecisões na metodologia de cálculo.

Mesmo após a retirada do primeiro ponto determinado pela sedimentação, as curvas granulométricas permanecem com uma leve descontinuidade na ligação entre os métodos, conforme observado na Figura 33 para o PSv_2_B e na Figura 36 para PSs_2_B. Isto ocorre devido ao fato das preparações dos dois métodos serem realizadas de formas distintas, com reagentes em concentrações significativamente diferentes.

Ao comparar a percentagem de material que passa pelo peneiro de 0,063 mm, verifica-se que nos ensaios PSv_1_B e PSs_1_B este valor é superior ao determinado pelo ensaio P_B, conforme demonstrado na Tabela 33. É possível observar ainda que estas percentagens são superiores no caso em que a agitação é suave (PSs_1_B) em que o solo permanece mais tempo em contato com o agente dispersante.

Tabela 33 - Comparação da fração que passa através do peneiro de 0,063mm entre o ensaio P_B e os ensaios PSv_1_B e PSs_1_B.

Análise granulométrica por peneiração – Solo B			
f_n - fração que passa através do peneiro com abertura de 0,063 mm (%)			
Método do ensaio	P_B	PSv_1_B	PSs_1_B
Ensaio 1	69	76	81
Ensaio 2	70	78	83
Ensaio 3	70	78	80
Média	70	77	81

A Figura 47 permite visualizar melhor a diferença entre a curva granulométrica obtida pelos ensaio PSv_1_B, PSs_1_B e P_B.

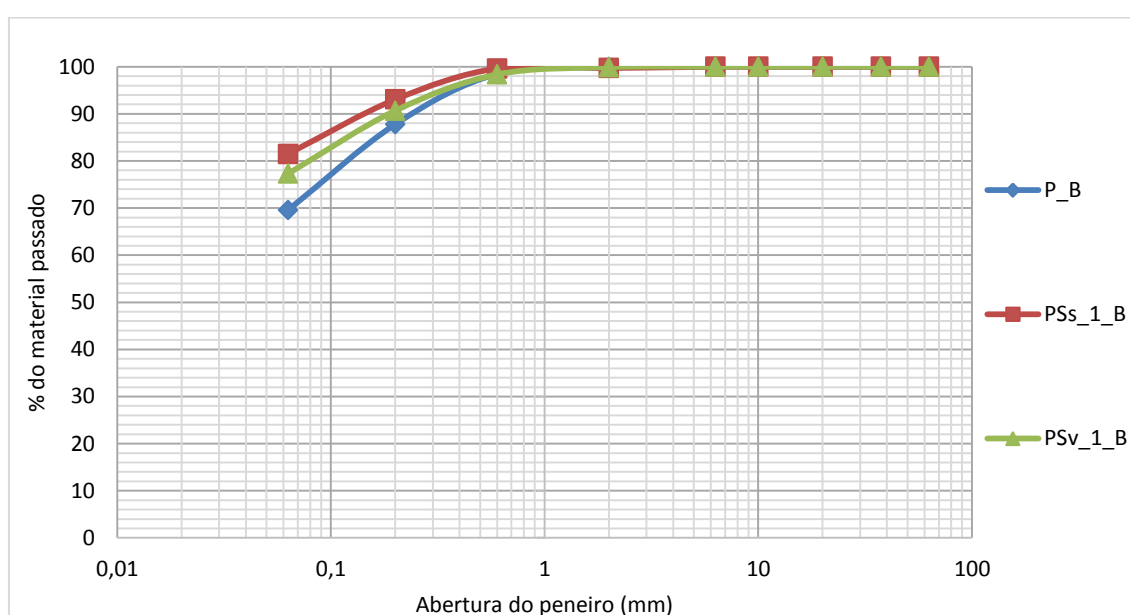
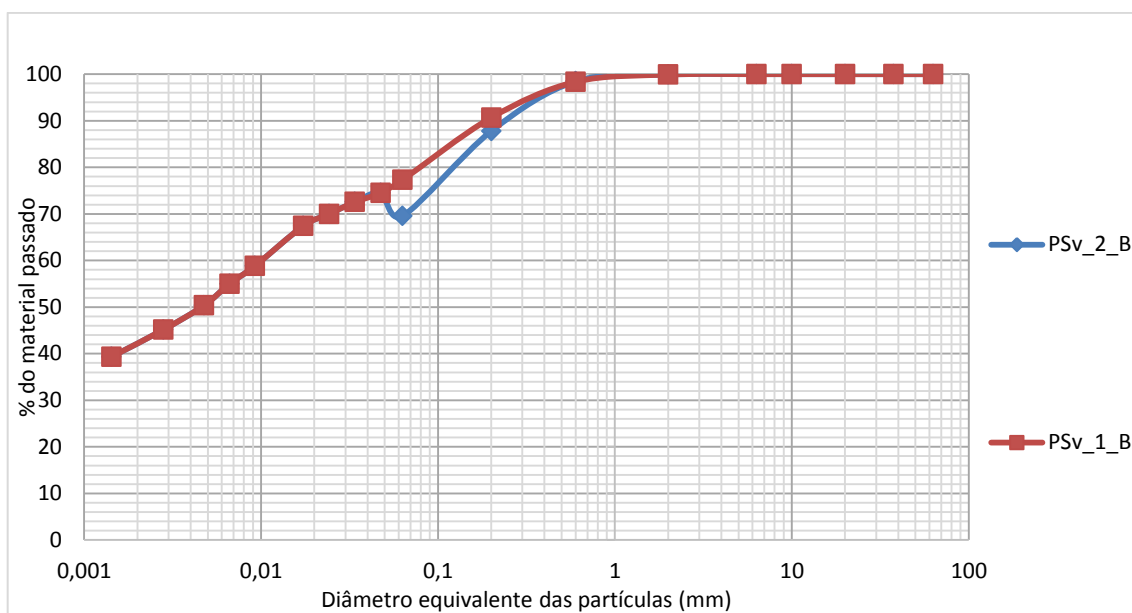
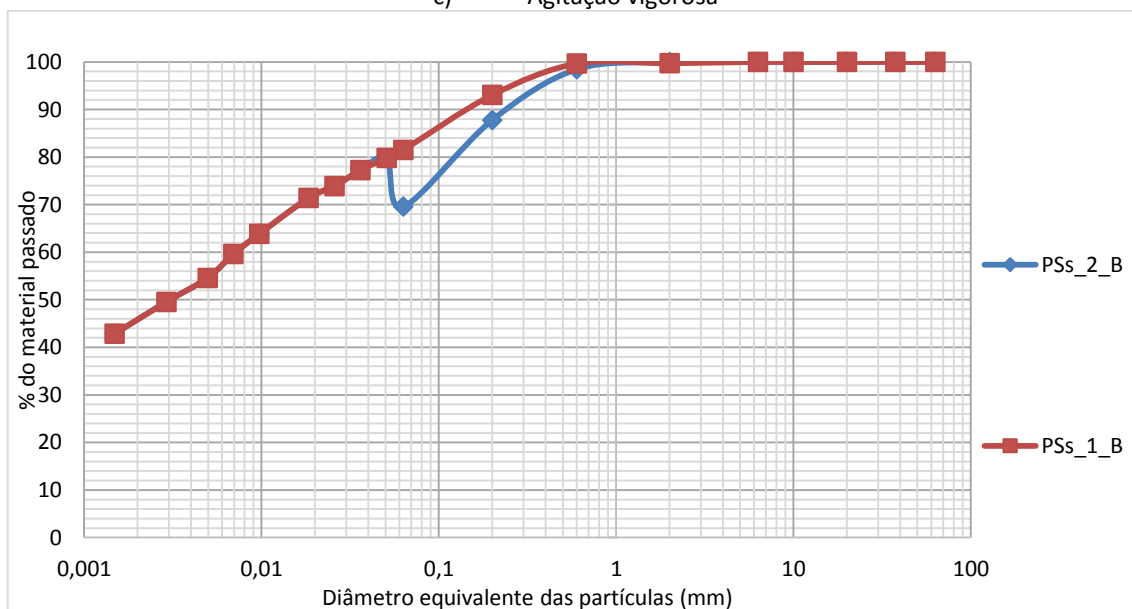


Figura 47 – Comparação entre as curvas granulométricas obtidas pela fração que passa através dos peneiros para os ensaios P_B, PSv_1_B e PSs_1_B.

Ao combinar as curvas obtidas pela peneiração com as curvas obtidas pela sedimentação, nota-se que a curva granulométrica apresenta-se mais suave e contínua nos ensaio PSv_1_B e PSs_1_B do que para os ensaio PSv_2_B e PSs_2_B, conforme apresentado na Figura 48.



c) Agitação vigorosa



d) Agitação suave

Figura 48 – Comparação entre as curvas granulométricas obtidas utilizando o mesmo provete e preparação e utilizando provetes e preparações diferentes – Solo B.

Com o objetivo de comparar os valores obtidos ao utilizar a nova normalização, realizou-se a análise granulométrica do solo B com base na norma que é atualmente utilizada em Portugal, a E 196:1966, que define o procedimento para determinação da distribuição granulométrica das partículas de solo. A Tabela 34 apresenta os valores obtidos tanto na peneiração quanto na sedimentação para o Solo B.

Tabela 34 - Análise granulométrica pela E 196:1966 - Solo B

Análise granulométrica – Solo B – E 196:1966	
N'_x – percentagem acumulada que passa em cada peneiro (%)	
Abertura dos peneiros (mm)	N'_x (%)
76,100	100
50,800	100
38,100	100
25,400	100
19,000	100
9,510	100
4,760	100
2,000	100
0,841	100
0,420	99
0,250	99
0,105	84
0,074	80
N_D – percentagem de partículas de diâmetro inferior a D (%)	
D – Diâmetro das partículas (mm)	N_D (%)
0,052	78
0,037	75
0,024	72
0,014	69
0,010	62
0,007	59
0,003	52
0,002	39
0,001	33

Na Figura 49 está representada a curva granulométrica obtida para o solo B ao utilizar a metodologia descrita na E 196:1966. É possível observar que o resultado consiste em uma curva contínua e suave.

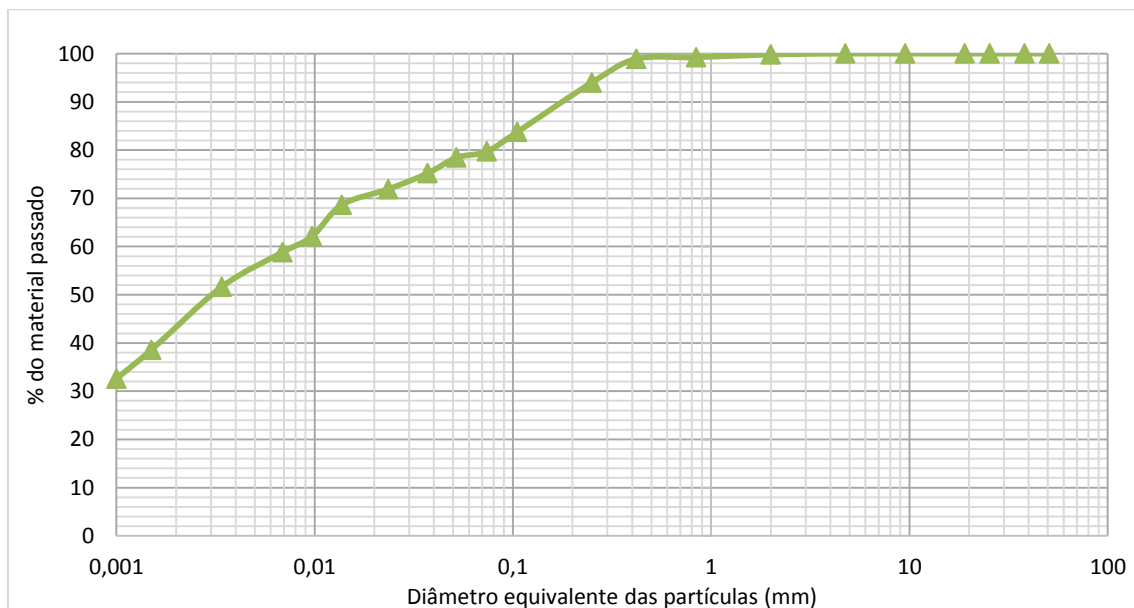
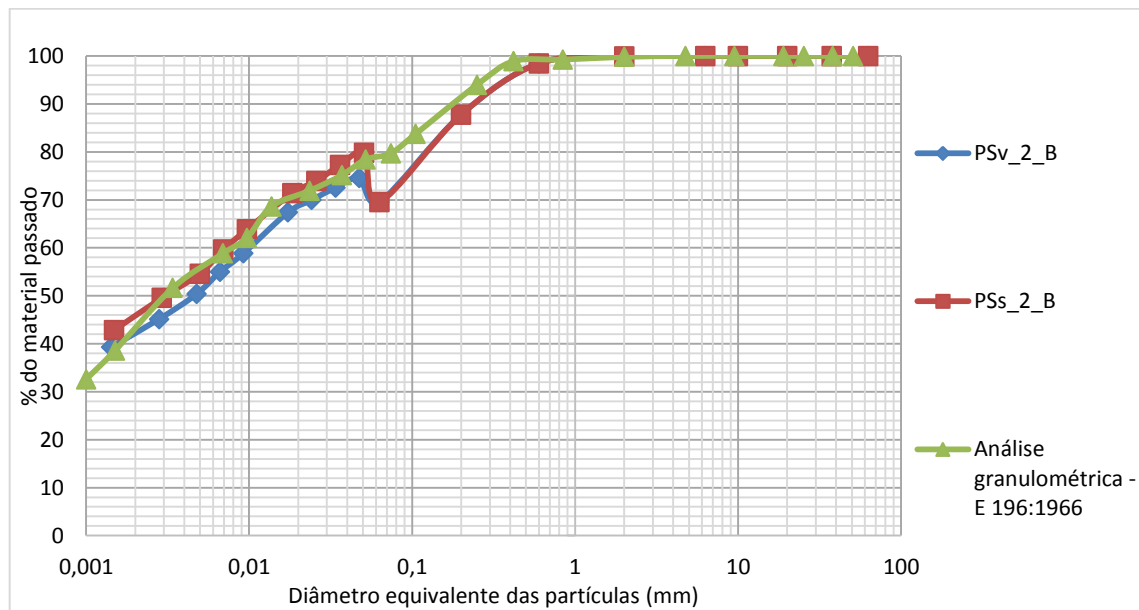
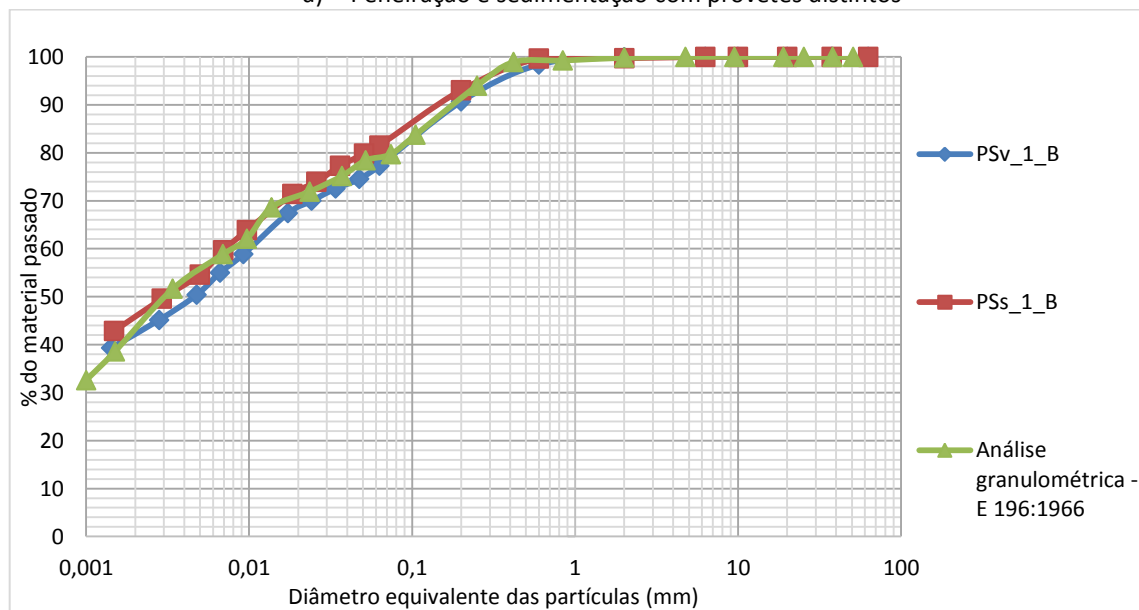


Figura 49 – Curva granulométrica obtida para o Solo B utilizando a E 196:1966.

A E 196:1966 recomenda a utilização do mesmo provete para realização do ensaio por sedimentação e por peneiração, ou seja, o material passa pelo mesmo processo de preparação, com o mesmo tipo e concentração de agente atifloculante. Ao comparar o resultado obtido pela E 196:1966 com os resultados obtidos pela nova normalização (EN ISO 17892-4:2016), nota-se que a curva determinada pela antiga norma possui um comportamento divergente ao obtido pela nova normalização tanto para uma agitação suave quanto para uma mais vigorosa, conforme apresentado na Figura 50 a). Ao comparar a curva definida pela antiga normalização com os resultados obtidos nos ensaio PSv_1_B e PSs_1_B, verifica-se que as curvas apresentam um comportamento mais semelhante, conforme demonstrado na Figura 50 b).



a) Peneiração e sedimentação com provetes distintos



b) Peneiração e sedimentação com o mesmo provete

Figura 50 – Comparação entre as curvas granulométricas obtidas pela E 196:1966 e pela EN ISO 17892-4:2016 – Solo B.

Conclui-se que, para este tipo de solo, a escolha do tipo de agitação utilizada para a dispersão das partículas no método por sedimentação altera o resultado obtido. Sendo os valores da percentagem das partículas com dimensão inferior ao diâmetro equivalente ligeiramente superiores para uma agitação mais suave (300 rpm por 4 horas).

Conclui-se também que, ao realizar o ensaio com provetes distintos (conforme definido na norma EN ISO 17892-4:2016), não é possível fazer uma ligação suave e contínua entre as curvas granulométricas obtidas por peneiração e por sedimentação. Sendo recomendada a utilização de um provete que tenha passado por um único processo de preparação para a realização dos dois métodos, conforme recomendado na E 196:1966.

Capítulo V

Outras atividades desenvolvidas

Para além do estudo sobre o impacto da nova normalização nos resultados obtidos nos ensaios de reconhecimento e caracterização geotécnica, foram desenvolvidas outras atividades durante o estágio curricular no Laboratório de Geotecnia e Materiais de Construção (LGMC) do Centro de Formação Profissional da Indústria da Construção Civil e Obras Públicas do Norte (CICCOPN).

As atividades foram desenvolvidas em diversas áreas nas quais o LGMC atua: materiais de construção, solos, produtos betuminosos e pedra natural, tendo como foco principal atividades executadas pelo setor de solos.

Foram executados ensaios de determinação da densidade das partículas com base na norma NP-83:1965, determinação da distribuição granulométrica utilizando a norma E 196:1966, determinação do teor em água seguindo a NP-84:1965, foram realizadas também a preparação de amostras e o acompanhamento da execução de ensaios para determinação dos limites de consistência com base na NP-143:1969, de determinação do CBR seguindo a E 198:1967.

Nos outros setores do laboratório, foi possível acompanhar e auxiliar o preparo de diversos ensaios, além da possibilidade de acompanhar a execução de um ensaio em obra, nomeadamente o ensaio de *cross-hole* para determinar a integridade de estacas de fundação.

Capítulo VI

Considerações finais

6.1. Conclusões

Este trabalho consistiu em analisar a influência das principais alterações na nova normalização para caracterização dos solos nos resultados obtidos, mais especificamente para a determinação da massa volúmica das partículas e para determinação da distribuição granulométrica. Após a execução dos ensaios em laboratório e a análise dos resultados foi possível estabelecer as seguintes conclusões:

6.1.1. Massa volúmica

Com relação à determinação da massa volúmica, a norma não define o procedimento para retirada do ar aprisionada no provete, deixando ao operador do laboratório a decisão de qual método aplicar. Diante disso, os resultados que serão obtidos variam consoante à técnica e ao tempo de aplicação.

Para os dois tipos de solo ensaiados, solo residual granítico e solo argiloso de natureza caulínica, verificou-se que a remoção do ar não era eficiente para os casos em que o ar foi removido com aplicação de vácuo a 133 hPa durante 10 min, quando submetido a um ligeiro aquecimento por 10 min e com uma agitação manual por 1 min.

Nos casos em que o ar foi removido do provete por aplicação de vácuo a 40 hPa por 10 min e por ebulição durante 10 min, os resultados foram mais coerentes visto que a remoção do ar foi mais eficiente.

Ao não especificar o procedimento de retirada do ar aprisionado no provete, a norma permite que haja entendimentos técnicos diferentes, ou seja, permite que os resultados dependam do conhecimento e experiência do operador que realizará o ensaio. O que pode levar a erros significativos, não garantindo a padronização e confiabilidade necessária para este tipo de ensaio. A norma deve ser revisada antes da sua implementação, de forma a garantir a uniformidade da metodologia e dos resultados obtidos nos diferentes países em que será adotada.

6.1.2. Análise granulométrica

Com relação ao ensaio de determinação da distribuição granulométrica por sedimentação pelo método do densímetro, para os dois tipos de solos (solo residual granítico e solo argiloso de natureza caulínica), conclui-se que a primeira leitura realizada meio minuto após o início do ensaio, apresenta, por sistema, valores de diâmetro equivalente muito próximos ou superiores à abertura do último peneiro do ensaio por peneiração (0,063 mm). Isso pode estar relacionado com a forma das partículas ou com a imprecisão do método do cálculo. Para realizar a

combinação entre os métodos por sedimentação e peneiração, foi necessário desprezar esta leitura e considerar as leituras a partir do primeiro minuto do ensaio, de forma semelhante ao que era descrito na norma E 196:1966, atualmente utilizada em Portugal.

Para ambos os tipos de solo, em relação ao tipo de agitação escolhida para a dispersão das partículas do solo na determinação da distribuição granulométrica pelo método do densímetro, conclui-se que a agitação suave realizada com um agitador magnético com velocidade de 300 rpm durante 4 h resultou em uma melhor dispersão das partículas. Nestes casos, a fração das partículas com dimensão inferior ao diâmetro equivalente foi ligeiramente superior quando comparado a uma agitação mais vigorosa, utilizando um agitador mecânico a 18 000 rpm por 10 min.

O que leva a concluir que, ao não definir o método para a dispersão das partículas, a norma EN ISO 17892-4:2016 permite que os resultados obtidos sejam influenciados pelo conhecimento e experiência do operador de laboratório, levando a resultados muito distintos.

Para combinar os ensaios realizados por peneiração e por sedimentação, a norma estabelece que os ensaios sejam realizados em provetes distintos provenientes de uma mesma amostra e que os resultados obtidos nestes ensaios sejam combinados em uma única curva granulométrica suave e contínua.

Sendo possível concluir para os dois tipos de solos estudados que, ao preparar os provetes com concentrações diferentes de agente antifloculante, não é possível combinar os dois métodos em uma única curva granulométrica suave e contínua, uma vez que a percentagem de material que passa no peneiro de abertura 0,063 mm é muito superior no método por sedimentação do que por peneiração. Nos casos em que foi utilizado um único provete com o mesmo procedimento de preparação, a curva obtida foi suave e contínua na transição entre os métodos.

Por fim, conclui-se que é necessária a revisão da metodologia descrita na norma EN ISO 17892-4:2016, tanto com relação à combinação dos ensaios por peneiração e por sedimentação, quanto em relação ao procedimento para execução do ensaio por sedimentação pelo método do densímetro, analisando a necessidade da leitura nos primeiros 30 s após o início do ensaio e definindo o método mais adequado para dispersão das partículas do solo.

6.2. Desenvolvimentos futuros

De forma a garantir uma análise mais completa dos impactos causados pela utilização da nova normalização, sugere-se que este estudo seja complementado com:

-
1. Realização de uma campanha de ensaios interlaboratoriais para avaliar a robustez das conclusões obtidas neste trabalho e confirmar as dificuldades operacionais e interpretativas detetadas ao longo do trabalho laboratorial realizado.
 2. Realização dos mesmos ensaios para outros solos com natureza e origem geológica diferentes, com o objetivo de averiguar se as conclusões obtidas nesta pesquisa são comuns aos demais tipos de solo.
 3. Desenvolvimento do mesmo tipo de trabalho para as restantes normas de caracterização de solos que serão implementadas no futuro, considerando o impacto que as alterações terão nos resultados obtidos e avaliando se as metodologias garantem uniformidade das práticas de ensaio nos diferentes países em que serão adotadas.

Referências Bibliográficas

-
- Budhu, M. (2011). *Soil Mechanics and Foundations* (3^o ed.). Hoboken: John Wiley & Sons, Inc.
- Caputo, H. P. (1988). *Mecânica dos Solos e suas Aplicações* (6^o ed., Vol. I). Rio de Janeiro: LTC.
- CARDOSO, F. (2002). *Propriedades e Comportamento Mecânico de solos do Planalto Central Brasileiro*. Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e ambiental, Brasília.
- CEN. (04 de 04 de 2019). *Online*. Obtido de <https://www.cen.eu>
- CICCOPN. (04 de Abril de 2019). *Online*. Obtido de <http://www.ciccopn.pt/>
- Craig, R. F., & Knappett, J. A. (2012). *Craig's Soil Mechanics* (8^o ed.). Oxford: Spon Press.
- Das, B. M. (2007). *Fundamentos da Engenharia Geotécnica* (6^o ed.). (P. L. Barros, Trad.) São Paulo: Thomson Learning.
- E 195: 1966. *Solos - Preparação por via seca de amostras para ensaios de identificação*.
- E 196: 1966. *Solos - Análise granulométrica*.
- EN ISO 17892-1: 2014. *Geotechnical investigation and testing - Laboratory testing of soil - Part 1: Determination of water content*. Bruxelas: European Committee for Standardization.
- EN ISO 17892-3: 2015. *Geotechnical investigation and testing - Laboratory testing of soil - Part 3: Determination of particle density*. Bruxelas: European Committee for Standardization.
- EN ISO 17892-4: 2016. *Geotechnical investigation and testing - Laboratory testing of soil - Part 4: Determination of particle size distribution*. Bruxelas: European Committee for Standardization.
- Fernandes, M. M. (2011). *Mecânica dos solos: conceitos e princípios fundamentais* (2^o ed., Vol. I). Porto: FEUP Edições.
- Martins, C. M. (2018). *Caracterização laboratorial de solos - Nova normalização*. Relatório de Estágio para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil no Instituto Superior de Engenharia do Porto. Porto: ISEP.
- Murthy, V. N. (2002). *Geotechnical Engineering: Principles and Practices of Soil Mechanics and Foundations Engineering*. CRC Press.
- NP 84: 1965. *Solos - Determinação do teor em água*.
- Pinto, C. S. (2006). *Curso básico de mecânica dos solos em 16 aulas* (3^o ed.). São Paulo: Oficina de textos.
- Varela, M. (2011). *Apostila de Mecânica dos Solos*. Obtido em 15 de Março de 2019, de Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte: <http://docente.ifrn.edu.br/marciovarela/disciplinas/mecanica-dos-solos/apostila-de-mecanica-dos-solos/view>

Anexos

ANEXO I – Folhas de registro da determinação da massa volúmica das partículas (EN ISO 17892-3:2015).

- **Calibração dos picnómetros**

Calibração dos picnómetros					
Número do picnómetro	41	47	61	62	97
t – Temperatura (°C)	25	25	25,1	25,1	26
ρ_{L1} - Massa volúmica da água à temperatura de ensaio para m_1	0,99708	0,99708	0,997053	0,997053	0,99681
m_0 – Massa do picnómetro seco (g)	30,24	29,5	30,19	29,07	29,87
m_1 – Massa do picnómetro cheio com o líquido de referência (g)	81,42	80,5	80	80,55	79,95
V - Volume do picnómetro (ml) $[(m_1 - m_0)/\rho_{L1}]$	51,33	51,15	49,96	51,63	50,24

- **Solo A**

Determinação da massa volúmica das partículas (EN ISO 17892-3) - Método do picnómetro líquido					
Referência da amostra	Solo A				
Método de remoção do ar	Vácuo (40hPa) - 10 min				
Cálculo da massa volúmica					
Método	A (seco em estufa)				
Número do picnómetro	41	47	61	62	97
t – Temperatura (°C)	25	25	25	25	25
ρ_{L3} - Massa volúmica da água à temperatura de ensaio para m_3	0,99708	0,99708	0,99708	0,99708	0,99708
m_2 – Massa do picnómetro com provete seco (g)	40,24	39,5	40,19	39,08	39,87
m_3 – Massa do picnómetro cheio com o provete saturado e com o líquido de referência (g)	87,69	86,76	86,26	86,82	86,2
m_4 – Massa seca do provete de ensaio (g) $[m_2 - m_0]$	10	10	10	10,01	10
ρ_s - Massa volúmica das partículas do solo	2,67	2,67	2,67	2,67	2,65
ρ_s - Massa volúmica das partículas do solo	2,66				

Determinação da massa volúmica das partículas (EN ISO 17892-3) - Método do picnómetro líquido					
Referência da amostra	Solo A				
Método de remoção do ar	Vácuo (40hPa) - 10 min				
Cálculo da massa volúmica					
Método	B (húmido)				
Número do picnómetro	41	47	61	62	97
t – Temperatura (°C)	25,5	25,2	25,5	25,3	25,3
ρ_{L3} - Massa volúmica da água à temperatura de ensaio para m_3	0,996945	0,997026	0,996945	0,996999	0,996999
m_2 – Massa do picnómetro com provete seco [$m_4 + m_0$] (g)	40,18	39,43	40,12	38,98	39,8
m_3 – Massa do picnómetro cheio com o provete saturado e com o líquido de referência (g)	87,65	86,71	86,2	86,76	86,19
m_4 – Massa seca do provete de ensaio (g) [$m_6 - m_5$]	9,94	9,93	9,93	9,91	9,93
Referência da cápsula	34	36	55	57	58
m_5 – Massa da cápsula (g)	121,43	120,23	125,01	121,8	123,75
m_6 – Massa da cápsula com o provete seco (g)	131,37	130,16	134,94	131,71	133,68
ρ_s - Massa volúmica das partículas do solo	2,68	2,66	2,66	2,67	2,68
ρ_s - Massa volúmica das partículas do solo	2,67				

Determinação da massa volúmica das partículas (EN ISO 17892-3) - Método do picnómetro líquido					
Referência da amostra	Solo A				
Método de remoção do ar	Vácuo (133hPa) - 10 min				
Cálculo da massa volúmica					
Método	A (seco em estufa)				
Número do picnómetro	41	47	61	62	97
t – Temperatura (°C)	25	25	25	25	25
ρ_{L3} - Massa volúmica da água à temperatura de ensaio para m_3	0,99708	0,99708	0,99708	0,99708	0,99708
m_2 – Massa do picnómetro com provete seco (g)	40,24	39,5	40,19	39,08	39,85
m_3 – Massa do picnómetro cheio com o provete saturado e com o líquido de referência (g)	87,67	86,75	86,25	86,79	86,21
m_4 – Massa seca do provete de ensaio (g) [$m_2 - m_0$]	10	10	10	10,01	9,98
ρ_s - Massa volúmica das partículas do solo	2,66	2,66	2,66	2,65	2,67
ρ_s - Massa volúmica das partículas do solo	2,66				

Determinação da massa volúmica das partículas (EN ISO 17892-3) - Método do picnómetro líquido					
Referência da amostra	Solo A				
Método de remoção do ar	Vácuo (133hPa) - 10 min				
Cálculo da massa volúmica					
Método	B (húmido)				
Número do picnómetro	41	47	61	62	97
t – Temperatura (°C)	26,3	26,3	26,3	26,1	26,1
ρ_{L3} - Massa volúmica da água à temperatura de ensaio para m_3	0,996729	0,996729	0,996729	0,996783	0,996783
m_2 – Massa do picnómetro com provete seco [$m_4 + m_0$] (g)	40,17	39,41	40,12	38,98	39,793
m_3 – Massa do picnómetro cheio com o provete saturado e com o líquido de referência (g)	87,57	86,65	86,15	86,72	86,12
m_4 – Massa seca do provete de ensaio (g) [$m_6 - m_5$]	9,93	9,91	9,93	9,91	9,923
Referência da cápsula	10	47	54	57	58
m_5 – Massa da cápsula (g)	123,74	124,22	123,34	121,8	123,75
m_6 – Massa da cápsula com o provete seco (g)	133,67	134,13	133,27	131,71	133,673
ρ_s - Massa volúmica das partículas do solo	2,63	2,64	2,63	2,65	2,64
ρ_s - Massa volúmica das partículas do solo	2,64				

Determinação da massa volúmica das partículas (EN ISO 17892-3) - Método do picnómetro líquido					
Referência da amostra	Solo A				
Método de remoção do ar	Agitação manual - 1 min				
Cálculo da massa volúmica					
Método	A (seco em estufa)				
Número do picnómetro	41	47	61	62	97
t – Temperatura (°C)	25,6	25,3	25,3	25,5	25,3
ρ_{L3} - Massa volúmica da água à temperatura de ensaio para m_3	0,996918	0,996999	0,996999	0,996945	0,996999
m_2 – Massa do picnómetro com provete seco (g)	40,26	39,5	40,21	39,09	39,89
m_3 – Massa do picnómetro cheio com o provete saturado e com o líquido de referência (g)	87,61	86,66	86,18	86,76	86,15
m_4 – Massa seca do provete de ensaio (g) [$m_2 - m_0$]	10,02	10	10,02	10,02	10,02
ρ_s - Massa volúmica das partículas do solo	2,61	2,60	2,60	2,63	2,61
ρ_s - Massa volúmica das partículas do solo	2,61				

Determinação da massa volúmica das partículas (EN ISO 17892-3) - Método do picnómetro líquido					
Referência da amostra	Solo A				
Método de remoção do ar	Agitação manual - 1 min				
Cálculo da massa volúmica					
Método	B (húmido)				
Número do picnómetro	41	47	61	62	97
t – Temperatura (°C)	25	25	25	25	25
ρ_{L3} - Massa volúmica da água à temperatura de ensaio para m_3	0,99708	0,99708	0,99708	0,99708	0,99708
m_2 – Massa do picnómetro com provete seco [$m_4 + m_0$] (g)	40,14	39,41	40,1	38,98	39,8
m_3 – Massa do picnómetro cheio com o provete saturado e com o líquido de referência (g)	87,52	86,6	86,13	86,68	86,12
m_4 – Massa seca do provete de ensaio (g) [$m_6 - m_5$]	9,9	9,91	9,91	9,91	9,93
Referência da cápsula	10	47	57	54	58
m_5 – Massa da cápsula (g)	123,74	124,22	121,8	123,34	123,75
m_6 – Massa da cápsula com o provete seco (g)	133,64	134,13	131,71	133,25	133,68
ρ_s - Massa volúmica das partículas do solo	2,60	2,59	2,61	2,61	2,62
ρ_s - Massa volúmica das partículas do solo	2,61				

Determinação da massa volúmica das partículas (EN ISO 17892-3) - Método do picnómetro líquido					
Referência da amostra	Solo A				
Método de remoção do ar	Ebulição - 10 min				
Cálculo da massa volúmica					
Método	A (seco em estufa)				
Número do picnómetro	41	47	61	62	97
t – Temperatura (°C)	25,2	25,2	25,2	25,2	25,2
ρ_{L3} - Massa volúmica da água à temperatura de ensaio para m_3	0,997026	0,997026	0,997026	0,997026	0,997026
m_2 – Massa do picnómetro com provete seco (g)	40,24	39,5	40,2	39,1	39,85
m_3 – Massa do picnómetro cheio com o provete saturado e com o líquido de referência (g)	87,68	86,75	86,25	86,82	86,21
m_4 – Massa seca do provete de ensaio (g) [$m_2 - m_0$]	10	10	10,01	10,03	9,98
ρ_s - Massa volúmica das partículas do solo	2,67	2,66	2,66	2,66	2,67
ρ_s - Massa volúmica das partículas do solo	2,66				

Determinação da massa volúmica das partículas (EN ISO 17892-3) - Método do picnómetro líquido					
Referência da amostra	Solo A				
Método de remoção do ar	Ebulição - 10 min				
Cálculo da massa volúmica					
Método	B (húmido)				
Número do picnómetro	41	47	61	62	97
t – Temperatura (°C)	25	25	25	25	25
ρ_{L3} - Massa volúmica da água à temperatura de ensaio para m_3	0,99708	0,99708	0,99708	0,99708	0,99708
m_2 – Massa do picnómetro com provete seco [$m_4 + m_0$] (g)	40,12	39,4	40,1	38,98	39,8
m_3 – Massa do picnómetro cheio com o provete saturado e com o líquido de referência (g)	87,63	86,69	86,2	86,76	86,19
m_4 – Massa seca do provete de ensaio (g) [$m_6 - m_5$]	9,88	9,9	9,91	9,91	9,93
Referência da cápsula	48	54	55	57	58
m_5 – Massa da cápsula (g)	124,42	123,34	125,01	121,8	123,75
m_6 – Massa da cápsula com o provete seco (g)	134,3	133,24	134,92	131,71	133,68
ρ_s - Massa volúmica das partículas do solo	2,68	2,66	2,66	2,67	2,67
ρ_s - Massa volúmica das partículas do solo	2,67				

Determinação da massa volúmica das partículas (EN ISO 17892-3) - Método do picnómetro líquido					
Referência da amostra	Solo A				
Método de remoção do ar	Ligeiro aquecimento - 10 min				
Cálculo da massa volúmica					
Método	A (seco em estufa)				
Número do picnómetro	41	47	61	62	97
t – Temperatura (°C)	26,6	26,6	26,6	26,6	25,1
ρ_{L3} - Massa volúmica da água à temperatura de ensaio para m_3	0,996648	0,996648	0,996648	0,996648	0,997053
m_2 – Massa do picnómetro com provete seco (g)	40,25	39,5	40,18	39,08	40,24
m_3 – Massa do picnómetro cheio com o provete saturado e com o líquido de referência (g)	87,65	86,76	86,26	86,8	87,66
m_4 – Massa seca do provete de ensaio (g) [$m_2 - m_0$]	10,01	10	9,99	10,01	10
ρ_s - Massa volúmica das partículas do solo	2,65	2,68	2,68	2,67	2,65
ρ_s - Massa volúmica das partículas do solo	2,67				

Determinação da massa volúmica das partículas (EN ISO 17892-3) - Método do picnómetro líquido					
Referência da amostra	Solo A				
Método de remoção do ar	Ligeiro aquecimento - 10 min				
Cálculo da massa volúmica					
Método	B (húmido)				
Número do picnómetro	41	47	61	62	97
t – Temperatura (°C)	25,2	25,2	25,2	25,2	25,2
ρ_{L3} - Massa volúmica da água à temperatura de ensaio para m_3	0,997026	0,997026	0,997026	0,997026	0,997026
m_2 – Massa do picnómetro com provete seco [$m_4 + m_0$] (g)	40,2	39,47	40,16	39,04	39,84
m_3 – Massa do picnómetro cheio com o provete saturado e com o líquido de referência (g)	87,61	86,76	86,19	86,81	86,18
m_4 – Massa seca do provete de ensaio (g) [$m_6 - m_5$]	9,96	9,97	9,97	9,97	9,97
Referência da cápsula	32	36	47	48	10
m_5 – Massa da cápsula (g)	121,65	120,23	124,22	124,42	123,74
m_6 – Massa da cápsula com o provete seco (g)	131,61	130,2	134,19	134,39	133,71
ρ_s - Massa volúmica das partículas do solo	2,64	2,68	2,63	2,68	2,65
ρ_s - Massa volúmica das partículas do solo	2,66				

- Solo B

Determinação da massa volúmica das partículas (EN ISO 17892-3) - Método do picnómetro líquido					
Referência da amostra	Solo B				
Método de remoção do ar	Vácuo (40hPa) - 10 min				
Cálculo da massa volúmica					
Método	A (seco em estufa)				
Número do picnómetro	41	47	61	62	41
t – Temperatura (°C)	26,3	26,3	26,3	26,3	25
ρ_{L3} - Massa volúmica da água à temperatura de ensaio para m_3	0,996729	0,996729	0,996729	0,996729	0,99708
m_2 – Massa do picnómetro com provete seco (g)	40,25	39,51	40,22	39,08	40,24
m_3 – Massa do picnómetro cheio com o provete saturado e com o líquido de referência (g)	87,72	86,78	86,3	86,85	87,71
m_4 – Massa seca do provete de ensaio (g) [$m_2 - m_0$]	10,01	10,01	10,03	10,01	10
ρ_s - Massa volúmica das partículas do solo	2,70	2,69	2,69	2,70	2,69
ρ_s - Massa volúmica das partículas do solo	2,69				

Determinação da massa volúmica das partículas (EN ISO 17892-3) - Método do picnómetro líquido					
Referência da amostra	Solo B				
Método de remoção do ar	Vácuo (40hPa) - 10 min				
Cálculo da massa volúmica					
Método	B (húmido)				
Número do picnómetro	41	47	41	47	61
t – Temperatura (°C)	26,7	26,7	25	25	25,6
ρ_{L3} - Massa volúmica da água à temperatura de ensaio para m_3	0,996621	0,996621	0,99708	0,99708	0,996918
m_2 – Massa do picnómetro com provete seco [$m_4 + m_0$] (g)	39,41	39,23	39,88	39,14	40,45
m_3 – Massa do picnómetro cheio com o provete saturado e com o líquido de referência (g)	87,14	86,57	87,5	86,57	86,45
m_4 – Massa seca do provete de ensaio (g) [$m_6 - m_5$]	9,17	9,73	9,64	9,64	10,26
Referência da cápsula	10	32	47	48	56
m_5 – Massa da cápsula (g)	123,74	121,65	124,23	124,43	123,59
m_6 – Massa da cápsula com o provete seco (g)	132,91	131,38	133,87	134,07	133,85
ρ_s - Massa volúmica das partículas do solo	2,67	2,67	2,70	2,69	2,68
ρ_s - Massa volúmica das partículas do solo	2,68				

Determinação da massa volúmica das partículas (EN ISO 17892-3) - Método do picnómetro líquido					
Referência da amostra	Solo B				
Método de remoção do ar	Vácuo (133hPa) - 10 min				
Cálculo da massa volúmica					
Método	A (seco em estufa)				
Número do picnómetro	41	47	61	62	97
t – Temperatura (°C)	26,6	26,3	26,6	26,3	26,4
ρ_{L3} - Massa volúmica da água à temperatura de ensaio para m_3	0,996648	0,996729	0,996648	0,996729	0,996702
m_2 – Massa do picnómetro com provete seco (g)	40,27	39,5	40,19	39,07	39,88
m_3 – Massa do picnómetro cheio com o provete saturado e com o líquido de referência (g)	87,64	86,79	86,25	86,81	86,23
m_4 – Massa seca do provete de ensaio (g) [$m_2 - m_0$]	10,03	10	10	10	10,01
ρ_s - Massa volúmica das partículas do solo	2,64	2,70	2,67	2,68	2,68
ρ_s - Massa volúmica das partículas do solo	2,67				

Determinação da massa volúmica das partículas (EN ISO 17892-3) - Método do picnómetro líquido					
Referência da amostra	Solo B				
Método de remoção do ar	Vácuo (133hPa) - 10 min				
Cálculo da massa volúmica					
Método	B (húmido)				
Número do picnómetro	41	47	61	62	97
t – Temperatura (°C)	25,1	25,1	25,1	25,1	25,1
ρ_{L3} - Massa volúmica da água à temperatura de ensaio para m_3	0,997053	0,997053	0,997053	0,997053	0,997053
m_2 – Massa do picnómetro com provete seco [$m_4 + m_0$] (g)	40,02	39,29	39,96	38,88	39,67
m_3 – Massa do picnómetro cheio com o provete saturado e com o líquido de referência (g)	87,6	86,65	86,15	86,68	86,14
m_4 – Massa seca do provete de ensaio (g) [$m_6 - m_5$]	9,78	9,79	9,77	9,81	9,8
Referência da cápsula	10	32	34	36	58
m_5 – Massa da cápsula (g)	123,74	121,65	121,43	120,23	123,75
m_6 – Massa da cápsula com o provete seco (g)	133,52	131,44	131,2	130,04	133,55
ρ_s - Massa volúmica das partículas do solo	2,71	2,68	2,69	2,66	2,70
ρ_s - Massa volúmica das partículas do solo	2,69				

Determinação da massa volúmica das partículas (EN ISO 17892-3) - Método do picnómetro líquido					
Referência da amostra	Solo B				
Método de remoção do ar	Agitação manual - 1 min				
Cálculo da massa volúmica					
Método	A (seco em estufa)				
Número do picnómetro	41	47	61	62	97
t – Temperatura (°C)	26,5	26,5	26,5	26,5	26,5
ρ_{L3} - Massa volúmica da água à temperatura de ensaio para m_3	0,99681	0,99681	0,99681	0,99681	0,99681
m_2 – Massa do picnómetro com provete seco (g)	40,24	39,5	40,21	39,09	39,88
m_3 – Massa do picnómetro cheio com o provete saturado e com o líquido de referência (g)	87,57	86,68	86,24	86,81	86,18
m_4 – Massa seca do provete de ensaio (g) [$m_2 - m_0$]	10	10	10,02	10,02	10,01
ρ_s - Massa volúmica das partículas do solo	2,60	2,62	2,65	2,67	2,64
ρ_s - Massa volúmica das partículas do solo	2,63				

Determinação da massa volúmica das partículas (EN ISO 17892-3) - Método do picnómetro líquido					
Referência da amostra	Solo B				
Método de remoção do ar	Agitação manual - 1 min				
Cálculo da massa volúmica					
Método	B (húmido)				
Número do picnómetro	41	47	61	62	97
t – Temperatura (°C)	25,8	25,8	25,8	25,8	25,8
ρ_{L3} - Massa volúmica da água à temperatura de ensaio para m_3	0,996864	0,996864	0,996864	0,996864	0,996864
m_2 – Massa do picnómetro com provete seco [$m_4 + m_0$] (g)	39,97	39,23	39,93	38,81	39,61
m_3 – Massa do picnómetro cheio com o provete saturado e com o líquido de referência (g)	87,47	86,53	85,99	86,58	86,04
m_4 – Massa seca do provete de ensaio (g) [$m_6 - m_5$]	9,73	9,73	9,74	9,74	9,74
Referência da cápsula	36	48	54	55	58
m_5 – Massa da cápsula (g)	120,23	124,42	123,34	125,01	123,75
m_6 – Massa da cápsula com o provete seco (g)	129,96	134,15	133,08	134,75	133,49
ρ_s - Massa volúmica das partículas do solo	2,64	2,63	2,60	2,62	2,66
ρ_s - Massa volúmica das partículas do solo	2,63				

Determinação da massa volúmica das partículas (EN ISO 17892-3) - Método do picnómetro líquido					
Referência da amostra	Solo B				
Método de remoção do ar	Ebulição - 10 min				
Cálculo da massa volúmica					
Método	A (seco em estufa)				
Número do picnómetro	41	47	61	62	97
t – Temperatura (°C)	26	26,1	25,9	26	25,5
ρ_{L3} - Massa volúmica da água à temperatura de ensaio para m_3	0,99681	0,99681	0,996837	0,99681	0,996945
m_2 – Massa do picnómetro com provete seco (g)	40,25	39,53	40,21	39,11	39,91
m_3 – Massa do picnómetro cheio com o provete saturado e com o líquido de referência (g)	87,72	86,8	86,29	86,86	86,26
m_4 – Massa seca do provete de ensaio (g) [$m_2 - m_0$]	10,01	10,03	10,02	10,04	10,04
ρ_s - Massa volúmica das partículas do solo	2,70	2,69	2,69	2,69	2,68
ρ_s - Massa volúmica das partículas do solo	2,69				

Determinação da massa volúmica das partículas (EN ISO 17892-3) - Método do picnómetro líquido					
Referência da amostra	Solo B				
Método de remoção do ar	Ebulição - 10 min				
Cálculo da massa volúmica					
Método	B (húmido)				
Número do picnómetro	41	47	61	62	97
t – Temperatura (°C)	25	25	25	25	25
ρ_{L3} - Massa volúmica da água à temperatura de ensaio para m_3	0,99708	0,99708	0,99708	0,99708	0,99708
m_2 – Massa do picnómetro com provete seco [$m_4 + m_0$] (g)	39,98	39,25	39,91	38,82	39,61
m_3 – Massa do picnómetro cheio com o provete saturado e com o líquido de referência (g)	87,55	86,61	86,12	86,69	86,1
m_4 – Massa seca do provete de ensaio (g) [$m_6 - m_5$]	9,74	9,75	9,72	9,75	9,74
Referência da cápsula	10	32	34	36	47
m_5 – Massa da cápsula (g)	123,74	121,65	121,43	120,23	124,22
m_6 – Massa da cápsula com o provete seco (g)	133,48	131,4	131,15	129,98	133,96
ρ_s - Massa volúmica das partículas do solo	2,69	2,67	2,69	2,69	2,69
ρ_s - Massa volúmica das partículas do solo	2,69				

Determinação da massa volúmica das partículas (EN ISO 17892-3) - Método do picnómetro líquido					
Referência da amostra	Solo B				
Método de remoção do ar	Ligeiro aquecimento - 10 min				
Cálculo da massa volúmica					
Método	A (seco em estufa)				
Número do picnómetro	41	47	61	62	41
t – Temperatura (°C)	25	25	25	25	25
ρ_{L3} - Massa volúmica da água à temperatura de ensaio para m_3	0,99708	0,99708	0,99708	0,99708	0,99708
m_2 – Massa do picnómetro com provete seco (g)	40,25	39,5	40,2	39,09	40,26
m_3 – Massa do picnómetro cheio com o provete saturado e com o líquido de referência (g)	87,75	86,81	86,32	86,87	87,73
m_4 – Massa seca do provete de ensaio (g) [$m_2 - m_0$]	10,01	10	10,01	10,02	10,02
ρ_s - Massa volúmica das partículas do solo	2,71	2,70	2,70	2,70	2,69
ρ_s - Massa volúmica das partículas do solo	2,70				

Determinação da massa volúmica das partículas (EN ISO 17892-3) - Método do picnómetro líquido					
Referência da amostra	Solo B				
Método de remoção do ar	Ligeiro aquecimento - 10 min				
Cálculo da massa volúmica					
Método	B (húmido)				
Número do picnómetro	41	47	61	62	62
t – Temperatura (°C)	26,8	26,8	26,7	26,7	25,1
ρ_{L3} - Massa volúmica da água à temperatura de ensaio para m_3	0,996594	0,996594	0,996621	0,996621	0,997053
m_2 – Massa do picnómetro com provete seco [$m_4 + m_0$] (g)	40,07	39,32	39,99	38,89	38,9
m_3 – Massa do picnómetro cheio com o provete saturado e com o líquido de referência (g)	87,6	86,64	86,15	86,68	86,71
m_4 – Massa seca do provete de ensaio (g) [$m_6 - m_5$]	9,83	9,82	9,8	9,82	9,83
Referência da cápsula	36	32	10	47	48
m_5 – Massa da cápsula (g)	120,23	121,65	123,74	124,22	124,42
m_6 – Massa da cápsula com o provete seco (g)	130,06	131,47	133,54	134,04	134,25
ρ_s - Massa volúmica das partículas do solo	2,70	2,68	2,69	2,67	2,67
ρ_s - Massa volúmica das partículas do solo	2,68				

ANEXO II – Folhas de registro da determinação da distribuição granulométrica (EN ISO 17892-4:2016).

- Solo A

Peneiração:

Teor em água (EN ISO 17892-1:2014) - Peneiração - 1	
Referência da cápsula	102
m_c – Massa da cápsula (g)	791,7
m_1 – Massa da cápsula com provete húmido (g)	1298
m_2 – Massa da cápsula com provete seco (g)	1295,6
w – Teor em água (%)	0,48

Teor em água (EN ISO 17892-1:2014) - Peneiração - 2	
Referência da cápsula	44
m_c – Massa da cápsula (g)	753,8
m_1 – Massa da cápsula com provete húmido (g)	1324,30
m_2 – Massa da cápsula com provete seco (g)	1320,8
w – Teor em água (%)	0,62

Teor em água (EN ISO 17892-1:2014) - Peneiração - 3	
Referência da cápsula	278
m_c – Massa da cápsula (g)	789,9
m_1 – Massa da cápsula com provete húmido (g)	1506,9
m_2 – Massa da cápsula com provete seco (g)	1502,3
w – Teor em água (%)	0,65

Determinação da distribuição granulométrica (EN ISO 17892-4) - Método da peneiração				
Referência da amostra		Solo A - Repetição 1		
Preparação do provete () seco (X) húmido				
D _{max} – Diâmetro máximo das partículas (mm)	25,4	Massa mínima recomendada (g)		2000
Teor em água (%)		0,48		
m – Massa seca do provete (g)		2329,01		
m _w – Massa húmida do provete (g)		2340,1		
Separação inicial (peneiro de 10 mm)				
m _r – Massa do material retido no peneiro de 10 mm, após secagem (g)		259,4		
m _s – Massa do material que passa no peneiro de 10 mm (g)		2078,5		
m' _s – Massa reduzida (g)		528,8		
Razão entre massas [m' _s / m _s]		3,93		
Execução do ensaio				
Peneiros com abertura superiores a 10 mm				
Abertura dos peneiros (mm)	m _{ss} – Massas retidas (g)		m' _{ss} – Massas retidas ajustadas (g)	
63 mm	m _{ss1}	0	m' _{ss1}	0
37,5 mm	m _{ss2}	0	m' _{ss2}	0
20 mm	m _{ss3}	72,8	m' _{ss3}	72,80
10 mm	m _{ss4}	175,73	m' _{ss4}	175,73
Peneiros com abertura superiores a 0,063 mm				
Abertura dos peneiros (mm)	m _s – Massas retidas (g)		m' _s – Massas retidas ajustadas (g)	
6,3 mm	m _{s1}	48,63	m' _{s1}	191,14
2,0 mm	m _{s2}	197,9	m' _{s2}	777,87
0,60 mm	m _{s3}	126,74	m' _{s3}	498,16
0,20 mm	m _{s4}	54,79	m' _{s4}	215,36
0,063 mm	m _{s5}	36,1	m' _{s5}	141,89
m _p – massa do material que passa no peneiro de abertura 0,063 mm (g)			2,3	
Fração das partículas que passam em cada peneiro				
Peneiros com abertura superiores a 10 mm				
Abertura dos peneiros (mm)	f _n - fração que passa através do peneiro (%)			
63 mm	f _{63,0}		100	
37,5 mm	f _{37,5}		100	
20 mm	f _{20,0}		97	
10 mm	f _{10,0}		89	
Peneiros com abertura superiores a 0,063 mm				
Abertura dos peneiros (mm)	f _n - fração que passa através do peneiro (%)			
6,3 mm	f _{6,3}		81	
2,0 mm	f _{2,0}		48	
0,60 mm	f _{0,60}		26	
0,20 mm	f _{0,20}		17	
0,063 mm	f _{0,063}		11	

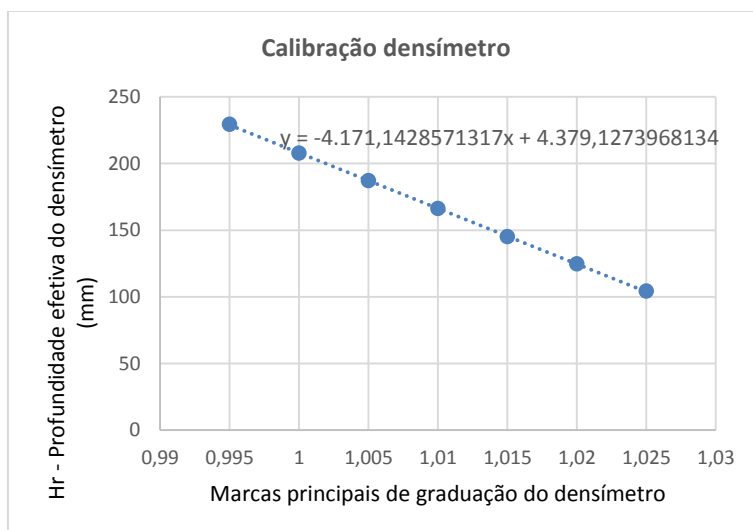
Determinação da distribuição granulométrica (EN ISO 17892-4) - Método da peneiração				
Referência da amostra		Solo A – Repetição 2		
Preparação do provete () seco (X) húmido				
D _{max} – Diâmetro máximo das partículas (mm)	25,4	Massa mínima recomendada (g)		2000
m _w – Massa húmida do provete (g)	2432,60			
Teor em água (%)	0,62			
m – Massa seca do provete (g)	2417,68			
Separação inicial (peneiro de 10 mm)				
m _r – Massa do material retido no peneiro de 10 mm, após secagem (g)	220,8			
m _s – Massa do material que passa no peneiro de 10 mm (g)	2209,9			
m' _s – Massa reduzida (g)	502,5			
Razão entre massas [m' _s / m _s]	4,40			
Execução do ensaio				
Peneiros com abertura superiores a 10 mm				
Abertura dos peneiros (mm)	m _{ss} – Massas retidas (g)		m' _{ss} – Massas retidas ajustadas (g)	
63 mm	m _{ss1}	0	m' _{ss1}	0
37,5 mm	m _{ss2}	0	m' _{ss2}	0
20 mm	m _{ss3}	64,78	m' _{ss3}	64,78
10 mm	m _{ss4}	154,98	m' _{ss4}	154,98
Peneiros com abertura superiores a 0,063 mm				
Abertura dos peneiros (mm)	m _s – Massas retidas (g)		m' _s – Massas retidas ajustadas (g)	
6,3 mm	m _{s1}	68,67	m' _{s1}	302,00
2,0 mm	m _{s2}	195,3	m' _{s2}	858,89
0,60 mm	m _{s3}	101,07	m' _{s3}	444,49
0,20 mm	m _{s4}	46,98	m' _{s4}	206,61
0,063 mm	m _{s5}	35,25	m' _{s5}	155,02
m _p – massa do material que passa no peneiro de abertura 0,063 mm (g)			3,63	
Fração das partículas que passam em cada peneiro				
Peneiros com abertura superiores a 10 mm				
Abertura dos peneiros (mm)	f _n - fração que passa através do peneiro (%)			
63 mm	f _{63,0}		100	
37,5 mm	f _{37,5}		100	
20 mm	f _{20,0}		97	
10 mm	f _{10,0}		91	
Peneiros com abertura superiores a 0,063 mm				
Abertura dos peneiros (mm)	f _n - fração que passa através do peneiro (%)			
6,3 mm	f _{6,3}		78	
2,0 mm	f _{2,0}		43	
0,60 mm	f _{0,60}		25	
0,20 mm	f _{0,20}		16	
0,063 mm	f _{0,063}		10	

Determinação da distribuição granulométrica (EN ISO 17892-4) - Método da peneiração				
Referência da amostra		Solo A – Repetição 3		
Preparação do provete () seco (X) húmido				
D_{max} – Diâmetro máximo das partículas (mm)	25,4	Massa mínima recomendada (g)	2000	
m_w – Massa húmida do provete (g)	3148,10			
Teor em água (%)	0,65			
m – Massa seca do provete (g)	3127,90			
Separação inicial (peneiro de 10 mm)				
m_r – Massa do material retido no peneiro de 10 mm, após secagem (g)	380,4			
m_s – Massa do material que passa no peneiro de 10 mm (g)	2765,2			
m'_s – Massa reduzida (g)	600,4			
Razão entre massas [m'_s / m_s]	4,61			
Execução do ensaio				
Peneiros com abertura superiores a 10 mm				
Abertura dos peneiros (mm)	m_{ss} – Massas retidas (g)		m'_{ss} – Massas retidas ajustadas (g)	
63 mm	m_{ss1}	0	m'_{ss1}	0
37,5 mm	m_{ss2}	0	m'_{ss2}	0
20 mm	m_{ss3}	48,25	m'_{ss3}	48,25
10 mm	m_{ss4}	308,4	m'_{ss4}	308,4
Peneiros com abertura superiores a 0,063 mm				
Abertura dos peneiros (mm)	m_s – Massas retidas (g)		m'_s – Massas retidas ajustadas (g)	
6,3 mm	m_{s1}	84,2	m'_{s1}	387,79
2,0 mm	m_{s2}	250,5	m'_{s2}	1153,70
0,60 mm	m_{s3}	113,4	m'_{s3}	522,27
0,20 mm	m_{s4}	51,09	m'_{s4}	235,30
0,063 mm	m_{s5}	38,77	m'_{s5}	178,56
m_p – massa do material que passa no peneiro de abertura 0,063 mm (g)	1,85			
Fração das partículas que passam em cada peneiro				
Peneiros com abertura superiores a 10 mm				
Abertura dos peneiros (mm)	f_n - fração que passa através do peneiro (%)			
63 mm	$f_{63,0}$ 100			
37,5 mm	$f_{37,5}$ 100			
20 mm	$f_{20,0}$ 98			
10 mm	$f_{10,0}$ 89			
Peneiros com abertura superiores a 0,063 mm				
Abertura dos peneiros (mm)	f_n - fração que passa através do peneiro (%)			
6,3 mm	$f_{6,3}$ 76			
2,0 mm	$f_{2,0}$ 39			
0,60 mm	$f_{0,60}$ 23			
0,20 mm	$f_{0,20}$ 15			
0,063 mm	$f_{0,063}$ 9			

Sedimentação – Método do densímetro:

Calibrações e correções associadas:

Densímetro - testes para calibrações e correções associados							
Calibração do volume							
Peso (g)	68,44						
V _h - Volume (ml)	68,44						
Calibração da escala							
L - distância entre as marcas de 100 ml e de 1000 ml da escala da proveta de sedimentação (mm)	310						
N - Distância entre o início do bolbo e a marca de graduação inferior da haste do densímetro (mm)	12,90						
h - comprimento do bolbo (mm)	165,98						
d _i - Distância entre a marca de graduação inferior e cada uma das principais graduações da escala R _h (mm)	d ₁ (1,0250)	d ₂ (1,0200)	d ₃ (1,0150)	d ₄ (1,0100)	d ₅ (1,0050)	d ₆ (1,0000)	d ₇ (0,9950)
	19,97	40,56	60,79	82,13	102,87	123,7	145,17
H - Comprimento entre o início do bolbo e a graduação R _h [N+d _i] (mm)	N+d ₁	N+d ₂	N+d ₃	N+d ₄	N+d ₅	N+d ₆	N+d ₇
	32,87	53,46	73,69	95,03	115,77	136,6	158,07
H _r - Profundidade efetiva do densímetro (mm)	104,0731	124,6631	144,8931	166,2331	186,9731	207,8031	229,2731
Correção do menisco							
Ponto onde o limite inferior do menisco interceta a escala do densímetro	-1						
Ponto onde o limite superior do menisco interceta a escala do densímetro	-1,5						
C _m - Correção do Menisco	0,5						



Agitação vigorosa:

Teor em água (EN ISO 17892-1:2014) – Sedimentação 1	
Referência da cápsula	27
m_c – Massa da cápsula (g)	121,82
m_1 – Massa da cápsula com provete húmido (g)	154,26
m_2 – Massa da cápsula com provete seco (g)	154
w – Teor em água (%)	0,81

Teor em água (EN ISO 17892-1:2014) – Sedimentação 2	
Referência da cápsula	27
m_c – Massa da cápsula (g)	121,82
m_1 – Massa da cápsula com provete húmido (g)	153,28
m_2 – Massa da cápsula com provete seco (g)	152,99
w – Teor em água (%)	0,93

Teor em água (EN ISO 17892-1:2014) – Sedimentação 3	
Referência da cápsula	27
m_c – Massa da cápsula (g)	121,82
m_1 – Massa da cápsula com provete húmido (g)	151,39
m_2 – Massa da cápsula com provete seco (g)	151,16
w – Teor em água (%)	0,78

Determinação da distribuição granulométrica (EN ISO 17892-4) - Método da sedimentação											
Referência da amostra			Solo A								
Observações			Agitação mecânica vigorosa - 10 min - Reação 1h30 min Repetição - 1								
Preparação do provete											
m _w – Massa húmida do provete (g)			89,13								
ω - Teor em água (%)		0,81	ρ _s – Massa volúmica das partículas (Mg/m ³)					2,66			
m – Massa seca do provete (g)			88,42								
Execução do ensaio											
R' ₀ – Leitura de referência (g/ml)			0								
t - Tempo (min)	0,5	1	2	4	8	30	60	120	360	1440	
Leitura real do densímetro (g/ml)	1,0130	1,0125	1,0120	1,0110	1,0095	1,0075	1,0065	1,0055	1,0040	1,0030	
R' _h - leitura observada do densímetro	13,0	12,5	12,0	11,0	9,5	7,5	6,5	5,5	4,0	3,0	
T - Temperatura (°C)	22,2					22,3	22,3	22,4	22,6	23,1	
R ₀ – Leitura de referência corrigida para o menisco [R' ₀ +C _m] (g/ml)							0,5				
R _h - Leitura verdadeira do densímetro [R' _h +C _m]	13,5	13,0	12,5	11,5	10,0	8,0	7,0	6,0	4,5	3,5	
η - viscosidade dinâmica da água à temperatura do ensaio (mPa.s)	0,953	0,953	0,953	0,953	0,953	0,951	0,951	0,949	0,944	0,933	
ρ _w - massa volúmica do fluido de sedimentação à temperatura de ensaio (Mg/m ³)	0,9978	0,9978	0,9978	0,9978	0,9978	0,9977	0,9977	0,9977	0,9977	0,9975	
t - Tempo decorrido desde o início da sedimentação (min)	0,5	1	2	4	8	30	60	120	360	1440	
H _r - Profundidade efetiva do densímetro (mm)	151,7	153,8	155,8	160,0	166,3	174,6	178,8	183,0	189,2	193,4	
d _i - diâmetro equivalente das partículas (mm)	0,073	0,052	0,037	0,026	0,019	0,010	0,007	0,005	0,003	0,002	
R _d - Leitura corrigida do densímetro [R _h - R ₀]	13,0	12,5	12,0	11,0	9,5	7,5	6,5	5,5	4,0	3,0	
K - fração das partículas de dimensão inferior ao diâmetro equivalente (%)	24	23	22	20	17	14	12	10	7	5	
f _{2,00} - fração que passa no peneiro de 2 mm no ensaio de peneiração (%)							48				
KC - fração corrigida das partículas de dimensão inferior ao diâmetro equivalente (%)	11	11	10	10	8	6	6	5	3	3	

Determinação da distribuição granulométrica (EN ISO 17892-4) - Método da sedimentação				
Referência da amostra		Solo A		
Observações		Peneiração material retido no peneiro de abertura 0,063 mm - Agitação vigorosa - Repetição: 1		
Preparação do provete () seco (X) húmido				
m – Massa seca do provete (g)		190,33		
m _w – Massa húmida do provete (g)		191,87		
Teor em água (%)		0,81		
Execução do ensaio				
Peneiros com abertura superiores a 20 mm				
Abertura dos peneiros (mm)	m _{ss} – Massas retidas (g)		m' _{ss} – Massas retidas ajustadas (g)	
63 mm	m _{ss1}	0	m' _{ss1}	0
37,5 mm	m _{ss2}	0	m' _{ss2}	0
20 mm	m _{ss3}	5,71	m' _{ss3}	5,71
10 mm	m _{ss4}	15,23	m' _{ss4}	15,23
Peneiros com abertura superiores a 0,063 mm				
Abertura dos peneiros (mm)	m _s – Massas retidas (g)		m' _s – Massas retidas ajustadas (g)	
6,3 mm	m _{s1}	15,23	m' _{s1}	15,23
2,0 mm	m _{s2}	64,71	m' _{s2}	64,71
0,60 mm	m _{s3}	35,64	m' _{s3}	35,64
0,20 mm	m _{s4}	17,64	m' _{s4}	17,64
0,063 mm	m _{s5}	13,65	m' _{s5}	13,65
Material que passa no peneiro com abertura de 0,063 mm				
m _p – massa do material que passa no peneiro de abertura 0,063 mm (g)		3,71		
Fração das partículas que passam em cada peneiro				
Peneiros com abertura superiores a 10 mm				
Abertura dos peneiros (mm)	f _n - fração que passa através do peneiro (%)			
63 mm	f _{63,0}		100	
37,5 mm	f _{37,5}		100	
20 mm	f _{20,0}		97	
10 mm	f _{10,0}		89	
Peneiros com abertura superiores a 0,063 mm				
Abertura dos peneiros (mm)	f _n - fração que passa através do peneiro (%)			
6,3 mm	f _{6,3}		81	
2,0 mm	f _{2,0}		47	
0,60 mm	f _{0,60}		28	
0,20 mm	f _{0,20}		19	
0,063 mm	f _{0,063}		12	

Determinação da distribuição granulométrica (EN ISO 17892-4) - Método da sedimentação											
Referência da amostra		Solo A									
Observações		Agitação mecânica vigorosa - 10 min - Reação 1h30 min Repetição - 2									
Preparação do provete											
m _w – Massa húmida do provete (g)		92,36									
ω - Teor em água (%)	0,93	ρ _s – Massa volúmica das partículas (Mg/m ³)					2,66				
m – Massa seca do provete (g)		91,51									
Execução do ensaio											
R' ₀ – Leitura de referência (g/ml)							0				
t - Tempo (min)	0,5	1	2	4	8	30	60	120	360	1440	
Leitura real do densímetro (g/ml)	1,0150	1,0145	1,0135	1,0125	1,0095	1,0085	1,0075	1,0060	1,0045	1,0035	
R' _h - leitura observada do densímetro	15,0	14,5	13,5	12,5	9,5	8,5	7,5	6,0	4,5	3,5	
T - Temperatura (°C)	20,0					19,9	19,9	19,9	19,9	19,5	
R ₀ – Leitura de referência corrigida para o menisco [R' ₀ +C _m] (g/ml)							0,5				
R _h - Leitura verdadeira do densímetro [R' _h +C _m]	15,5	15,0	14,0	13,0	10,0	9,0	8,0	6,5	5,0	4,0	
η - viscosidade dinâmica da água à temperatura do ensaio (mPa.s)	1,002	1,002	1,002	1,002	1,002	1,0047	1,0047	1,0047	1,0047	1,0155	
ρ _w - massa volúmica do fluido de sedimentação à temperatura de ensaio (Mg/m ³)	0,9982	0,9982	0,9982	0,9982	0,9982	0,9982	0,9982	0,9982	0,9982	0,9983	
t - Tempo decorrido desde o início da sedimentação (min)	0,5	1	2	4	8	30	60	120	360	1440	
H _r - Profundidade efetiva do densímetro (mm)	143,3	145,4	149,6	153,8	166,3	170,4	174,6	180,9	187,1	191,3	
d _i - diâmetro equivalente das partículas (mm)	0,073	0,052	0,037	0,027	0,020	0,010	0,007	0,005	0,003	0,002	
R _d - Leitura corrigida do densímetro [R _h - R ₀]	15,0	14,5	13,5	12,5	9,5	8,5	7,5	6,0	4,5	3,5	
K - fração das partículas de dimensão inferior ao diâmetro equivalente (%)	26	25	24	22	17	15	13	11	8	6	
f _{2,00} - fração que passa no peneiro de 2 mm no ensaio de peneiração (%)							43				
KC - fração corrigida das partículas de dimensão inferior ao diâmetro equivalente (%)	11	11	10	9	7	6	6	5	3	3	

Determinação da distribuição granulométrica (EN ISO 17892-4) - Método da sedimentação				
Referência da amostra		Solo A		
Observações		Peneiração material retido no peneiro de abertura 0,063 mm - Agitação vigorosa - Repetição: 2		
Preparação do provete () seco (X) húmido				
Teor em água (%)		0,93		
m_w – Massa húmida do provete (g)		198,82		
m – Massa seca do provete (g)		196,99		
Execução do ensaio				
Peneiros com abertura superiores a 10 mm				
Abertura dos peneiros (mm)	m_{ss} – Massas retidas (g)		m'_{ss} – Massas retidas ajustadas (g)	
63 mm	m_{ss1}	0	m'_{ss1}	0
37,5 mm	m_{ss2}	0	m'_{ss2}	0
20 mm	m_{ss3}	5,91	m'_{ss3}	5,91
10 mm	m_{ss4}	11,82	m'_{ss4}	11,82
Peneiros com abertura superiores a 0,063 mm				
Abertura dos peneiros (mm)	m_s – Massas retidas (g)		m'_s – Massas retidas ajustadas (g)	
6,3 mm	m_{s1}	25,61	m'_{s1}	25,61
2,0 mm	m_{s2}	61,07	m'_{s2}	61,07
0,60 mm	m_{s3}	31,21	m'_{s3}	31,21
0,20 mm	m_{s4}	19,05	m'_{s4}	19,05
0,063 mm	m_{s5}	16,04	m'_{s5}	16,04
m_p – massa do material que passa no peneiro de abertura 0,063 mm (g)			5,37	
Fração das partículas que passam em cada peneiro				
Peneiros com abertura superiores a 10 mm				
Abertura dos peneiros (mm)	f_n - fração que passa através do peneiro (%)			
63 mm	$f_{63,0}$		100	
37,5 mm	$f_{37,5}$		100	
20 mm	$f_{20,0}$		97	
10 mm	$f_{10,0}$		91	
Peneiros com abertura superiores a 0,063 mm				
Abertura dos peneiros (mm)	f_n - fração que passa através do peneiro (%)			
6,3 mm	$f_{6,3}$		78	
2,0 mm	$f_{2,0}$		47	
0,60 mm	$f_{0,60}$		31	
0,20 mm	$f_{0,20}$		21	
0,063 mm	$f_{0,063}$		13	

Determinação da distribuição granulométrica (EN ISO 17892-4) - Método da sedimentação										
Referência da amostra		Solo A								
Observações		Agitação mecânica vigorosa - 10 min - Reação 1h30 min Repetição - 3								
Preparação do provete										
m _w – Massa húmida do provete (g)		89,88								
ω - Teor em água (%)	0,78	ρ _s – Massa volúmica das partículas (Mg/m ³)		2,66						
m – Massa seca do provete (g)		89,18								
Execução do ensaio										
R' ₀ – Leitura de referência (g/ml)					0					
t - Tempo (min)	0,5	1	2	4	8	30	60	120	360	1440
Leitura real do densímetro (g/ml)	1,0135	1,0130	1,0125	1,0115	1,0100	1,0080	1,0070	1,0060	1,0045	1,0030
R' _h - leitura observada do densímetro	13,5	13,0	12,5	11,5	10,0	8,0	7,0	6,0	4,5	3,0
T - Temperatura (°C)	21,6					21,7	21,7	21,7	21,8	21,7
R ₀ – Leitura de referência corrigida para o menisco [R' ₀ +C _m] (g/ml)						0,5				
R _h - Leitura verdadeira do densímetro [R' _h +C _m]	14,0	13,5	13,0	12,0	10,5	8,5	7,5	6,5	5,0	3,5
η - viscosidade dinâmica da água à temperatura do ensaio (mPa.s)	0,966	0,966	0,966	0,966	0,966	0,964	0,964	0,964	0,962	0,964
ρ _w - massa volúmica do fluido de sedimentação à temperatura de ensaio (Mg/m ³)	0,9979	0,9979	0,9979	0,9979	0,9979	0,9979	0,9979	0,9979	0,9978	0,9979
t - Tempo decorrido desde o início da sedimentação (min)	0,5	1	2	4	8	30	60	120	360	1440
H _r - Profundidade efetiva do densímetro (mm)	149,6	151,7	153,8	157,9	164,2	172,5	176,7	180,9	187,1	193,4
d _i - diâmetro equivalente das partículas (mm)	0,073	0,052	0,037	0,027	0,019	0,010	0,007	0,005	0,003	0,002
R _d - Leitura corrigida do densímetro [R _h - R ₀]	13,5	13,0	12,5	11,5	10,0	8,0	7,0	6,0	4,5	3,0
K - fração das partículas de dimensão inferior ao diâmetro equivalente (%)	24	23	22	21	18	14	13	11	8	5
f _{2,00} - fração que passa no peneiro de 2 mm no ensaio de peneiração (%)								39		
KC - fração corrigida das partículas de dimensão inferior ao diâmetro equivalente (%)	10	9	9	8	7	6	5	4	3	2

Determinação da distribuição granulométrica (EN ISO 17892-4) - Método da sedimentação				
Referência da amostra		Solo A		
Observações		Peneiração material retido no peneiro de abertura 0,063 mm - Agitação vigorosa - Repetição: 3		
Preparação do provete () seco (X) húmido				
Teor em água (%)		0,78		
mw – Massa húmida do provete (g)		193,48		
m – Massa seca do provete (g)		191,97		
Execução do ensaio				
Peneiros com abertura superiores a 10 mm				
Abertura dos peneiros (mm)	m _{ss} – Massas retidas (g)		m' _{ss} – Massas retidas ajustadas (g)	
63 mm	m _{ss1}	0	m' _{ss1}	0
37,5 mm	m _{ss2}	0	m' _{ss2}	0
20 mm	m _{ss3}	3,84	m' _{ss3}	3,84
10 mm	m _{ss4}	17,28	m' _{ss4}	17,28
Peneiros com abertura superiores a 0,063 mm				
Abertura dos peneiros (mm)	m _s – Massas retidas (g)		m' _s – Massas retidas ajustadas (g)	
6,3 mm	m _{s1}	24,96	m' _{s1}	24,96
2,0 mm	m _{s2}	56,02	m' _{s2}	56,02
0,60 mm	m _{s3}	35,5	m' _{s3}	35,50
0,20 mm	m _{s4}	18,53	m' _{s4}	18,53
0,063 mm	m _{s5}	13,51	m' _{s5}	13,51
m _p – massa do material que passa no peneiro de abertura 0,063 mm (g)			2,89	
Fração das partículas que passam em cada peneiro				
Peneiros com abertura superiores a 10 mm				
Abertura dos peneiros (mm)	f _n - fração que passa através do peneiro (%)			
63 mm	f _{63,0}		100	
37,5 mm	f _{37,5}		100	
20 mm	f _{20,0}		98	
10 mm	f _{10,0}		89	
Peneiros com abertura superiores a 0,063 mm				
Abertura dos peneiros (mm)	f _n - fração que passa através do peneiro (%)			
6,3 mm	f _{6,3}		76	
2,0 mm	f _{2,0}		47	
0,60 mm	f _{0,60}		28	
0,20 mm	f _{0,20}		19	
0,063 mm	f _{0,063}		12	

Agitação suave:

Teor em água (EN ISO 17892-1:2014) – Sedimentação 1	
Referência da cápsula	102
m_c – Massa da cápsula (g)	791,6
m_1 – Massa da cápsula com provete húmido (g)	1079,9
m_2 – Massa da cápsula com provete seco (g)	1078,3
w – Teor em água (%)	0,56

Teor em água (EN ISO 17892-1:2014) – Sedimentação 2	
Referência da cápsula	102
m_c – Massa da cápsula (g)	791,7
m_1 – Massa da cápsula com provete húmido (g)	1089,5
m_2 – Massa da cápsula com provete seco (g)	1088,2
w – Teor em água (%)	0,44

Teor em água (EN ISO 17892-1:2014) – Sedimentação 3	
Referência da cápsula	102
m_c – Massa da cápsula (g)	791,7
m_1 – Massa da cápsula com provete húmido (g)	1089,5
m_2 – Massa da cápsula com provete seco (g)	1088,2
w – Teor em água (%)	0,44

Determinação da distribuição granulométrica (EN ISO 17892-4) - Método da sedimentação										
Referência da amostra			Solo A							
Observações			Agitação magnética suave- 4h - Reação - 1 hora Repetição - 1							
Preparação do provete										
m _w - Massa húmida do provete (g)			132,90							
ω - Teor em água (%)	0,56		ρ _s - Massa volúmica das partículas (Mg/m ³)					2,66		
m - Massa seca do provete (g)			132,16							
Execução do ensaio										
R' ₀ - Leitura de referência (g/ml)					0					
t - Tempo (min)	0,5	1	2	4	8	30	60	120	360	1440
Leitura real do densímetro (g/ml)	1,0300	1,0250	1,0240	1,0210	1,0185	1,0145	1,0125	1,0105	1,0080	1,0060
R' _h - leitura observada do densímetro	26,5	25,0	23,5	21,0	18,5	14,5	12,5	10,5	8,0	6,0
T - Temperatura (°C)	19,5				19,5	19,5	19,5	19,5	19,5	19,2
R ₀ - Leitura de referência corrigida para o menisco [R' ₀ +C _m] (g/ml)						0,5				
R _h - Leitura verdadeira do densímetro [R' _h +C _m]	27,0	25,5	24,0	21,5	19,0	15,0	13,0	11,0	8,5	6,5
η - viscosidade dinâmica da água à temperatura do ensaio (mPa.s)	1,016	1,016	1,016	1,016	1,016	1,016	1,016	1,016	1,016	1,024
ρ _w - massa volúmica do fluido de sedimentação à temperatura de ensaio (Mg/m ³)	0,9983	0,9983	0,9983	0,9983	0,9983	0,9983	0,9983	0,9983	0,9983	0,9984
t - Tempo decorrido desde o início da sedimentação (min)	0,5	1	2	4	8	30	60	120	360	1440
H _r - Profundidade efetiva do densímetro (mm)	95,4	101,6	107,9	118,3	128,7	145,4	153,8	162,1	172,5	180,9
d _i - diâmetro equivalente das partículas (mm)	0,060	0,044	0,032	0,024	0,017	0,010	0,007	0,005	0,003	0,002
R _d - Leitura corrigida do densímetro [R _h - R ₀]	26,5	25,0	23,5	21,0	18,5	14,5	12,5	10,5	8,0	6,0
K - fração das partículas de dimensão inferior ao diâmetro equivalente (%)	32	30	28	25	22	18	15	13	10	7
f _{2,00} - fração que passa no peneiro de 2 mm no ensaio de peneiração (%)								48		
KC - fração corrigida das partículas de dimensão inferior ao diâmetro equivalente (%)	15	14	14	12	11	8	7	6	5	3

Determinação da distribuição granulométrica (EN ISO 17892-4) - Método da sedimentação				
Referência da amostra		Solo A		
Observações		Peneiração material retido no peneiro de abertura 0,063 mm - Agitação suave - Repetição: 1		
Preparação do provete () seco (X) húmido				
Teor em água (%)		0,56		
mw – Massa húmida do provete (g)		286,7		
m – Massa seca do provete (g)		285,11		
Execução do ensaio				
Peneiros com abertura superiores a 10 mm				
Abertura dos peneiros (mm)	m _{ss} – Massas retidas (g)		m' _{ss} – Massas retidas ajustadas (g)	
63 mm	m _{ss1}	0	m' _{ss1}	0
37,5 mm	m _{ss2}	0	m' _{ss2}	0
20 mm	m _{ss3}	8,55	m' _{ss3}	8,55
10 mm	m _{ss4}	22,81	m' _{ss4}	22,81
Peneiros com abertura superiores a 0,063 mm				
Abertura dos peneiros (mm)	m _s – Massas retidas (g)		m' _s – Massas retidas ajustadas (g)	
6,3 mm	m _{s1}	22,81	m' _{s1}	22,81
2,0 mm	m _{s2}	94,09	m' _{s2}	94,09
0,60 mm	m _{s3}	34,21	m' _{s3}	34,21
0,20 mm	m _{s4}	27,82	m' _{s4}	27,82
0,063 mm	m _{s5}	30,62	m' _{s5}	30,62
m _p – massa do material que passa no peneiro de abertura 0,063 mm (g)		13,99		
Fração das partículas que passam em cada peneiro				
Peneiros com abertura superiores a 10 mm				
Abertura dos peneiros (mm)	f _n - fração que passa através do peneiro (%)			
63 mm	f _{63,0}		100	
37,5 mm	f _{37,5}		100	
20 mm	f _{20,0}		97	
10 mm	f _{10,0}		89	
Peneiros com abertura superiores a 0,063 mm				
Abertura dos peneiros (mm)	f _n - fração que passa através do peneiro (%)			
6,3 mm	f _{6,3}		81	
2,0 mm	f _{2,0}		48	
0,60 mm	f _{0,60}		36	
0,20 mm	f _{0,20}		26	
0,063 mm	f _{0,063}		16	

Determinação da distribuição granulométrica (EN ISO 17892-4) - Método da sedimentação										
Referência da amostra			Solo A							
Observações			Agitação magnética suave- 4h - Reação - 1 hora Repetição - 2							
Preparação do provete										
m _w - Massa húmida do provete (g)			113,50							
ω - Teor em água (%)		0,44	ρ _s - Massa volúmica das partículas (Mg/m ³)				2,66			
m - Massa seca do provete (g)			113,00							
Execução do ensaio										
R' ₀ - Leitura de referência (g/ml)					0					
t - Tempo (min)	0,5	1	2	4	8	30	60	120	360	1440
Leitura real do densímetro (g/ml)	1,0205	1,0195	1,0180	1,0170	1,0150	1,0115	1,0100	1,0080	1,0060	1,0045
R' _h - leitura observada do densímetro	20,5	19,5	18,0	17,0	15,0	11,5	10,0	8,0	6,0	4,5
T - Temperatura (°C)	19,2					19,2	19,2	19,2	19,2	19,4
R ₀ - Leitura de referência corrigida para o menisco [R' ₀ +C _m] (g/ml)							0,5			
R _h - Leitura verdadeira do densímetro [R' _h +C _m]	21,0	20,0	18,5	17,5	15,5	12,0	10,5	8,5	6,5	5,0
η - viscosidade dinâmica da água à temperatura do ensaio (mPa.s)	1,024	1,024	1,024	1,024	1,024	1,024	1,024	1,024	1,024	1,018
ρ _w - massa volúmica do fluido de sedimentação à temperatura de ensaio (Mg/m ³)	0,9984	0,9984	0,9984	0,9984	0,9984	0,9984	0,9984	0,9984	0,9984	0,9983
t - Tempo decorrido desde o início da sedimentação (min)	0,5	1	2	4	8	30	60	120	360	1440
H _r - Profundidade efetiva do densímetro (mm)	120,4	124,6	130,8	135,0	143,3	157,9	164,2	172,5	180,9	187,1
d _i - diâmetro equivalente das partículas (mm)	0,067	0,048	0,035	0,025	0,018	0,010	0,007	0,005	0,003	0,002
R _d - Leitura corrigida do densímetro [R _h - R ₀]	20,5	19,5	18,0	17,0	15,0	11,5	10,0	8,0	6,0	4,5
K - fração das partículas de dimensão inferior ao diâmetro equivalente (%)	29	28	26	24	21	16	14	11	9	6
f _{2,00} - fração que passa no peneiro de 2 mm no ensaio de peneiração (%)								43		
KC - fração corrigida das partículas de dimensão inferior ao diâmetro equivalente (%)	12	12	11	10	9	7	6	5	4	3

Determinação da distribuição granulométrica (EN ISO 17892-4) - Método da sedimentação				
Referência da amostra		Solo A		
Observações		Peneiração material retido no peneiro de abertura 0,063 mm - Agitação suave - Repetição: 2		
Preparação do provete () seco (X) húmido				
Teor em água		0,44		
m_w – Massa húmida do provete (g)		247,60		
m – Massa seca do provete (g)		246,52		
Execução do ensaio				
Peneiros com abertura superiores a 10 mm				
Abertura dos peneiros (mm)	m_{ss} – Massas retidas (g)		m'_{ss} – Massas retidas ajustadas (g)	
63 mm	m_{ss1}	0	m'_{ss1}	0
37,5 mm	m_{ss2}	0	m'_{ss2}	0
20 mm	m_{ss3}	7,40	m'_{ss3}	7,40
10 mm	m_{ss4}	14,79	m'_{ss4}	14,79
Peneiros com abertura superiores a 0,063 mm				
Abertura dos peneiros (mm)	m_s – Massas retidas (g)		m'_s – Massas retidas ajustadas (g)	
6,3 mm	m_{s1}	32,05	m'_{s1}	32,05
2,0 mm	m_{s2}	78,89	m'_{s2}	78,89
0,60 mm	m_{s3}	27,9	m'_{s3}	27,90
0,20 mm	m_{s4}	23,87	m'_{s4}	23,87
0,063 mm	m_{s5}	25,01	m'_{s5}	25,01
m_p – massa do material que passa no peneiro de abertura 0,063 mm (g)				6,03
Fração das partículas que passam em cada peneiro				
Peneiros com abertura superiores a 10 mm				
Abertura dos peneiros (mm)	f_n - fração que passa através do peneiro (%)			
63 mm	$f_{63,0}$		100	
37,5 mm	$f_{37,5}$		100	
20 mm	$f_{20,0}$		97	
10 mm	$f_{10,0}$		91	
Peneiros com abertura superiores a 0,063 mm				
Abertura dos peneiros (mm)	f_n - fração que passa através do peneiro (%)			
6,3 mm	$f_{6,3}$		78	
2,0 mm	$f_{2,0}$		46	
0,60 mm	$f_{0,60}$		35	
0,20 mm	$f_{0,20}$		25	
0,063 mm	$f_{0,063}$		15	

Determinação da distribuição granulométrica (EN ISO 17892-4) - Método da sedimentação										
Referência da amostra				Solo A						
Observações				Agitação magnética suave- 4h - Reação - 1 hora Repetição - 3						
Preparação do provete										
m _w - Massa húmida do provete (g)				130,30						
ω - Teor em água (%)		0,44		ρ _s - Massa volúmica das partículas (Mg/m ³)				2,66		
m - Massa seca do provete (g)				129,73						
Execução do ensaio										
R' ₀ - Leitura de referência (g/ml)					0					
t - Tempo (min)	0,5	1	2	4	8	30	60	120	360	1440
Leitura real do densímetro (g/ml)	1,0250	1,0240	1,0220	1,0200	1,0180	1,0140	1,0115	1,0100	1,0075	1,0055
R' _h - leitura observada do densímetro	25,0	24,0	22,0	20,0	18,0	14,0	11,5	10,0	7,5	5,5
T - Temperatura (°C)	19,4				19,4	19,5	19,5	19,6	19,5	
R ₀ - Leitura de referência corrigida para o menisco [R' ₀ +C _m] (g/ml)								0,5		
R _h - Leitura verdadeira do densímetro [R' _h +C _m]	25,5	24,5	22,5	20,5	18,5	14,5	12,0	10,5	8,0	6,0
η - viscosidade dinâmica da água à temperatura do ensaio (mPa.s)	1,018	1,018	1,018	1,018	1,018	1,018	1,016	1,016	1,013	1,016
ρ _w - massa volúmica do fluido de sedimentação à temperatura de ensaio (Mg/m ³)	0,9983	0,9983	0,9983	0,9983	0,9983	0,9983	0,9983	0,9983	0,9983	0,9983
t - Tempo decorrido desde o início da sedimentação (min)	0,5	1	2	4	8	30	60	120	360	1440
H _r - Profundidade efetiva do densímetro (mm)	101,6	105,8	114,1	122,5	130,8	147,5	157,9	164,2	174,6	183,0
d _i - diâmetro equivalente das partículas (mm)	0,062	0,045	0,033	0,024	0,018	0,010	0,007	0,005	0,003	0,002
R _d - Leitura corrigida do densímetro [R' _h - R ₀]	25,0	24,0	22,0	20,0	18,0	14,0	11,5	10,0	7,5	5,5
K - fração das partículas de dimensão inferior ao diâmetro equivalente (%)	31	30	27	25	22	17	14	12	9	7
f _{2,00} - fração que passa no peneiro de 2 mm no ensaio de peneiração (%)								39		
KC - fração corrigida das partículas de dimensão inferior ao diâmetro equivalente (%)	12	12	11	10	9	7	6	5	4	3

Determinação da distribuição granulométrica (EN ISO 17892-4) - Método da sedimentação				
Referência da amostra		Solo A		
Observações		Peneiração material retido no peneiro de abertura 0,063 mm - Agitação suave - Repetição: 3		
Preparação do provete () seco (X) húmido				
Teor em água (%)		0,44		
m _w – Massa húmida do provete (g)		274,90		
m – Massa seca do provete (g)		273,70		
Execução do ensaio				
Peneiros com abertura superiores a 10 mm				
Abertura dos peneiros (mm)	m _{ss} – Massas retidas (g)		m' _{ss} – Massas retidas ajustadas (g)	
63 mm	m _{ss1}	0	m' _{ss1}	0
37,5 mm	m _{ss2}	0	m' _{ss2}	0
20 mm	m _{ss3}	5,47	m' _{ss3}	5,47
10 mm	m _{ss4}	24,63	m' _{ss4}	24,63
Peneiros com abertura superiores a 0,063 mm				
Abertura dos peneiros (mm)	m _s – Massas retidas (g)		m' _s – Massas retidas ajustadas (g)	
6,3 mm	m _{s1}	35,58	m' _{s1}	35,58
2,0 mm	m _{s2}	82,1	m' _{s2}	82,11
0,60 mm	m _{s3}	30,11	m' _{s3}	30,11
0,20 mm	m _{s4}	27,37	m' _{s4}	27,37
0,063 mm	m _{s5}	27,37	m' _{s5}	27,37
m _p – massa do material que passa no peneiro de abertura 0,063 mm (g)				11,02
Fração das partículas que passam em cada peneiro				
Peneiros com abertura superiores a 10 mm				
Abertura dos peneiros (mm)	f _n - fração que passa através do peneiro (%)			
63 mm	f _{63,0}		100	
37,5 mm	f _{37,5}		100	
20 mm	f _{20,0}		98	
10 mm	f _{10,0}		89	
Peneiros com abertura superiores a 0,063 mm				
Abertura dos peneiros (mm)	f _n - fração que passa através do peneiro (%)			
6,3 mm	f _{6,3}		76	
2,0 mm	f _{2,0}		46	
0,60 mm	f _{0,60}		35	
0,20 mm	f _{0,20}		25	
0,063 mm	f _{0,063}		15	

- Solo B

Peneiração:

Teor em água (EN ISO 17892-1:2014) - Peneiração - 1	
Referência da cápsula	54
m_c – Massa da cápsula (g)	123,35
m_1 – Massa da cápsula com provete húmido (g)	153,92
m_2 – Massa da cápsula com provete seco (g)	153,15
w – Teor em água (%)	2,58

Teor em água (EN ISO 17892-1:2014) - Peneiração - 2	
Referência da cápsula	54
m_c – Massa da cápsula (g)	123,35
m_1 – Massa da cápsula com provete húmido (g)	153,92
m_2 – Massa da cápsula com provete seco (g)	153,15
w – Teor em água (%)	2,58

Teor em água (EN ISO 17892-1:2014) - Peneiração - 3	
Referência da cápsula	54
m_c – Massa da cápsula (g)	123,35
m_1 – Massa da cápsula com provete húmido (g)	153,92
m_2 – Massa da cápsula com provete seco (g)	153,15
w – Teor em água (%)	2,58

Determinação da distribuição granulométrica (EN ISO 17892-4) - Método da peneiração				
Referência da amostra		Solo B - Repetição 1		
Preparação do provete () seco (X) húmido				
D_{max} – Diâmetro máximo das partículas (mm)	2,00	Massa mínima recomendada (g)		100,00
m_w – Massa húmida do provete (g)	103,84			
Teor em água (%)	2,58			
m – Massa seca do provete (g)	101,22			
Separação inicial (peneiro de 10 mm)				
m_r – Massa do material retido no peneiro de 10 mm, após secagem (g)	0			
m_s – Massa do material que passa no peneiro de 10 mm (g)	103,84			
m'_s – Massa reduzida (g)	103,84			
Razão entre massas [m'_s / m_s]	1			
Execução do ensaio				
Peneiros com abertura superiores a 10 mm				
Abertura dos peneiros (mm)	m_{ss} – Massas retidas (g)		m'_{ss} – Massas retidas ajustadas (g)	
63 mm	m_{ss1}	0	m'_{ss1}	0
37,5 mm	m_{ss2}	0	m'_{ss2}	0
20 mm	m_{ss3}	0	m'_{ss3}	0
10 mm	m_{ss4}	0	m'_{ss4}	0
Peneiros com abertura superiores a 0,063 mm				
Abertura dos peneiros (mm)	m_s – Massas retidas (g)		m'_s – Massas retidas ajustadas (g)	
6,3 mm	m_{s1}	0	m'_{s1}	0
2,0 mm	m_{s2}	0,14	m'_{s2}	0,14
0,60 mm	m_{s3}	1,38	m'_{s3}	1,38
0,20 mm	m_{s4}	11,00	m'_{s4}	11,00
0,063 mm	m_{s5}	18,99	m'_{s5}	18,99
m_p – massa do material que passa no peneiro de abertura 0,063 mm (g)				69,69
Fração das partículas que passam em cada peneiro				
Peneiros com abertura superiores a 10 mm				
Abertura dos peneiros (mm)	f_n - fração que passa através do peneiro (%)			
63 mm	$f_{63,0}$		100	
37,5 mm	$f_{37,5}$		100	
20 mm	$f_{20,0}$		100	
10 mm	$f_{10,0}$		100	
Peneiros com abertura superiores a 0,063 mm				
Abertura dos peneiros (mm)	f_n - fração que passa através do peneiro (%)			
6,3 mm	$f_{6,3}$		100	
2,0 mm	$f_{2,0}$		100	
0,60 mm	$f_{0,60}$		98	
0,20 mm	$f_{0,20}$		88	
0,063 mm	$f_{0,063}$		69	

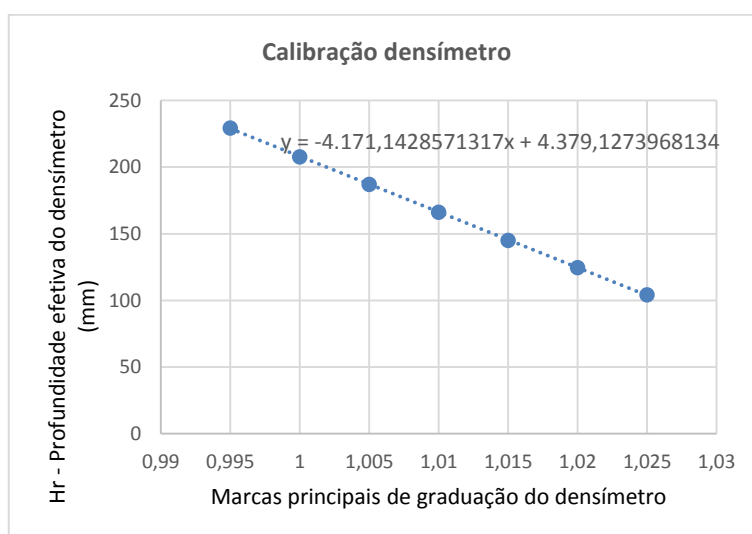
Determinação da distribuição granulométrica (EN ISO 17892-4) - Método da peneiração				
Referência da amostra		Solo B – Repetição 2		
Preparação do provete () seco (X) húmido				
D_{max} – Diâmetro máximo das partículas (mm)	2,00	Massa mínima recomendada (g)	100,00	
m_w – Massa húmida do provete (g)	103,14			
Teor em água (%)	2,58			
m – Massa seca do provete (g)	100,54			
Separação inicial (peneiro de 10 mm)				
m_r – Massa do material retido no peneiro de 10 mm, após secagem (g)	0			
m_s – Massa do material que passa no peneiro de 10 mm (g)	103,14			
m'_s – Massa reduzida (g)	103,14			
Razão entre massas [m'_s / m_s]	1			
Execução do ensaio				
Peneiros com abertura superiores a 10 mm				
Abertura dos peneiros (mm)	m_{ss} – Massas retidas (g)		m'_{ss} – Massas retidas ajustadas (g)	
63 mm	m_{ss1}	0	m'_{ss1}	0
37,5 mm	m_{ss2}	0	m'_{ss2}	0
20 mm	m_{ss3}	0	m'_{ss3}	0
10 mm	m_{ss4}	0	m'_{ss4}	0
Peneiros com abertura superiores a 0,063 mm				
Abertura dos peneiros (mm)	m_s – Massas retidas (g)		m'_s – Massas retidas ajustadas (g)	
6,3 mm	m_{s1}	0	m'_{s1}	0
2,0 mm	m_{s2}	0,08	m'_{s2}	0,08
0,60 mm	m_{s3}	1,43	m'_{s3}	1,43
0,20 mm	m_{s4}	10,69	m'_{s4}	10,69
0,063 mm	m_{s5}	18,00	m'_{s5}	18,00
m_p – massa do material que passa no peneiro de abertura 0,063 mm (g)				70,31
Fração das partículas que passam em cada peneiro				
Peneiros com abertura superiores a 10 mm				
Abertura dos peneiros (mm)	f_n - fração que passa através do peneiro (%)			
63 mm	$f_{63,0}$		100	
37,5 mm	$f_{37,5}$		100	
20 mm	$f_{20,0}$		100	
10 mm	$f_{10,0}$		100	
Peneiros com abertura superiores a 0,063 mm				
Abertura dos peneiros (mm)	f_n - fração que passa através do peneiro (%)			
6,3 mm	$f_{6,3}$		100	
2,0 mm	$f_{2,0}$		100	
0,60 mm	$f_{0,60}$		98	
0,20 mm	$f_{0,20}$		88	
0,063 mm	$f_{0,063}$		70	

Determinação da distribuição granulométrica (EN ISO 17892-4) - Método da peneiração				
Referência da amostra		Solo B – Repetição 3		
Preparação do provete () seco (X) húmido				
D_{max} – Diâmetro máximo das partículas (mm)	2,00	Massa mínima recomendada (g)		100,00
m_w – Massa húmida do provete (g)	103,71			
Teor em água (%)	2,58			
m – Massa seca do provete (g)	101,10			
Separação inicial (peneiro de 10 mm)				
m_r – Massa do material retido no peneiro de 10 mm, após secagem (g)	0			
m_s – Massa do material que passa no peneiro de 10 mm (g)	103,71			
m'_s – Massa reduzida (g)	103,71			
Razão entre massas [m'_s / m_s]	1			
Execução do ensaio				
Peneiros com abertura superiores a 10 mm				
Abertura dos peneiros (mm)	m_{ss} – Massas retidas (g)		m'_{ss} – Massas retidas ajustadas (g)	
63 mm	m_{ss1}	0	m'_{ss1}	0
37,5 mm	m_{ss2}	0	m'_{ss2}	0
20 mm	m_{ss3}	0	m'_{ss3}	0
10 mm	m_{ss4}	0	m'_{ss4}	0
Peneiros com abertura superiores a 0,063 mm				
Abertura dos peneiros (mm)	m_s – Massas retidas (g)		m'_s – Massas retidas ajustadas (g)	
6,3 mm	m_{s1}	0	m'_{s1}	0
2,0 mm	m_{s2}	0,04	m'_{s2}	0,04
0,60 mm	m_{s3}	1,59	m'_{s3}	1,59
0,20 mm	m_{s4}	10,68	m'_{s4}	10,68
0,063 mm	m_{s5}	18,15	m'_{s5}	18,15
m_p – massa do material que passa no peneiro de abertura 0,063 mm (g)				70,59
Fração das partículas que passam em cada peneiro				
Peneiros com abertura superiores a 10 mm				
Abertura dos peneiros (mm)	f_n - fração que passa através do peneiro (%)			
63 mm	$f_{63,0}$ 100			
37,5 mm	$f_{37,5}$ 100			
20 mm	$f_{20,0}$ 100			
10 mm	$f_{10,0}$ 100			
Peneiros com abertura superiores a 0,063 mm				
Abertura dos peneiros (mm)	f_n - fração que passa através do peneiro (%)			
6,3 mm	$f_{6,3}$ 100			
2,0 mm	$f_{2,0}$ 100			
0,60 mm	$f_{0,60}$ 98			
0,20 mm	$f_{0,20}$ 88			
0,063 mm	$f_{0,063}$ 70			

Sedimentação – Método do densímetro:

Calibrações e correções associadas:

Densímetro - testes para calibrações e correções associados							
Calibração do volume							
Peso (g)	68,44						
V _n - Volume (ml)	68,44						
Calibração da escala							
L - distância entre as marcas de 100 ml e de 1000 ml da escala da proveta de sedimentação (mm)	310						
N - Distância entre o início do bolbo e a marca de graduação inferior da haste do densímetro (mm)	12,90						
h - comprimento do bolbo (mm)	165,98						
d _i - Distância entre a marca de graduação inferior e cada uma das principais graduações da escala R _h (mm)	d ₁ (1,0250)	d ₂ (1,0200)	d ₃ (1,0150)	d ₄ (1,0100)	d ₅ (1,0050)	d ₆ (1,0000)	d ₇ (0,9950)
	19,97	40,56	60,79	82,13	102,87	123,7	145,17
H - Comprimento entre o início do bolbo e a graduação R _h [N+d _i] (mm)	N+d ₁	N+d ₂	N+d ₃	N+d ₄	N+d ₅	N+d ₆	N+d ₇
	32,87	53,46	73,69	95,03	115,77	136,6	158,07
H _r - Profundidade efetiva do densímetro (mm)	104,0731	124,6631	144,8931	166,2331	186,9731	207,8031	229,2731
Correção do menisco							
Ponto onde o limite inferior do menisco interceta a escala do densímetro	-1						
Ponto onde o limite superior do menisco interceta a escala do densímetro	-1,5						
C _m - Correção do Menisco	0,5						



Agitação vigorosa:

Teor em água (EN ISO 17892-1:2014) – Sedimentação 1	
Referência da cápsula	27
m_c – Massa da cápsula (g)	121,83
m_1 – Massa da cápsula com provete húmido (g)	221,83
m_2 – Massa da cápsula com provete seco (g)	218,37
w – Teor em água (%)	3,58

Teor em água (EN ISO 17892-1:2014) – Sedimentação 2	
Referência da cápsula	27
m_c – Massa da cápsula (g)	121,83
m_1 – Massa da cápsula com provete húmido (g)	221,82
m_2 – Massa da cápsula com provete seco (g)	218,92
w – Teor em água (%)	2,99

Teor em água (EN ISO 17892-1:2014) – Sedimentação 3	
Referência da cápsula	27
m_c – Massa da cápsula (g)	121,82
m_1 – Massa da cápsula com provete húmido (g)	156,6
m_2 – Massa da cápsula com provete seco (g)	155,67
w – Teor em água (%)	2,75

Determinação da distribuição granulométrica (EN ISO 17892-4) - Método da sedimentação										
Referência da amostra				Solo B						
Observações				Agitação mecânica vigorosa - 10 min - Reação 1h30 min Repetição - 1						
Preparação do provete										
m _w - Massa húmida do provete (g)				40,06						
ω - Teor em água (%)		3,58		ρ _s - Massa volúmica das partículas (Mg/m ³)				2,68		
m - Massa seca do provete (g)				38,67						
Execução do ensaio										
R' ₀ - Leitura de referência (g/ml)					0					
t - Tempo (min)	0,5	1	2	4	8	30	60	120	360	1440
Leitura real do densímetro (g/ml)	1,0185	1,0180	1,0175	1,0170	1,0165	1,0140	1,0135	1,0120	1,0110	1,0100
R' _h - leitura observada do densímetro	18,5	18	17,5	17	16,5	14	13,5	12	11	10
T - Temperatura (°C)	21,4				21,4	21,2	21,1	21,0	20,8	
R ₀ - Leitura de referência corrigida para o menisco [R' ₀ +C _m] (g/ml)								0,5		
R _h - Leitura verdadeira do densímetro [R' _h +C _m]	19,0	18,5	18,0	17,5	17,0	14,5	14,0	12,5	11,5	10,5
η - viscosidade dinâmica da água à temperatura do ensaio (mPa.s)	0,971	0,971	0,971	0,971	0,971	0,971	0,975	0,978	0,980	0,984
ρ _w - massa volúmica do fluido de sedimentação à temperatura de ensaio (Mg/m ³)	0,9979	0,9979	0,9979	0,9979	0,9979	0,9979	0,9980	0,9980	0,9980	0,9981
t - Tempo decorrido desde o início da sedimentação (min)	0,5	1	2	4	8	30	60	120	360	1440
H _r - Profundidade efetiva do densímetro (mm)	128,8	130,9	133,1	135,2	137,3	147,9	150,0	156,3	160,5	164,8
d _i - diâmetro equivalente das partículas (mm)	0,067	0,048	0,034	0,024	0,017	0,009	0,007	0,005	0,003	0,001
R _d - Leitura corrigida do densímetro [R _h - R ₀]	18,5	18,0	17,5	17,0	16,5	14,0	13,5	12,0	11,0	10,0
K - fração das partículas de dimensão inferior ao diâmetro equivalente (%)	76	74	72	70	68	58	56	49	45	41
f _{2,00} - fração que passa no peneiro de 2 mm no ensaio de peneiração (%)								100		
KC - fração corrigida das partículas de dimensão inferior ao diâmetro equivalente (%)	76	74	72	70	68	58	56	49	45	41

Determinação da distribuição granulométrica (EN ISO 17892-4) - Método da sedimentação				
Referência da amostra		Solo B		
Observações		Peneiração material retido no peneiro de abertura 0,063 mm - Agitação vigorosa - Repetição: 1		
Preparação do provete () seco (X) húmido				
m – Massa seca do provete (g)		38,67		
mw – Massa húmida do provete (g)		40,06		
Teor em água (%)		3,58		
Separação inicial (peneiro de 10 mm)				
m _r – Massa do material retido no peneiro de 10 mm, após secagem (g)		0		
m _s – Massa do material que passa no peneiro de 10 mm (g)		40,06		
m' _s – Massa reduzida (g)		40,06		
Razão entre massas [m' _s / m _s]		1		
Execução do ensaio				
Peneiros com abertura superiores a 10 mm				
Abertura dos peneiros (mm)	m _{ss} – Massas retidas (g)		m' _{ss} – Massas retidas ajustadas (g)	
63 mm	m _{ss1}	0	m' _{ss1}	0
37,5 mm	m _{ss2}	0	m' _{ss2}	0
20 mm	m _{ss3}	0	m' _{ss3}	0
10 mm	m _{ss4}	0	m' _{ss4}	0
Peneiros com abertura superiores a 0,063 mm				
Abertura dos peneiros (mm)	m _s – Massas retidas (g)		m' _s – Massas retidas ajustadas (g)	
6,3 mm	m _{s1}	0	m' _{s1}	0
2,0 mm	m _{s2}	0,06	m' _{s2}	0,06
0,60 mm	m _{s3}	0,71	m' _{s3}	0,71
0,20 mm	m _{s4}	3,07	m' _{s4}	3,07
0,063 mm	m _{s5}	5,35	m' _{s5}	5,35
m _p – massa do material que passa no peneiro de abertura 0,063 mm (g)				0,48
Fração das partículas que passam em cada peneiro				
Peneiros com abertura superiores a 10 mm				
Abertura dos peneiros (mm)	f _n - fração que passa através do peneiro (%)			
63 mm	f _{63,0} 100			
37,5 mm	f _{37,5} 100			
20 mm	f _{20,0} 100			
10 mm	f _{10,0} 100			
Peneiros com abertura superiores a 0,063 mm				
Abertura dos peneiros (mm)	f _n - fração que passa através do peneiro (%)			
6,3 mm	f _{6,3} 100			
2,0 mm	f _{2,0} 100			
0,60 mm	f _{0,60} 98			
0,20 mm	f _{0,20} 90			
0,063 mm	f _{0,063} 76			

Determinação da distribuição granulométrica (EN ISO 17892-4) - Método da sedimentação										
Referência da amostra				Solo B						
Observações				Agitação mecânica vigorosa - 10 min - Reação 1h30 min Repetição - 2						
Preparação do provete										
m _w - Massa húmida do provete (g)				40,03						
ω - Teor em água (%)		2,99		ρ _s - Massa volúmica das partículas (Mg/m ³)				2,68		
m - Massa seca do provete (g)				38,87						
Execução do ensaio										
R' ₀ - Leitura de referência (g/ml)					0					
t - Tempo (min)	0,5	1	2	4	8	30	60	120	360	1440
Leitura real do densímetro (g/ml)	1,0185	1,0180	1,0175	1,0170	1,0165	1,0145	1,0135	1,0125	1,0110	1,0095
R' _h - leitura observada do densímetro	18,5	18,0	17,5	17,0	16,5	14,5	13,5	12,5	11,0	9,5
T - Temperatura (°C)	20,1				20,3	20,3	20,4	20,6	20,8	
R ₀ - Leitura de referência corrigida para o menisco [R' ₀ +C _m] (g/ml)								0,5		
R _h - Leitura verdadeira do densímetro [R' _h +C _m]	19,0	18,5	18,0	17,5	17,0	15,0	14,0	13,0	11,5	10,0
η - viscosidade dinâmica da água à temperatura do ensaio (mPa.s)	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,995	0,995	0,993	0,989	0,984
ρ _w - massa volúmica do fluido de sedimentação à temperatura de ensaio (Mg/m ³)	0,9982	0,9982	0,9982	0,9982	0,9982	0,9982	0,9982	0,9981	0,9981	0,9981
t - Tempo decorrido desde o início da sedimentação (min)	0,5	1	2	4	8	30	60	120	360	1440
H _r - Profundidade efetiva do densímetro (mm)	128,8	130,9	133,1	135,2	137,3	145,7	150,0	154,2	160,5	166,9
d _i - diâmetro equivalente das partículas (mm)	0,068	0,049	0,035	0,025	0,018	0,009	0,007	0,005	0,003	0,001
R _d - Leitura corrigida do densímetro [R' _h - R ₀]	18,5	18,0	17,5	17,0	16,5	14,5	13,5	12,5	11,0	9,5
K - fração das partículas de dimensão inferior ao diâmetro equivalente (%)	76	74	72	70	68	60	55	51	45	39
f _{2,00} - fração que passa no peneiro de 2 mm no ensaio de peneiração (%)								100		
KC - fração corrigida das partículas de dimensão inferior ao diâmetro equivalente (%)	76	74	72	70	68	60	55	51	45	39

Determinação da distribuição granulométrica (EN ISO 17892-4) - Método da sedimentação				
Referência da amostra		Solo B		
Observações		Peneiração material retido no peneiro de abertura 0,063 mm - Agitação vigorosa - Repetição: 2		
Preparação do provete () seco (X) húmido				
m _w – Massa húmida do provete (g)		40,03		
Teor em água (%)		2,99		
m – Massa seca do provete (g)		38,87		
Separação inicial (peneiro de 10 mm)				
m _r – Massa do material retido no peneiro de 10 mm, após secagem (g)		0		
m _s – Massa do material que passa no peneiro de 10 mm (g)		40,03		
m' _s – Massa reduzida (g)		40,03		
Razão entre massas [m' _s / m _s]		1		
Execução do ensaio				
Peneiros com abertura superiores a 10 mm				
Abertura dos peneiros (mm)	m _{ss} – Massas retidas (g)		m' _{ss} – Massas retidas ajustadas (g)	
63 mm	m _{ss1}	0	m' _{ss1}	0
37,5 mm	m _{ss2}	0	m' _{ss2}	0
20 mm	m _{ss3}	0	m' _{ss3}	0
10 mm	m _{ss4}	0	m' _{ss4}	0
Peneiros com abertura superiores a 0,063 mm				
Abertura dos peneiros (mm)	m _s – Massas retidas (g)		m' _s – Massas retidas ajustadas (g)	
6,3 mm	m _{s1}	0	m' _{s1}	0
2,0 mm	m _{s2}	0,03	m' _{s2}	0,03
0,60 mm	m _{s3}	0,56	m' _{s3}	0,56
0,20 mm	m _{s4}	2,99	m' _{s4}	2,99
0,063 mm	m _{s5}	5,29	m' _{s5}	5,29
m _p – massa do material que passa no peneiro de abertura 0,063 mm (g)				0,13
Fração das partículas que passam em cada peneiro				
Peneiros com abertura superiores a 10 mm				
Abertura dos peneiros (mm)	f _n - fração que passa através do peneiro (%)			
63 mm	f _{63,0} 100			
37,5 mm	f _{37,5} 100			
20 mm	f _{20,0} 100			
10 mm	f _{10,0} 100			
Peneiros com abertura superiores a 0,063 mm				
Abertura dos peneiros (mm)	f _n - fração que passa através do peneiro (%)			
6,3 mm	f _{6,3} 100			
2,0 mm	f _{2,0} 100			
0,60 mm	f _{0,60} 99			
0,20 mm	f _{0,20} 91			
0,063 mm	f _{0,063} 78			

Determinação da distribuição granulométrica (EN ISO 17892-4) - Método da sedimentação										
Referência da amostra				Solo B						
Observações				Agitação mecânica vigorosa - 10 min - Reação 1h30 min Repetição - 3						
Preparação do provete										
m _w - Massa húmida do provete (g)				45,53						
ω - Teor em água (%)		2,75		ρ _s - Massa volúmica das partículas (Mg/m ³)				2,68		
m - Massa seca do provete (g)				44,31						
Execução do ensaio										
R' ₀ - Leitura de referência (g/ml)					0					
t - Tempo (min)	0,5	1	2	4	8	30	60	120	360	1440
Leitura real do densímetro (g/ml)	1,0215	1,0210	1,0205	1,0195	1,0185	1,0165	1,0150	1,0140	1,0125	1,0105
R' _h - leitura observada do densímetro	21,5	21,0	20,5	19,5	18,5	16,5	15,0	14,0	12,5	10,5
T - Temperatura (°C)	21,6				21,6	21,6	21,6	21,6	21,3	22,3
R ₀ - Leitura de referência corrigida para o menisco [R' ₀ +C _m] (g/ml)								0,5		
R _h - Leitura verdadeira do densímetro [R' _h +C _m]	22,0	21,5	21,0	20,0	19,0	17,0	15,5	14,5	13,0	11,0
η - viscosidade dinâmica da água à temperatura do ensaio (mPa.s)	0,966	0,966	0,966	0,966	0,966	0,966	0,966	0,966	0,973	0,951
ρ _w - massa volúmica do fluido de sedimentação à temperatura de ensaio (Mg/m ³)	0,9979	0,9979	0,9979	0,9979	0,9979	0,9979	0,9979	0,9979	0,9980	0,9977
t - Tempo decorrido desde o início da sedimentação (min)	0,5	1	2	4	8	30	60	120	360	1440
H _r - Profundidade efetiva do densímetro (mm)	116,1	118,3	120,4	124,6	128,8	137,3	143,6	147,9	154,2	162,6
d _i - diâmetro equivalente das partículas (mm)	0,064	0,046	0,033	0,023	0,017	0,009	0,006	0,005	0,003	0,001
R _d - Leitura corrigida do densímetro [R' _h - R ₀]	21,5	21,0	20,5	19,5	18,5	16,5	15,0	14,0	12,5	10,5
K - fração das partículas de dimensão inferior ao diâmetro equivalente (%)	77	76	74	70	67	59	54	50	45	38
f _{2,00} - fração que passa no peneiro de 2 mm no ensaio de peneiração (%)								100		
KC - fração corrigida das partículas de dimensão inferior ao diâmetro equivalente (%)	77	76	74	70	67	59	54	50	45	38

Determinação da distribuição granulométrica (EN ISO 17892-4) - Método da sedimentação				
Referência da amostra		Solo B		
Observações		Peneiração material retido no peneiro de abertura 0,063 mm - Agitação vigorosa - Repetição: 3		
Preparação do provete () seco (X) húmido				
mw – Massa húmida do provete (g)		45,53		
Teor em água (%)		2,75		
m – Massa seca do provete (g)		44,31		
Separação inicial (peneiro de 10 mm)				
m _r – Massa do material retido no peneiro de 10 mm, após secagem (g)		0		
m _s – Massa do material que passa no peneiro de 10 mm (g)		45,53		
m' _s – Massa reduzida (g)		45,53		
Razão entre massas [m' _s / m _s]		1		
Execução do ensaio				
Peneiros com abertura superiores a 10 mm				
Abertura dos peneiros (mm)	m _{ss} – Massas retidas (g)		m' _{ss} – Massas retidas ajustadas (g)	
63 mm	m _{ss1}	0	m' _{ss1}	0
37,5 mm	m _{ss2}	0	m' _{ss2}	0
20 mm	m _{ss3}	0	m' _{ss3}	0
10 mm	m _{ss4}	0	m' _{ss4}	0
Peneiros com abertura superiores a 0,063 mm				
Abertura dos peneiros (mm)	m _s – Massas retidas (g)		m' _s – Massas retidas ajustadas (g)	
6,3 mm	m _{s1}	0	m' _{s1}	0
2,0 mm	m _{s2}	0,02	m' _{s2}	0,02
0,60 mm	m _{s3}	0,63	m' _{s3}	0,63
0,20 mm	m _{s4}	3,50	m' _{s4}	3,50
0,063 mm	m _{s5}	5,95	m' _{s5}	5,95
m _p – massa do material que passa no peneiro de abertura 0,063 mm (g)				0,49
Fração das partículas que passam em cada peneiro				
Peneiros com abertura superiores a 20 mm				
Abertura dos peneiros (mm)	f _n - fração que passa através do peneiro (%)			
63 mm	f _{63,0}		100	
37,5 mm	f _{37,5}		100	
20 mm	f _{20,0}		100	
10 mm	f _{10,0}		100	
Peneiros com abertura superiores a 0,063 mm				
Abertura dos peneiros (mm)	f _n - fração que passa através do peneiro (%)			
6,3 mm	f _{6,3}		100	
2,0 mm	f _{2,0}		100	
0,60 mm	f _{0,60}		99	
0,20 mm	f _{0,20}		91	
0,063 mm	f _{0,063}		78	

Agitação suave:

Teor em água (EN ISO 17892-1:2014) – Sedimentação 1	
Referência da cápsula	32
m_c – Massa da cápsula (g)	121,67
m_1 – Massa da cápsula com provete húmido (g)	151,83
m_2 – Massa da cápsula com provete seco (g)	151,44
w – Teor em água (%)	1,31

Teor em água (EN ISO 17892-1:2014) – Sedimentação 2	
Referência da cápsula	27
m_c – Massa da cápsula (g)	121,83
m_1 – Massa da cápsula com provete húmido (g)	152,37
m_2 – Massa da cápsula com provete seco (g)	151,48
w – Teor em água (%)	3,00

Teor em água (EN ISO 17892-1:2014) – Sedimentação 3	
Referência da cápsula	27
m_c – Massa da cápsula (g)	121,83
m_1 – Massa da cápsula com provete húmido (g)	152,54
m_2 – Massa da cápsula com provete seco (g)	151,63
w – Teor em água (%)	3,05

Determinação da distribuição granulométrica (EN ISO 17892-4) - Método da sedimentação											
Referência da amostra			Solo B								
Observações			Agitação magnética suave- 4h - Reação - 1 hora Repetição - 1								
Preparação do provete											
m _w – Massa húmida do provete (g)			32,16								
ω - Teor em água (%)		1,31	ρ _s – Massa volúmica das partículas (Mg/m ³)					2,68			
m – Massa seca do provete (g)			31,74								
Execução do ensaio											
R' ₀ – Leitura de referência (g/ml)					0						
t - Tempo (min)	0,5	1	2	4	8	30	60	120	360	1440	
Leitura real do densímetro (g/ml)	1,0165	1,0160	1,0155	1,0145	1,0140	1,0125	1,0115	1,0105	1,0095	1,0085	
R' _h - leitura observada do densímetro	16,5	16,0	15,5	14,5	14,0	12,5	11,5	10,5	9,5	8,5	
T - Temperatura (°C)	19,8				19,7	19,6	19,6	19,5	19,4		
R ₀ – Leitura de referência corrigida para o menisco [R' ₀ +C _m] (g/ml)								0,5			
R _h - Leitura verdadeira do densímetro [R' _h +C _m]	17,0	16,5	16,0	15,0	14,5	13,0	12,0	11,0	10,0	9,0	
η - viscosidade dinâmica da água à temperatura do ensaio (mPa.s)	1,007	1,007	1,007	1,007	1,007	1,010	1,013	1,013	1,016	1,018	
ρ _w - massa volúmica do fluido de sedimentação à temperatura de ensaio (Mg/m ³)	0,9983	0,9983	0,9983	0,9983	0,9983	0,9983	0,9983	0,9983	0,9983	0,9983	
t - Tempo decorrido desde o início da sedimentação (min)	0,5	1	2	4	8	30	60	120	360	1440	
Hr - Profundidade efetiva do densímetro (mm)	137,1	139,2	141,2	145,4	147,5	153,8	157,9	162,1	166,3	170,4	
d _i - diâmetro equivalente das partículas (mm)	0,071	0,050	0,036	0,026	0,018	0,010	0,007	0,005	0,003	0,001	
R _d - Leitura corrigida do densímetro [R _h - R ₀]	16,5	16,0	15,5	14,5	14,0	12,5	11,5	10,5	9,5	8,5	
Fração das partículas de dimensão inferior ao diâmetro equivalente											
K - fração das partículas de dimensão inferior ao diâmetro equivalente (%)	83	80	78	73	70	63	58	53	48	43	
f _{2,00} - fração que passa no peneiro de 2 mm no ensaio de peneiração (%)								100			
KC - fração corrigida das partículas de dimensão inferior ao diâmetro equivalente (%)	83	80	78	73	70	63	58	53	48	43	

Determinação da distribuição granulométrica (EN ISO 17892-4) - Método da sedimentação				
Referência da amostra		Solo B		
Observações		Peneiração material retido no peneiro de abertura 0,063 mm - Agitação suave - Repetição: 1		
Preparação do provete () seco (X) húmido				
m _w – Massa húmida do provete (g)		32,32		
Teor em água (%)		1,31		
m – Massa seca do provete (g)		31,90		
Separação inicial (peneiro de 10 mm)				
m _r – Massa do material retido no peneiro de 10 mm, após secagem (g)		0		
m _s – Massa do material que passa no peneiro de 10 mm (g)		31,90		
m' _s – Massa reduzida (g)		31,90		
Razão entre massas [m' _s / m _s]		1		
Execução do ensaio				
Peneiros com abertura superiores a 10 mm				
Abertura dos peneiros (mm)	m _{ss} – Massas retidas (g)		m' _{ss} – Massas retidas ajustadas (g)	
63 mm	m _{ss1}	0	m' _{ss1}	0
37,5 mm	m _{ss2}	0	m' _{ss2}	0
20 mm	m _{ss3}	0	m' _{ss3}	0
10 mm	m _{ss4}	0	m' _{ss4}	0
Peneiros com abertura superiores a 0,063 mm				
Abertura dos peneiros (mm)	m _s – Massas retidas (g)		m' _s – Massas retidas ajustadas (g)	
6,3 mm	m _{s1}	0	m' _{s1}	0
2,0 mm	m _{s2}	0,16	m' _{s2}	0,16
0,60 mm	m _{s3}	0,03	m' _{s3}	0,03
0,20 mm	m _{s4}	1,98	m' _{s4}	1,98
0,063 mm	m _{s5}	3,85	m' _{s5}	3,85
m _p – massa do material que passa no peneiro de abertura 0,063 mm (g)				25,88
Fração das partículas que passam em cada peneiro				
Peneiros com abertura superiores a 10 mm				
Abertura dos peneiros (mm)	f _n - fração que passa através do peneiro (%)			
63 mm	f _{63,0} 100			
37,5 mm	f _{37,5} 100			
20 mm	f _{20,0} 100			
10 mm	f _{10,0} 100			
Peneiros com abertura superiores a 0,063 mm				
Abertura dos peneiros (mm)	f _n - fração que passa através do peneiro (%)			
6,3 mm	f _{6,3} 100			
2,0 mm	f _{2,0} 100			
0,60 mm	f _{0,60} 99			
0,20 mm	f _{0,20} 93			
0,063 mm	f _{0,063} 81			

Determinação da distribuição granulométrica (EN ISO 17892-4) - Método da sedimentação										
Referência da amostra			Solo B							
Observações			Agitação magnética suave- 4h - Reação - 1 hora Repetição - 2							
Preparação do provete										
m _w – Massa húmida do provete (g)			32,22							
ω - Teor em água (%)	3,00		ρ _s – Massa volúmica das partículas (Mg/m ³)						2,68	
m – Massa seca do provete (g)			31,28							
Execução do ensaio										
R' ₀ – Leitura de referência (g/ml)					0					
t - Tempo (min)	0,5	1	2	4	8	30	60	120	360	1440
Leitura real do densímetro (g/ml)	1,0165	1,0160	1,0155	1,0150	1,0145	1,0130	1,0120	1,0110	1,0100	1,0085
R' _h - leitura observada do densímetro	16,5	16,0	15,5	15,0	14,5	13,0	12,0	11,0	10,0	8,5
T - Temperatura (°C)	19,7					19,7	19,7	19,6	19,6	19,4
R ₀ – Leitura de referência corrigida para o menisco [R' ₀ +C _m] (g/ml)								0,5		
R _h - Leitura verdadeira do densímetro [R' _h +C _m]	17,0	16,5	16,0	15,5	15,0	13,5	12,5	11,5	10,5	9,0
η - viscosidade dinâmica da água à temperatura do ensaio (mPa.s)	1,010	1,010	1,010	1,010	1,010	1,010	1,010	1,013	1,013	1,018
ρ _w - massa volúmica do fluido de sedimentação à temperatura de ensaio (Mg/m ³)	0,9983	0,9983	0,9983	0,9983	0,9983	0,9983	0,9983	0,9983	0,9983	0,9983
t - Tempo decorrido desde o início da sedimentação (min)	0,5	1	2	4	8	30	60	120	360	1440
H _r - Profundidade efetiva do densímetro (mm)	137,1	139,2	141,2	143,3	145,4	151,7	155,8	160,0	164,2	170,4
d _i - diâmetro equivalente das partículas (mm)	0,071	0,051	0,036	0,026	0,018	0,010	0,007	0,005	0,003	0,001
R _d - Leitura corrigida do densímetro [R _h - R ₀]	16,5	16,0	15,5	15,0	14,5	13,0	12,0	11,0	10,0	8,5
K - fração das partículas de dimensão inferior ao diâmetro equivalente (%)	84	82	79	76	74	66	61	56	51	43
f _{2,00} - fração que passa no peneiro de 2 mm no ensaio de peneiração (%)								100		
KC - fração corrigida das partículas de dimensão inferior ao diâmetro equivalente (%)	84	82	79	76	74	66	61	56	51	43

Determinação da distribuição granulométrica (EN ISO 17892-4) - Método da sedimentação				
Referência da amostra		Solo B		
Observações		Peneiração material retido no peneiro de abertura 0,063 mm - Agitação suave - Repetição: 2		
Preparação do provete () seco (X) húmido				
m _w – Massa húmida do provete (g)		32,32		
Teor em água (%)		3,00		
m – Massa seca do provete (g)		31,38		
Separação inicial (peneiro de 10 mm)				
m _r – Massa do material retido no peneiro de 10 mm, após secagem (g)		0		
m _s – Massa do material que passa no peneiro de 10 mm (g)		32,32		
m' _s – Massa reduzida (g)		32,32		
Razão entre massas [m' _s / m _s]		1		
Execução do ensaio				
Peneiros com abertura superiores a 10 mm				
Abertura dos peneiros (mm)	m _{ss} – Massas retidas (g)		m' _{ss} – Massas retidas ajustadas (g)	
63 mm	m _{ss1}	0	m' _{ss1}	0
37,5 mm	m _{ss2}	0	m' _{ss2}	0
20 mm	m _{ss3}	0	m' _{ss3}	0
10 mm	m _{ss4}	0	m' _{ss4}	0
Peneiros com abertura superiores a 0,063 mm				
Abertura dos peneiros (mm)	m _s – Massas retidas (g)		m' _s – Massas retidas ajustadas (g)	
6,3 mm	m _{s1}	0	m' _{s1}	0
2,0 mm	m _{s2}	0,09	m' _{s2}	0,09
0,60 mm	m _{s3}	0,03	m' _{s3}	0,03
0,20 mm	m _{s4}	2,12	m' _{s4}	2,12
0,063 mm	m _{s5}	3,07	m' _{s5}	3,07
m _p – massa do material que passa no peneiro de abertura 0,063 mm (g)				26,07
Fração das partículas que passam em cada peneiro				
Peneiros com abertura superiores a 10 mm				
Abertura dos peneiros (mm)	f _n - fração que passa através do peneiro (%)			
63 mm	f _{63,0} 100			
37,5 mm	f _{37,5} 100			
20 mm	f _{20,0} 100			
10 mm	f _{10,0} 100			
Peneiros com abertura superiores a 0,063 mm				
Abertura dos peneiros (mm)	f _n - fração que passa através do peneiro (%)			
6,3 mm	f _{6,3} 100			
2,0 mm	f _{2,0} 100			
0,60 mm	f _{0,60} 100			
0,20 mm	f _{0,20} 93			
0,063 mm	f _{0,063} 83			

Determinação da distribuição granulométrica (EN ISO 17892-4) - Método da sedimentação											
Referência da amostra			Solo B								
Observações			Agitação magnética suave- 4h - Reação - 1 hora Repetição - 3								
Preparação do provete											
m _w – Massa húmida do provete (g)			32,51								
ω - Teor em água (%)		3,05	ρ _s – Massa volúmica das partículas (Mg/m ³)					2,68			
m – Massa seca do provete (g)			31,55								
Execução do ensaio											
R' ₀ – Leitura de referência (g/ml)					0						
t - Tempo (min)	0,5	1	2	4	8	30	60	120	360	1440	
Leitura real do densímetro (g/ml)	1,0160	1,0155	1,0150	1,0145	1,0140	1,0125	1,0120	1,0110	1,0100	1,0085	
R' _h - leitura observada do densímetro	16,0	15,5	15,0	14,5	14,0	12,5	12,0	11,0	10,0	8,5	
T - Temperatura (°C)	19,1				19,1	19,1	19,2	19,3	19,1		
R ₀ – Leitura de referência corrigida para o menisco [R' ₀ +C _m] (g/ml)								0,5			
R _h - Leitura verdadeira do densímetro [R' _h +C _m]	16,5	16,0	15,5	15,0	14,5	13,0	12,5	11,5	10,5	9,0	
η - viscosidade dinâmica da água à temperatura do ensaio (mPa.s)	1,026	1,026	1,026	1,026	1,026	1,026	1,026	1,024	1,021	1,026	
ρ _w - massa volúmica do fluido de sedimentação à temperatura de ensaio (Mg/m ³)	0,9984	0,9984	0,9984	0,9984	0,9984	0,9984	0,9984	0,9984	0,9984	0,9984	
t - Tempo decorrido desde o início da sedimentação (min)	0,5	1	2	4	8	30	60	120	360	1440	
Hr - Profundidade efetiva do densímetro (mm)	139,2	141,2	143,3	145,4	147,5	153,8	155,8	160,0	164,2	170,4	
d _i - diâmetro equivalente das partículas (mm)	0,072	0,051	0,037	0,026	0,019	0,010	0,007	0,005	0,003	0,001	
R _d - Leitura corrigida do densímetro [R _h - R ₀]	16,0	15,5	15,0	14,5	14,0	12,5	12,0	11,0	10,0	8,5	
K - fração das partículas de dimensão inferior ao diâmetro equivalente (%)	81	78	76	73	71	63	61	56	51	43	
f _{2,00} - fração que passa no peneiro de 2 mm no ensaio de peneiração (%)								100			
KC - fração corrigida das partículas de dimensão inferior ao diâmetro equivalente (%)	81	78	76	73	71	63	61	56	51	43	

Determinação da distribuição granulométrica (EN ISO 17892-4) - Método da sedimentação				
Referência da amostra		Solo B		
Observações		Peneiração material retido no peneiro de abertura 0,063 mm - Agitação suave - Repetição: 3		
Preparação do provete () seco (X) húmido				
m _w – Massa húmida do provete (g)		32,59		
Teor em água (%)		3,05		
m – Massa seca do provete (g)		31,62		
Separação inicial (peneiro de 10 mm)				
m _r – Massa do material retido no peneiro de 10 mm, após secagem (g)		0		
m _s – Massa do material que passa no peneiro de 10 mm (g)		32,59		
m' _s – Massa reduzida (g)		32,59		
Razão entre massas [m' _s / m _s]		1		
Execução do ensaio				
Peneiros com abertura superiores a 10 mm				
Abertura dos peneiros (mm)	m _{ss} – Massas retidas (g)		m' _{ss} – Massas retidas ajustadas (g)	
63 mm	m _{ss1}	0	m' _{ss1}	0
37,5 mm	m _{ss2}	0	m' _{ss2}	0
20 mm	m _{ss3}	0	m' _{ss3}	0
10 mm	m _{ss4}	0	m' _{ss4}	0
Peneiros com abertura superiores a 0,063 mm				
Abertura dos peneiros (mm)	m _s – Massas retidas (g)		m' _s – Massas retidas ajustadas (g)	
6,3 mm	m _{s1}	0	m' _{s1}	0
2,0 mm	m _{s2}	0,02	m' _{s2}	0,02
0,60 mm	m _{s3}	0,02	m' _{s3}	0,02
0,20 mm	m _{s4}	2,15	m' _{s4}	2,15
0,063 mm	m _{s5}	4,05	m' _{s5}	4,05
m _p – massa do material que passa no peneiro de abertura 0,063 mm (g)				25,38
Fração das partículas que passam em cada peneiro				
Peneiros com abertura superiores a 10 mm				
Abertura dos peneiros (mm)	f _n - fração que passa através do peneiro (%)			
63 mm	f _{63,0} 100			
37,5 mm	f _{37,5} 100			
20 mm	f _{20,0} 100			
10 mm	f _{10,0} 100			
Peneiros com abertura superiores a 0,063 mm				
Abertura dos peneiros (mm)	f _n - fração que passa através do peneiro (%)			
6,3 mm	f _{6,3} 100			
2,0 mm	f _{2,0} 100			
0,60 mm	f _{0,63} 100			
0,20 mm	f _{0,20} 93			
0,063 mm	f _{0,063} 80			