



Instituto Superior de Engenharia do Porto

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA



Estabilização de solos com recurso à 3ª geração de polímeros

Ana Sofia Magalhães Vieira



isep Instituto Superior de
Engenharia do Porto



LGMC
Laboratório de Geotecnia e
Materiais de Construção

P.PORTO

2017

(página propositadamente em branco)



Instituto Superior de Engenharia do Porto

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA

Estabilização de solos com recurso à 3ª geração de polímeros

Ana Sofia Magalhães Vieira

1120227

*Dissertação apresentada 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 do Doutor José Augusto de Abreu Peixoto Fernandes, Professor Coordenador do Departamento de Engenharia Geotécnica do ISEP e co-orientação da Doutora Telma Barroso, R&D Manager, do Grupo GEO - Ground Engineering Operations.*

(página propositadamente em branco)

Júri

Presidente

Doutor Helder Gil Iglésias de Oliveira Chaminé

Professor Coordenador com Agregação, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Doutor José Augusto de Abreu Peixoto Fernandes

Professor Coordenador, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Doutor João Paulo Meixedo dos Santos Silva

Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Mestre Eduardo Nuno Sousa de Azevedo Castro Neves

CICCOPN – Centro de Formação Profissional da Indústria da Construção Civil e Obras Públicas do Norte, Maia

Doutora Telma Godinho Barroso

GEO – Ground Engineering Operations, Lisboa

*A tese de mestrado em engenharia geotécnica e geoambiente (MEGG) foi apresentada e defendida em prova pública, pelo Licenciada Ana Sofia Magalhães Vieira, no Auditório de Geotecnia do Departamento de Engenharia Geotécnica (ISEP) em 15 de Novembro de 2017 mediante o júri nomeado, em que foi atribuída, por unanimidade, a classificação final de **18 (dezoito) valores**, cuja fundamentação se encontra em acta. Todas as correções pontuais determinadas pelo júri, e só essas, foram efectuadas.*

Dedico esta tese às minhas Mães...

(página propositadamente em branco)

Agradecimentos

A presente dissertação só foi possível graças a um longo número de pessoas, como tal segue em baixo o meu agradecimento sincero a todas as pessoas que me ajudaram no decorrer dos últimos meses.

Um grande obrigada ao Professor Doutor José Augusto Fernandes (DEG|ISEP), por me propor este desafio e despende muito do seu tempo na orientação e a retirar dúvidas. Visto que, numa fase inicial o tema não passava de uma incógnita para mim.

À GEO (Ground Engineering Operations) por mais uma vez possibilitar o estudo de um dos seus produtos, bem como a todos os seus colaboradores por me receberem de braços abertos e sempre prontos a ajudar. Um agradecimento especial à Doutora Telma Barroso, por mesmo à distância conseguir orientar-me e ajudar-me sempre que necessário. Bem como o rigor a que me sujeitou para garantir que tudo corria como planeado e a paciência e compreensão quando nem tudo se realizava como o previsto.

Ao Doutor Adriano Teixeira, Diretor Técnico do Laboratório de Geotecnia e Materiais de Construção do CICCOPN, por disponibilizar as suas instalações para realização de ensaios. Um agradecimento especial ao Engenheiro Eduardo Neves, responsável pelo setor de sondagens e prospeção e solos, por se mostrar sempre disponível a ajudar e a orientar-me na realização dos ensaios. Aos restantes membros do laboratório, agradeço a simpatia com que fui recebida todos os dias.

Ao Centro de Estudo de Águas, em especial à Engenheira Rosária Costa, por disponibilizar as instalações e equipamentos para a realização de ensaios.

À Professora Doutora Cristina Delerue-Matos, coordenadora do Grupo de Reação e Análises Químicas (GRAQ) – laboratório associado REQUIMTE, por possibilitar o acesso ao laboratório para a realização de ensaios. Um especial agradecimento à Engenheira Paula Paíga, por ceder algum do seu tempo para me ajudar.

Ao LGMC (Laboratório de Geotecnia e Materiais de Construção) do ISEP, por colocar a meu dispor todos os equipamentos e materiais necessários para a realização dos ensaios laboratoriais. Bem como a toda a ajuda da Engenheira Isilda Costa e do Sr. Carlos Ferreira para a realização dos mesmos.

Ao Departamento de Engenharia Geotécnica e a todos os seus docentes por me prepararem para vida profissional. Bem como a todos os meus colegas de curso por se mostrarem sempre dispostos a ajudar, não só nestes últimos meses mas também ao longo destes cinco anos.

Um grande obrigada a toda a minha família e por todo este esforço realizado durante estes cinco anos e apoio incondicional. Em especial um grande obrigada às minhas Mães, espero um dia conseguir retribuir-vos tudo aquilo que já fizeram por mim.

Por fim, obrigada a todas as outras pessoas que não foram mencionadas, mas que tornaram esta dissertação possível e influenciaram o meu caminho académico.

(página propositadamente em branco)

Palavras-chave

Estabilização de solos, polímero, mecânica dos solos.

Resumo

Atualmente a procura por aplicação de técnicas que não interfiram negativamente no ambiente, é uma prioridade. Como tal, a estabilização de solos não é exceção, por isso, este trabalho reflete o estudo de polímeros para estabilização de paredes de furos, uma aplicação alternativa à bentonite e que não provoca nenhum constrangimento ambiental na região aplicada.

Visto que, a estabilização de solos é influenciada por grande número de fatores, o presente trabalho recorre à realização de diversos ensaios laboratoriais, com vista a caracterizar diferentes ambientes geológicos e verificar o comportamento de um polímero específico em diferentes cenários. Para tal recorreu-se à identificação granulométrica dos materiais, limites de consistência, sedimentação, massa específica, composição química, entre outros.

Com base no estudo realizado foi possível concluir que o polímero desenvolvido pela empresa GEO, tem a capacidade de garantir a estabilização em solos arenosos, sendo que a existência de finos na sua composição interfere com a sua eficácia. Quanto a solos siltosos e argilosos o polímero melhora a capacidade de sedimentação dos mesmos, bem como os limites de consistência, no entanto, não tem a capacidade de interligar as partículas destes solos e, por sua vez, não melhora a estabilização dos mesmos.

Foi também possível verificar que a aplicação de apenas 0,5 gramas de polímero em 1 litro de água traz benefícios significativos tanto para a sedimentação como o equivalente de areia, por esse motivo seria interessante verificar se esta concentração garante a estabilização em solos arenosos, visto que, a aplicação de uma menor concentração de polímero leva à rentabilização económica de todo o processo.

(página propositadamente em branco)

Keywords

Soil stabilization, polymer, soil mechanics.

Abstract

Currently the demand for implementation of techniques that do not interfere negatively in the environment is a priority. As such, the stabilization of soils is no exception; so, this work reflects the study of polymers for stabilization of wall holes, a backup application to bentonite and that does not cause any environmental embarrassment in the region applied.

Since the stabilization of soils is influenced by many factors, the present work refers to the realization of various laboratory tests to characterize different geological environments and verify the behavior of the polymer in different scenarios. To this end, laboratory tests were carried out for the identification of material particle size, consistency limits, sedimentation, density, chemical composition, among others.

Based on the study carried out was possible to conclude that the polymer developed by GEO, could ensure stabilization in sandy soils, being that the existence of fines in its composition interferes with its effectiveness. As the silty and the polymer clay soils improves the ability of sedimentation, as well as the limits of consistency, however, does not have the ability to connect these soil particles and, in turn, not better stabilization.

It was also possible to verify that the application of only 0.5 grams of polymer in 1 liter of water brings significant benefits for both sedimentation and the equivalent of sand, for this reason it would be interesting to see if this concentration ensures the stabilization in sandy soils, since the application of a lower concentration of polymer leads to the cost-effectiveness of the whole process.

(página propositadamente em branco)

Índice

1. Introdução	3
1.1. Enquadramento	3
1.2. Objetivos	4
1.3. Estrutura.....	4
2. Estado de arte.....	7
2.1. Estabilização de solos.....	7
2.1.1. Técnicas de estabilização de solos.....	7
2.2. Técnicas de caracterização de solos.....	8
2.2.1. Análise granulométrica	9
2.2.2. Sedimentação	12
2.2.3. Limites de consistência	13
2.2.4. Teor de água	15
2.2.5. Azul de metileno	16
2.2.6. Massa específica	17
2.2.7. Resistência ao corte direto	17
2.2.8. Permeabilidade.....	19
2.2.9. Condutividade elétrica.....	21
2.2.10. Composição química.....	22
2.3. Paredes moldadas	22
2.4. Estacas.....	26
2.5. Fluídos de estabilização.....	29
2.5.1. Bentonite ou lama bentonítica	30
2.5.2. Polímeros ou lama polimérica	31
2.5.2.1. pH.....	35
2.5.2.2. Viscosidade.....	36
2.5.2.3. Densidade.....	37

2.5.2.4. Teor de areia.....	38
2.5.3. Bentonite vs. Polímero	38
3. Protocolos	43
3.1. Preparação da amostra	43
3.1.1. Procedimento para obtenção das amostras para realização do ensaio de análise granulométrica:....	44
3.1.2. Procedimento para obtenção das amostras para realização dos ensaios de determinação dos limites de consistência:.....	45
3.2. Análise granulométrica por peneiração húmida	46
3.2.1. Procedimento para a análise granulométrica da fração retida no peneiro 2,00 mm (nº 10):	46
3.2.2. Procedimento para a análise granulométrica da fração passada no peneiro 2,00 mm (nº 10):.....	47
3.3. Ensaio de sedimentação	49
3.4. Determinação de limites de consistência.....	50
3.4.1. Determinação do limite de liquidez	50
3.4.2. Determinação do limite de plasticidade	52
3.5. Teor de água	53
3.6. Azul de metileno.....	54
3.7. Massa específica	56
3.8. Resistência ao corte direto	57
3.9. Condutividade elétrica	60
3.10. Análise química quantitativa por espectrometria de fluorescência de raios x equipamento portátil	61
3.11. Ensaio de equivalente de areia.....	62
3.12. pH	66
3.13. Viscosidade de Brookfield	67
4. Apresentação e discussão de resultados	71
4.1. Material de estudo	71
4.2. Análise Granulométrica	74
4.3. Ensaio de sedimentação	76
4.4. Limites de consistência.....	78
4.5. Teor de água	79

4.6.	Azul de metileno	79
4.7.	Massa específica	81
4.8.	Resistência ao corte	82
4.8.1.	PT _X	82
4.8.2.	PT _G	86
4.8.3.	IN ₁	89
4.8.4.	IN ₂	92
4.8.5.	ML _K	95
4.9.	Permeabilidade	98
4.10.	Condutividade elétrica	99
4.11.	Análise química quantitativa	101
4.12.	Equivalente de areia.....	103
4.13.	pH.....	105
4.14.	Viscosidade de Brookfield	106
4.15.	Cenários.....	108
4.15.1.	Areias.....	108
4.15.2.	Siltos e Argilas.....	109
5.	Conclusões.....	113
	Perspetivas futuras	114
6.	Bibliografia.....	117
7.	Anexos	123

(página propositadamente em branco)

Índice de Figuras

Figura 1 – Curva granulométrica (Fonte: Dias, 2016).	10
Figura 2 – Triângulo de <i>Feret</i> : nomes a atribuir aos solos de acordo com a sua curva granulométrica (Fonte: http://www.ebah.com.br/content/ABAAABOpcAE/fundamentos-mecanica-dos-solos?part=5).	11
Figura 3 – Concha de casagrande.	14
Figura 4 – Esquema do aparelho de corte direto (Fonte: Fernandes, 2012).	18
Figura 5 - Fases de execução de uma parede moldada <i>in situ</i> : a) escavação; b) colocação de tubo-junta; c) colocação da armadura; d) betonagem; e) extração de tubo-junta (Fonte: Pinto, 2008).	24
Figura 6 - Ferramentas de corte para execução de paredes moldadas: a) balde de maxilas; b) hidrofesa c) trépano (Fonte: http://construironline.dashofer.pt/?s=modulos&v=capitulo&c=387).	25
Figura 7 - Sequência de execução de uma estaca com lama bentonítica (Fonte: Meireles e Martins, 2006).....	28
Figura 8 – Ação dos fluídos de estabilização (Fonte: Pinto, 2008).	29
Figura 9 - Lama bentonítica: a) em repouso; b) agitada (Fonte: Federation of Piling Specialists, 2006).....	31
Figura 10 – Formação da película impermeável com a utilização da bentonite (Fonte: Pinto, 2008).....	31
Figura 11 – Interação solo-polímero (Fonte: Trindade, 2010).....	33
Figura 12 – Aplicação do polímero - a) areia sem polímero; b) areia com polímero (Fonte: http://www.polypavement.com/).	34
Figura 13 – Cone de Marsh (Fonte: http://boxminsas.com/equipos-de-medicion/).	36
Figura 14 – Balança de Baroid (Fonte: http://proetisa.com/proetisa-productos.php?ID=212).	37
Figura 15 – Concha de Casagrande.	51
Figura 16 – Auréola azul permanente no ensaio de azul de metileno (Fonte: Dias, 2016).	56
Figura 17 – Máquina de resistência ao corte.....	58
Figura 18 – Medidor de condutividade elétrica.....	61
Figura 19 – Câmara de suporte e analisador por fluorescência de raios X.....	62
Figura 20 – Curvas granulométricas dos solos.....	76
Figura 21 – Valores do densímetro corrigidos em relação com o tempo para os solos com e sem polímero.	77
Figura 22 – Interação do azul de metileno com a solução solo-polímero – a) PT _x + Polímero 0,5/1; b) PT _G + Polímero 1,5/1.....	80

Figura 23 - Tensão de corte no plano de acordo com o deslocamento para a amostra PT _x	84
Figura 24 - Valores da tensão de corte máxima obtidos em cada provete.....	85
Figura 25 - Tensão de corte no plano de acordo com o deslocamento para a amostra PT _G	87
Figura 26 - Valores da tensão de corte máxima obtidos em cada provete.....	88
Figura 27 - Tensão de corte no plano de acordo com o deslocamento para a amostra IN ₁	90
Figura 28 - Valores da tensão de corte máxima obtidos em cada provete.....	91
Figura 29 - Tensão de corte no plano de acordo com o deslocamento para a amostra IN ₂	93
Figura 30 - Valores da tensão de corte máxima obtidos em cada provete.....	94
Figura 31 - Tensão de corte no plano de acordo com o deslocamento para a amostra ML _k	96
Figura 32 - Valores da tensão de corte máxima obtidos em cada provete.....	97
Figura 33 – Valores de condutividade elétrica obtidos em cada solo.....	101
Figura 34 – Concentração relativa de óxidos no solo PT _x e no solo PT _x com adição de polímero.....	102
Figura 35 – Gráficos de valores obtidos no ensaio de equivalente de areia para cada solo.	105
Figura 36 – Valores obtidos na viscosidade de Brookfield.....	107

Índice de Quadros

Quadro 1 - Técnicas de estabilização de solos. (Adaptado de Coelho, 1996; Soliz, 2007; Cruz e Jalali, 2010; Fernandes, 2012; Welling 2012; Crispim, 2015; Mendonça 2016 e SPFE, 2017).....	8
Quadro 2 - Designação do solo de acordo com o tamanho das partículas (Adaptado de Verruijt, 2001).	10
Quadro 3 – Comportamento dos solos com a variação do teor de água (Fonte: Sousa, 2011).	13
Quadro 4 – Valores padrão de limites de consistência para grupos de minerais argilosos (Adaptado de Mitchell & Soga, 2005).	14
Quadro 5 – Classificação de Atterberg com base no comportamento plástico dos solos (Fonte: Sousa, 2011)....	15
Quadro 6 – Valores médios de peso volúmico seco e teor de água ótimo e diferentes tipos de solo (Fonte: Ribeiro, 2008).....	16
Quadro 7 – Valores indicativos de ângulo de atrito para solos granulares (Adaptado de Fernandes, 2012).	18
Quadro 8 – Correlação entre o ângulo de atrito e o índice de plasticidade das argilas (Adaptado de Kenney, 1959).	19
Quadro 9 – Equações empíricas para obtenção da permeabilidade (Adaptado de Dias, 2016).	20
Quadro 10 – Coeficiente de permeabilidade de vários solos (Adaptado de Coelho, 1996).	21
Quadro 11 - Vantagens e desvantagens da aplicação da técnica paredes moldadas (Adaptado: Mil-Homens, 2012 e Mendonça, 2016).	26
Quadro 12 - Vantagens e desvantagens da aplicação da técnica de fundações profundas - Estacas (Adaptado: Coelho, 1996 e Aldeias, 2011).....	28
Quadro 13 – Características dos fluídos de estabilização (Adaptado de Coelho, 1996 e Trindade, 2010).	30
Quadro 14 – Tipos de polímeros e suas aplicações (Adaptado: Trindade, 2010 e Shiroma, 2012).....	32
Quadro 15 – Vantagens e desvantagens da aplicação de polímero como fluído estabilizador.	33
Quadro 16 – Propriedades da lama polimérica quando aplicada (Fonte: GEO, 2017).	35
Quadro 17 – Classificação dos solos em função do pH (Fonte: Batista, 2006).	36
Quadro 18 – Comparação do polímero com a bentonite (Adaptado de Trindade, 2010; Mil-Homens, 2012; Rattichieri, 2015 e Polymer Drilling Systems,s.d.).	39
Quadro 19 – Peso das amostras para realização do ensaio de análise granulométrica de acordo com o tipo de solo e diâmetro nominal das maiores partículas (Adaptado de E 195-1966, 1966).	44

Quadro 20 – Tamanho das amostras para realização dos ensaios de limite de liquidez e plasticidade (Adaptado de E 195-1966, 1966).....	44
Quadro 21 – Tempo mínimo necessário de repouso após a colocação de água de acordo com o tipo de solo (Fonte: ASTM D3080, 1998).	58
Quadro 22 – Tempo mínimo necessário de consolidação de acordo com o tipo de solo (Fonte: ASTM D3080, 1998).	59
Quadro 23 – Características dos solos em estudo (Adaptado de Dias, 2016).....	72
Quadro 24 – Percentagem de material de cada solo estudado.....	75
Quadro 25 – Classificação de solos e coeficientes de uniformidade e curvatura.	76
Quadro 26 – Limite de liquidez (LL) e limites de plasticidade (LP) obtidos.....	79
Quadro 27 – Teor em água de cada amostra.....	79
Quadro 28 – Massa específica de cada amostra.....	81
Quadro 29 – Parâmetros de resistência obtidos a partir do ensaio de resistência ao corte.	86
Quadro 30 - Parâmetros de resistência obtidos a partir do ensaio de resistência ao corte.....	89
Quadro 31 - Parâmetros de resistência obtidos a partir do ensaio de resistência ao corte.....	92
Quadro 32 - Parâmetros de resistência obtidos a partir do ensaio de resistência ao corte.....	95
Quadro 33 - Parâmetros de resistência obtidos a partir do ensaio de resistência ao corte.....	98
Quadro 34 – Valores de permeabilidade obtidos de acordo com métodos empíricos.	98
Quadro 35 – Valores de condutividade elétrica obtidos em cada solo.	100
Quadro 36 - Valores de equivalente de areia obtidos em cada solo.	104
Quadro 37 - Valores de pH obtidos em cada solo.....	106
Quadro 38 – Valores obtidos na viscosidade de Brookfield.....	107
Quadro 39 – Vantagens e desvantagens de aplicar o PolyMud® em areias.	109
Quadro 40 – Vantagens e desvantagens de aplicar o PolyMud® em siltes e argilas.	110

Índice de equações

Equação 1 – Coeficiente de uniformidade (Fonte: Fernandes, 2012).	11
Equação 2 – Coeficiente de curvatura (Fonte: Fernandes, 2012).	11
Equação 3 – Lei de Stokes (Fonte: Gonçalves et al., 2014).	12
Equação 4 – Teor de água (Fonte: NP-84, 1965).	15
Equação 5 – Densidade (Fonte: Santos, 2012).	37
Equação 6 – Percentagem de material grosso (Fonte: E 239-1970).	48
Equação 7 – Percentagem de material fino (Fonte: E 239-1970).	48
Equação 8 – Massa total da amostra (Fonte: E 239-1970).	48
Equação 9 – Percentagem de material retida em cada peneiro (Fonte: E 239-1970).	48
Equação 10 – Percentagem acumulada do material que passa em cada peneiro (Fonte: E 239-1970).	48
Equação 11 – Leitura do densímetro corrigida (Fonte: LNEC E 196-1966).	50
Equação 12 – Teor de água (Fonte: NP-84, 1965).	54
Equação 13 – Tensão de corte que atua no solo (Fonte: ASTM D3080, 1998).	60
Equação 14 – Tensão normal aplicada no solo (Fonte: ASTM D3080, 1998).	60
Equação 15 – Equivalente de areia (Fonte: E 199-1967).	65
Equação 16 – Equivalente de areia visual (Fonte: E 199-1967).	66

Índice de anexos

Anexo I

Anexo II – Ensaios – Análise granulométrica (ver CD)

Anexo III – Ensaios – Curva granulométrica (ver CD)

Anexo IV – Ensaios – Ensaio de sedimentação (ver CD)

Anexo V – Ensaios – Ensaio sedimentação - Polímero (ver CD)

Anexo VI – Ensaios – Limites de consistência (ver CD)

Anexo VII – Ensaios – Teor de água (ver CD)

Anexo VIII – Ensaios – Azul de metileno (ver CD)

Anexo IX

Anexo X – Ensaios – Massa específica (ver CD)

Anexo XI – Resistência ao corte - PTX (ver CD)

Anexo XII – Resistência ao corte - PTX + Polímero (ver CD)

Anexo XIII – Resistência ao corte – PTG (ver CD)

Anexo XIV – Resistência ao corte – PTG + Polímero (ver CD)

Anexo XV – Resistência ao corte – IN1 (ver CD)

Anexo XVI – Resistência ao corte – IN1 + Polímero (ver CD)

Anexo XVII – Resistência ao corte – IN2 (ver CD)

Anexo XVIII – Resistência ao corte – IN2 + Polímero (ver CD)

Anexo XIX – Resistência ao corte – MLK (ver CD)

Anexo XX – Resistência ao corte – MLK + Polímero (ver CD)

Anexo XXI – Ensaios – Condutividade elétrica (ver CD)

Anexo XXII – Ensaios – Análise química (ver CD)

Anexo XXIII

Anexo XXIV – Ensaios – Equivalente de areia (ver CD)

Anexo XXV – Ensaios – pH (ver CD)

Anexo XXVI – Ensaios – Viscosidade de Brookfield (ver CD)

Índice de abreviaturas

0,5/1 – Rácio de polímero utilizado. 0,5 g de polímero para 1 litro de água destilada.

1/1 – Rácio de polímero utilizado. 1 g de polímero para 1 litro de água destilada.

1,5/1 – Rácio de polímero utilizado. 1,5 g de polímero para 1 litro de água destilada.

ASTM – American Society for Testing and Materials.

CC – Coeficiente de curvatura.

CMC – Polímero à base de carboximetilcelulose.

CU – Coeficiente de uniformidade.

IP – Índice de Plasticidade.

LGMC – Laboratório de Geotecnia e Materiais de Construção.

LL – Limite de Liquidez.

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

LP – Limite de Plasticidade.

P – Polímero.

PAM – Polímero à base de poliacrilamida.

r.p.m. – Rotações por minuto.

(página propositadamente em branco)

1 - Introdução

(página propositadamente em branco)

1. Introdução

O presente trabalho enquadra-se no âmbito da unidade curricular “Dissertação/Estágio/Projeto” que se integra no segundo ano do curso de mestrado em Engenharia Geotécnica e Geoambiente, com duração anual, do Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP), do Politécnico do Porto.

Este projeto foi realizado em parceria com a empresa GEO - Ground Engineering Operations para estudo do comportamento do seu principal produto, PolyMud, que corresponde ao componente base do sistema G3®.

Este trabalho, surge assim na sequência do estudo realizado por Dias (2016), intitulado de *“Caracterização de diferentes solos e análise prospetiva com vista à respectiva estabilização”*, que se baseou no estudo de amostras de solo. O presente estudo tem como base as mesmas amostras, porém, agora contempla a adição do referido polímero aos solos ensaiados e o respetivo comportamento quando misturados.

1.1. Enquadramento

Desde cedo o solo representa um objeto de estudo, tanto para engenheiros geotécnicos, engenheiros civis, geólogos, engenheiros agrónomos, entre outros. Porém cada um analisa diferentes características e propriedades do solo para o fim aplicável (Barison, et al., 2015).

Uma preocupação inicial tanto dos engenheiros geotécnicos, mas também da engenharia civil foi garantir a estabilização dos solos. Atualmente, existem várias técnicas de estabilização de solos, porém esta dissertação concentra-se no estudo de apenas uma das técnicas, a aplicação de um polímero sintético como alternativa à bentonite.

Esta técnica é aplicada a nível mundial pela empresa GEO (Ground Engineering Operations) com a finalidade de estabilizar as paredes de furos tanto para a realização de estacas como paredes moldadas.

Sendo assim, este trabalho tem como finalidade analisar diferentes tipos de solo para verificar qual o comportamento do polímero face a diferentes ambientes geológicos.

1.2. Objetivos

A presente dissertação tem como principal objetivo a previsão de cenários geológico-geotécnicos com base em caracterizações geológicas, mecânicas, geotécnicas e químicas de diferentes tipos de solo, em contexto de obra, nomeadamente na estabilização de solos no âmbito de preparação de estacas e paredes moldadas.

1.3. Estrutura

O presente trabalho encontra-se dividido em seis capítulos, sendo que cada um remete ao seguinte:

- Capítulo 1 – Enquadramento do tema, objetivos a que o trabalho se propõe, bem como o modo de organização do mesmo;
- Capítulo 2 – Exposição de toda a pesquisa bibliográfica realizada de acordo com o tema, bem como breve apresentação dos ensaios laboratoriais a realizar;
- Capítulo 3 – Protocolos de todos os ensaios realizados, com vista a auxiliar a realização dos mesmos;
- Capítulo 4 – Descrição de todo o material e solos utilizados nos ensaios laboratoriais;
- Capítulo 5 – Apresentação e discussão de todos os resultados obtidos nos ensaios laboratoriais realizados;
- Capítulo 6 – Conclusões obtidas na comparação dos dados obtidos para diferentes solos ensaiados, bem como para diferentes concentrações de polímero implementadas.

2 – Estado de Arte

(página propositadamente em branco)

2. Estado de arte

2.1. Estabilização de solos

O progresso da tecnologia levou à evolução das construções e obras da engenharia, tornando-as cada vez mais exigentes. No entanto, o solo pode ser um grande entrave na realização das obras, sendo cada vez mais comum a aplicação de técnicas de estabilização de solos para melhorar as suas características.

A estabilização de solos consiste na aplicação de métodos que visam a alteração das características intrínsecas do solo, melhorando assim o seu comportamento (Mendonça, 2016). Para alteração das propriedades dos solos pode-se optar por meios mecânicos, físicos ou químicos que, segundo Medina e Motta (2005) têm como principais finalidades:

- Aumentar a resistência do solo;
- Aumentar ou diminuir a permeabilidade, de acordo com o objetivo da obra;
- Reduzir a compressibilidade do solo.

2.1.1. Técnicas de estabilização de solos

Devido à diversidade de métodos existem várias soluções para o mesmo tipo de solo, sendo que um dos maiores desafios na área da estabilização de solos é verificar consoante os objetivos, qual a técnica que irá apresentar melhores resultados.

Como já foi referido, os métodos de estabilização variam de mecânicos, físicos a químicos. Assim, apresentam-se no Quadro 1 algumas das técnicas aplicáveis para cada caso.

No que toca à estabilização mecânica, esta baseia-se na compactação de materiais arenosos ou de granulometria superior a areias e na consolidação, que se aplica em areias com percentagem de finos superior a 12%, como areias siltosas, argilosas ou argilo-siltosas e em materiais finos com percentagem de passados no peneiro #200 superior a 50%, ou seja, terrenos argilosos e siltosos (Almeida, 2005). *“A compactação tem como finalidade a diminuição do índice de vazios, aumentando a densidade do solo para melhorar a resistência mecânica do mesmo”* (Soliz, 2007). Enquanto, a consolidação – consolidação dinâmica, precarga, sobrecarga, entre outros -

normalmente aplicada em materiais argilosos ou siltosos, tem como principal objetivo acelerar os assentamentos, tanto primários como secundários, aumentar a coesão do solo e diminuir a sua deformabilidade (Fernandes, 2012).

Quadro 1 - Técnicas de estabilização de solos. (Adaptado de Coelho, 1996; Soliz, 2007; Cruz e Jalali, 2010; Fernandes, 2012; Welling 2012; Crispim, 2015; Mendonça 2016 e SPFE, 2017).

Mecânica	Física	Química
<ul style="list-style-type: none"> • Compactação; • Compactação com explosivos; • Compactação dinâmica; • Vibrocompactação; • Precarga; • Sobrecarga; • Drenos; • Consolidação dinâmica. 	<ul style="list-style-type: none"> • Eletro-osmose; • Aquecimento; • Congelação; • Método de vácuo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Soil mixing; • Jet grouting; • Tratamentos químicos: <ul style="list-style-type: none"> • Com cimento; • Com betume; • Com cal; • Com sal (cloreto de sódio ou cálcio); • Com polímeros sintéticos ou naturais. • Injeções.

A estabilização física tem como finalidade a melhoria das características estruturais e da drenagem do solo, recorrendo a tratamentos térmicos, elétricos e eletro-osmose.

Por fim, e segundo Santos *et al.* (1995) *“a estabilização química consiste na adição de uma determinada substância química ao solo, de modo a provocar mudanças que venham a influenciar as propriedades de resistência mecânica, permeabilidade e deformabilidade deste”*. Todavia, é importante salientar que a técnica sobre a qual este trabalho se debruça é a adição de polímeros, isto é, uma técnica de estabilização química, que será caracterizada no *tópico 2.5.2.* do presente trabalho, mas numa vertente de fluído de estabilização para a realização de escavação e perfuração.

2.2. Técnicas de caracterização de solos

Segundo Fernandes (2012) *“Os solos são constituídos por três fases (sólida, líquida e gasosa) e existe um determinado número de grandezas necessárias para descrever o seu estado físico”*.

Algumas destas grandezas são: o índice de vazios, o teor de água e o peso volúmico (State Materials Office, 2009 e Cunha, 2014).

Este tópico tem como principal objetivo caracterizar as principais grandezas, bem como algumas propriedades dos solos, com vista a abranger cada tema abordado, para proceder ao estudo e à caracterização dos maciços terrosos a aplicar no presente trabalho.

2.2.1. Análise granulométrica

“A composição granulométrica e os limites de Atterberg constituem as chamadas características de identificação do solo, usualmente consideradas as propriedades mais básicas do solo e, que por isso, devem ser sempre determinadas antes de quaisquer outras” (Fernandes, 2012). Os limites de Atterberg ou limites de consistência serão abordados no tópico 2.2.3..

“A análise granulométrica serve para definir a composição granulométrica de um solo, ou seja, determinar a distribuição, em percentagem, do peso total das partículas de uma amostra de um solo, de acordo com as suas dimensões” (Santana & Rodrigues, 2005).

Para partículas superiores a 0,075 mm, a análise granulométrica é normalmente obtida a partir da peneiração, enquanto para solos com partículas de menor diâmetro que o valor anteriormente referido, como siltes e argilas, realiza-se a sedimentação. Porém, *“em solos arenosos a peneiração é geralmente efetuada com o solo seco, enquanto em solos com maior fração argilosa é realizada por via húmida”* (Santana & Rodrigues, 2005). Após realização de um destes ensaios, a granulometria do solo é representada numa curva granulométrica, tal como a representada na Figura 1, onde o eixo das ordenadas indica a percentagem de partículas passadas e as abcissas, o respetivo diâmetro das partículas, em milímetros.

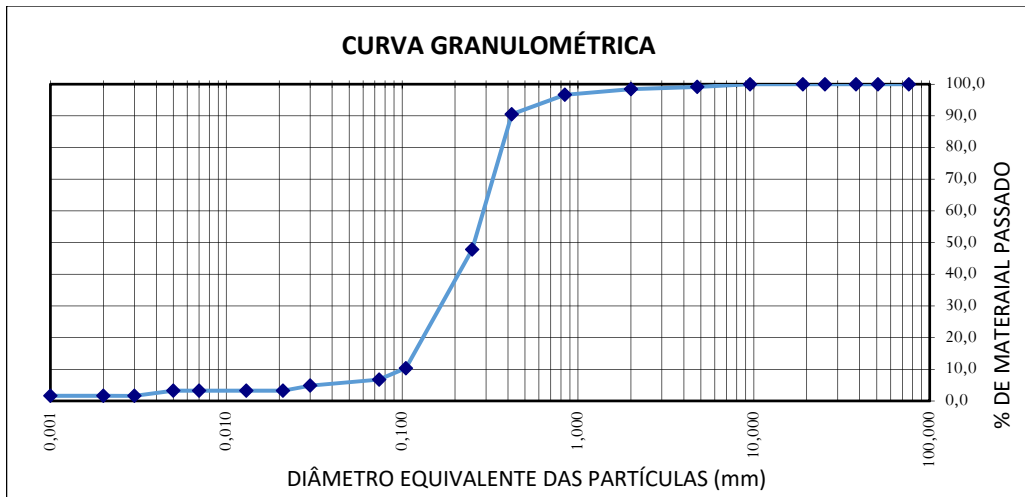


Figura 1 – Curva granulométrica (Fonte: Dias, 2016).

De acordo com o diâmetro que as partículas apresentam é possível identificar o solo em estudo. Tendo como base a informação indicada no Quadro 2, para a curva granulométrica representada na Figura 1, é possível identificar que estamos perante um solo arenoso.

Quadro 2 - Designação do solo de acordo com o tamanho das partículas (Adaptado de Verruijt, 2001).

Designação	Diâmetro (mm)
Cascalho	2,00 -60,00
Areia	0,06 – 2,00
Silte	0,002 – 0,06
Argila	<0,002

Para ajudar na escolha da denominação correta do solo após a representação da curva granulométrica, também é útil a utilização do gráfico da Figura 2, designado de triângulo de *Feret* (Coutinho, 1999).

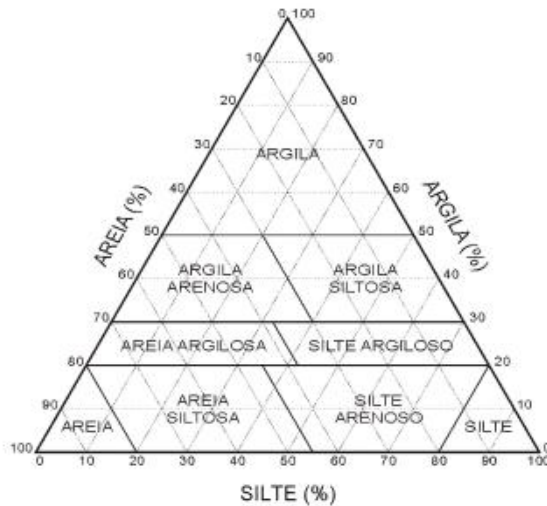


Figura 2 – Triângulo de *Feret*: nomes a atribuir aos solos de acordo com a sua curva granulométrica (Fonte: <http://www.ebah.com.br/content/ABAAABOpCAE/fundamentos-mecanica-dos-solos?part=5>).

Realizada a curva granulométrica é possível obter três grandezas, o diâmetro efetivo (D_{10} , D_{30} e D_{60}), o coeficiente de uniformidade (C_U) e o coeficiente de curvatura (C_C). As duas últimas podem determinar-se através da Equação 1 e 2, respectivamente. O C_U é vantajoso para identificar rapidamente a variedade de dimensões de partículas que o solo apresenta, ou seja, quanto maior o coeficiente de uniformidade, maior a variedade de partículas, o que indica que o solo é bem graduado. Por outro lado, um C_U baixo, indica que o solo é mal graduado.

Equação 1 – Coeficiente de uniformidade (Fonte: Fernandes, 2012).

$$C_U = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

Equação 2 – Coeficiente de curvatura (Fonte: Fernandes, 2012).

$$C_C = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$$

Onde:

C_U – Coeficiente de uniformidade;

D_{60} – Diâmetro em que passa 60% das partículas do solo (mm);

D_{10} – Diâmetro em que passa 10% das partículas do solo (mm);

C_C – Coeficiente de curvatura;

D_{30} – Diâmetro em que passa 30% das partículas do solo (mm).

Quanto ao coeficiente de curvatura, “*está relacionado com a forma da curva granulométrica entre D_{60} e D_{10} , se ela consagrar uma equilibrada representação dos diâmetros intermédios, C_c estará compreendido entre valores da ordem de 1 a 3 e o solo será considerado bem graduado*” (Fernandes, 2012).

Após obtenção da análise granulométrica e dos limites de consistência é habitual recorrer a classificações de solos, para que a identificação do solo seja realizado com maior pormenor. Sendo que, as classificações mais comuns são a AASHTO e a classificação unificada (Almeida, 2005 e Machado, 2016).

2.2.2. Sedimentação

Como foi referido anteriormente, com a realização deste ensaio é possível obter características de identificação do solo. As partículas do solo com diâmetro inferior a 0,075 mm, isto é, partículas que passam no último peneiro do ensaio de análise granulométrica, são sujeitas a sedimentação, que devido à diferença de densidades entre as partículas, ao fim de um certo período de tempo (24 horas) é possível medir a quantidade de material que já depositou. A partir da Equação 3 é possível obter a velocidade de sedimentação das partículas (Dias, 2004; Gonçalves *et al.*, 2014 e Laboratório de Mecânica dos Solos, 2017).

Equação 3 – Lei de Stokes (Fonte: Gonçalves *et al.*, 2014).

$$v = \frac{g}{18} \times \frac{\gamma_s - \gamma_w}{\eta} \times D^2$$

onde:

v – Velocidade de sedimentação de uma partícula (m/s);

D - Diâmetro da partícula esférica (m);

η - Viscosidade do fluído (a 20°C) (N·s/m²);

g - Aceleração da gravidade (m/s²);

γ_s - Peso Volúmico das partículas sólidas (N/m³);

γ_w - Peso Volúmico da Água (N/m³).

É importante que neste ensaio as partículas que constituem o solo estejam desfloculadas, caso contrário, trará erros à distribuição granulométrica, sendo a forma mais comum de desflocular as partículas a aplicação de produtos químicos antifloculantes como decapolfosfato de sódio,

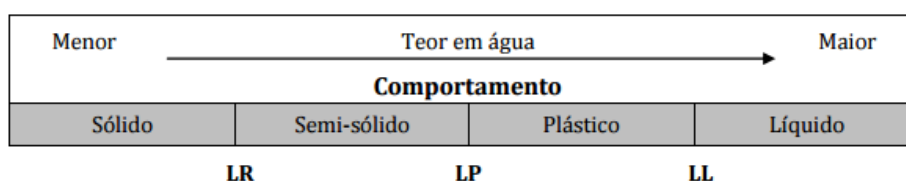
tripolifosfato de sódio e tetrapolifosfato de sódio (E 196-1966, 1966). Outro pormenor importante deste ensaio é que a lei de *Stokes* é aplicada a partículas esféricas, o que muitas vezes, especialmente nas partículas de menores dimensões, não se verifica. Para este caso, o que é determinado com a aplicação da sedimentação é o diâmetro equivalente das partículas, ou seja, “o diâmetro de uma esfera do mesmo material que a partícula e que sedimenta com a mesma velocidade desta” (Santana e Rodrigues, 2005).

Quanto ao ensaio de sedimentação, Santana e Rodrigues (2005) também salientam que corresponde a um método moroso e que acarreta erros apreciáveis. Como tal, é de considerar a aplicação de aparelhos que por meio da utilização de raios laser permitem adquirir a composição granulométrica da fração fina de forma muitíssimo mais rápida.

2.2.3. Limites de consistência

Os limites de consistência, também conhecidos por limites de Atterberg, correspondem à obtenção de três limites, liquidez, plasticidade e retração, porém apenas os dois primeiros irão ser abordados na presente dissertação (Jaramillo *et al*, 2008; Gorski, 2010 e Susianti-Kubik 2010). A partir do Quadro 3 é possível averiguar que o teor de água presente no solo influencia o seu comportamento, como tal, o limite de liquidez (LL ou WL) indica o teor de água a partir do qual o solo começa a ter um comportamento líquido. Enquanto o limite de plasticidade (LP ou WP) indica o teor de água a partir do qual o solo apresenta um comportamento plástico.

Quadro 3 – Comportamento dos solos com a variação do teor de água (Fonte: Sousa, 2011).



Para obter os valores do limite de liquidez do solo recorre-se à concha Casagrande, que como é possível constatar na Figura 3, diz respeito a uma concha semiesférica que durante o ensaio é deixada cair repetidamente de uma altura de 10 mm, com o objetivo de fechar um sulco previamente realizado no solo a ensaiar. Conforme a concha é deixada cair “o sulco aberto fechar-se-á e quando a parte inferior das duas metades se tocar, em pelo menos 1 cm, o ensaio termina com a anotação do número de golpes e é recolhida uma porção de solo na zona de contacto para determinação do teor de água” (Sousa, 2011).



Figura 3 – Concha de casagrande.

A principal desvantagem da aplicação deste ensaio é o facto de só ser aplicável a solos argilosos ou siltosos, logo, para solos arenosos assume-se que o seu limite de liquidez, tal como o de plasticidade, são nulos (Sousa, 2011).

Quanto ao limite de plasticidade, o teor de água é obtido na realização de rolos de 3 mm de diâmetro e caso o rolo apresente fissuras ou se parta com diâmetro inferior a 3 mm, o ensaio tem de ser recomeçado com um menor teor de água. Por outro lado, se o rolo se partir com um diâmetro superior a 3mm indica que o teor de água tem de ser superior e o ensaio tem de ser novamente executado com o ajuste de água (Torgal & Jalali, 2009). O Quadro 4 indica valores padrão de percentagem de teor de água para diferentes materiais argilosos.

Quadro 4 – Valores padrão de limites de consistência para grupos de mineras argilosos (Adaptado de Mitchell & Soga, 2005).

	Limite de liquidez (%)	Limite de plasticidade (%)
Montmorilonite	100-900	50-100
Illite	60-120	35-60
Caulinite	30-110	25-40
Clorite	44-47	36-40

Após a obtenção dos dois limites é comum obter o índice de plasticidade que consiste na subtração dos mesmos, isto é, a diferença entre o limite de liquidez e o limite de plasticidade. Tendo em conta o valor obtido e com base nos valores de referência apresentados no Quadro 5, é possível adquirir uma noção do grau de plasticidade do solo em estudo.

Quadro 5 – Classificação de Atterberg com base no comportamento plástico dos solos (Fonte: Sousa, 2011).

Índice de Plasticidade	Plasticidade
0 - 1	Solo não plástico
1 – 7	Solo de baixa plasticidade
7 – 15	Solo de média plasticidade
> 15	Solo de elevada plasticidade

2.2.4. Teor de água

“A quantidade de água presente no solo pode interferir nas suas propriedades físicas, tais como a resistência à penetração e ao cisalhamento, a consistência e em alguns processos químicos e bioquímicos que nele ocorrem” (Bianchini *et al.*, 2009).

Para determinar o teor de água em laboratório utiliza-se o método de infravermelhos (Quintino *et al.*, 2015) ou estufa (NP-84, 1965), sendo que o último referido será o ensaio aplicado e consiste em pesar uma amostra de solo antes e depois do processo de secagem na estufa. Após a obtenção do peso seco do solo (W_s) e do peso inicial do solo (W_s+W_w), obtém-se o peso da água e com recurso à Equação 4 calcula-se o teor de água do solo.

Equação 4 – Teor de água (Fonte: NP-84, 1965).

$$w (\%) = \frac{W_w}{W_s} \times 100$$

Onde:

w – Teor de água (%);

W_w - Peso da água (g);

W_s - Peso seco do solo (g).

Comparativamente à secagem com infravermelhos, o uso da estufa apresenta a desvantagem de ser necessário o solo permanecer na estufa por 24 horas, enquanto a secagem por infravermelhos é extremamente mais rápida e dura cerca de 30 minutos.

O Quadro 6 indica valores médios tanto para o teor ótimo de água como para o peso volúmico seco máximo, tendo em conta o tipo de solo identificado na classificação unificada. Se na realização de ensaios os valores obtidos se afastarem bastante destes valores padrão é recomendável a repetição do mesmo.

Quadro 6 – Valores médios de peso volúmico seco e teor de água ótimo e diferentes tipos de solo (Fonte: Ribeiro, 2008).

Classificação Unificada de Solos	Designação	γ_d (KN/m ³)	W_{opt} (%)
SW	Cascalho bem graduado	22	7
SC	Areia argilosa	19	12
SP	Areia mal graduada	18	15
CL	Argila magra	18	15
ML	Silte	17	17
CH	Argila gorda	15	25

2.2.5. Azul de metileno

O ensaio de adsorção de azul de metileno “consiste na permuta iónica entre os catiões existentes na superfície das partículas, como por exemplo os catiões de cálcio, sódio, magnésio e potássio, e os catiões resultantes da dissociação da molécula de azul de metileno em solução aquosa. Em consequência desta troca catiónica forma-se à volta da partícula uma camada monomolecular de azul de metileno” (Branco, 1996). Esta camada permite estimar a superfície específica e a plasticidade do solo, sendo possível constatar que quanto maior a quantidade de azul metileno aplicado no solo, maior serão as duas propriedades mencionadas. Porém este ensaio apresenta outras aplicações:

- Determinar a capacidade de troca catiónica dos minerais argilosos (Hang e Brindley, 1970);

-
- Verificar concentração de bentonite existente em lama de perfuração (Caenn *et al.*, 2014);
 - Avaliar o estado de alteração das rochas, bem como a sua capacidade de expansibilidade (Stapel & Verhoef, 1989);
 - Caracterizar solos quanto à presença de argila nos mesmos (Yukselen & Kaya, 2008);
 - Método de limpeza dos agregados (tendo em conta a sua aplicação, a presença de finos argilosos pode interferir no seu comportamento) (Castelo Branco *et al.*, 1997).

2.2.6. Massa específica

A massa específica ou o *“peso volúmico das partículas sólidas de um solo é o peso das partículas que ocupariam a unidade de volume, depois de excluídos os vazios”* (Santana e Rodrigues, 2005). Esta propriedade é necessária para o ensaio de sedimentação, visto estar presente na lei de *Stoke*, e para o índice de vazios.

O ensaio em si recorre a um picnómetro e é aplicável apenas a partículas do solo com dimensões inferiores a 4,76 mm (Silva, 2013). Sendo que pode ser realizado por duas vias, com secagem prévia ou sem secagem prévia do provete a ser utilizado, sendo esta última técnica a mais utilizada.

2.2.7. Resistência ao corte direto

A resistência ao corte é uma propriedade importante quando são executadas misturas como solo-betume e, no caso em estudo, o solo-polímero. Este ensaio permite obter indicações sobre a melhoria do solo, isto é, se a aplicação do polímero trouxe benefícios quanto à resistência ao corte do solo.

A resistência ao corte é uma propriedade relevante na avaliação da estabilidade, bem como na avaliação do risco de rotura (Miguens, 2016). Visto que o polímero é aplicado como técnica de estabilização de paredes de escavação, este ensaio torna-se fundamental para avaliação comportamental do polímero.

O ensaio de resistência ao corte consiste na colocação de uma amostra de solo numa caixa metálica bipartida, designada de caixa de corte (Figura 4). A amostra colocada pode ser intacta ou remexida, tendo em atenção que no último caso o solo é isento de coesão. O ensaio consiste em aplicar uma translação horizontal na parte inferior da caixa enquanto a metade superior mantém a sua posição inicial a partir de uma reação aplicada por um anel dinamométrico, essa força é designada de força horizontal (Fernandes, 2012).

Este ensaio permite obter tanto o ângulo de atrito dos materiais como a sua coesão, como tal o Quadro 7 e 8 apresentam valores padrão de ângulos de atrito tanto para materiais arenosos e argilosos.

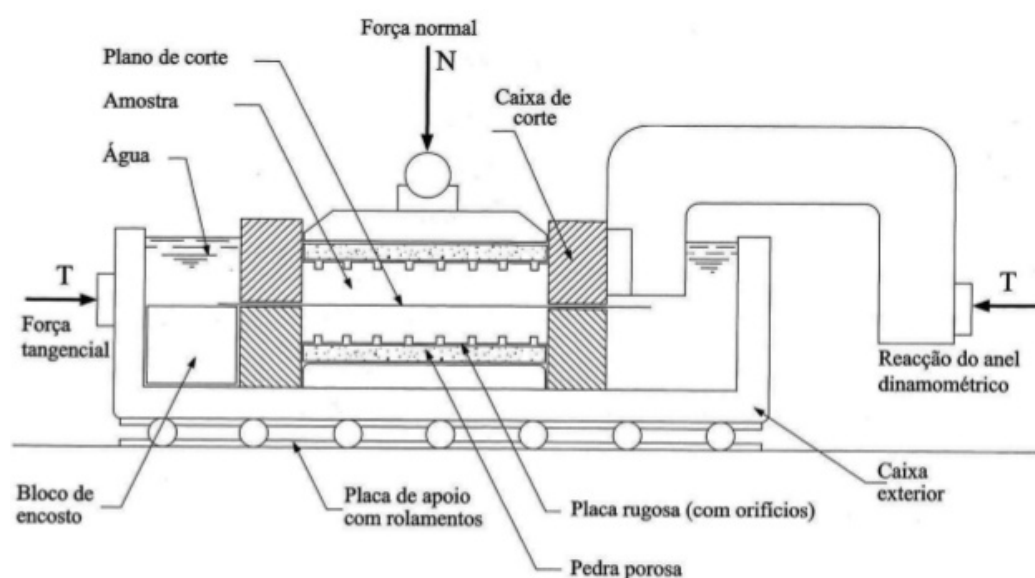


Figura 4 – Esquema do aparelho de corte direto (Fonte: Fernandes, 2012).

Quadro 7 – Valores indicativos de ângulo de atrito para solos granulares (Adaptado de Fernandes, 2012).

	Ângulo de atrito (°)	
	Medianamente compacto	Compacto
Siltes (não plástico)	28	30
Areias finas a médias mal graduadas	30 – 34	32 – 36
Areias bem graduadas	34-40	38 – 46
Areias e cascalhos	36 - 42	40 - 48

Quadro 8 – Correlação entre o ângulo de atrito e o índice de plasticidade das argilas (Adaptado de Kenney, 1959).

IP (%)	Ângulo de atrito (°)
10	30 – 38
20	26 – 34
40	20 – 29
60	18 - 25

2.2.8. Permeabilidade

Entende-se por permeabilidade a capacidade de um determinado solo, em condições normais, ou seja, sem estar sujeito a grandes tensões, permitir a passagem de água através dos vazios, sendo assim o índice de vazios dos solos está diretamente relacionado com a sua permeabilidade.

A permeabilidade é uma das propriedades que apresenta mais variações, principalmente quando é testada em laboratório, já que é impossível reproduzir o mesmo ambiente em laboratório que *in situ*, mesmo com recolha de amostras intactas. Por este motivo, para obtenção da condutividade hidráulica, é mais fiável a execução de ensaios *in situ* do que propriamente ensaios laboratoriais.

Outra forma de obter o coeficiente de permeabilidade (k) é através de fórmulas empíricas. O Quadro 9 apresenta equações de vários investigadores ou organizações, com vista a obter o coeficiente de permeabilidade, bem como o seu campo de aplicação e as suas limitações.

Quadro 9 – Equações empíricas para obtenção da permeabilidade (Adaptado de Dias, 2016).

INVESTIGADOR/ ORGANIZAÇÃO	EQUAÇÃO	CAMPO DE APLICAÇÃO E LIMITAÇÕES
Slichter (1898)	$k = \frac{g}{v} * n^{3.287} * D_{10}^2$	Mais apropriado para solos com $d_{10}=0,01\sim 5$ mm.
Kozeny-Carman (1956)	$k = 0.083 * \frac{g}{v} * \left[\frac{n^3}{(1-n)^2} \right] * D_{10}^2$	Para $D_{10}<3$ mm. Para solos granulares o termo da inercia não é tido em conta.
Kenney et al. (1984)	$k = (0,005) * D_5^2$	$D = 0.074-25.4$ mm e $C_u=1,04-12$.
NAVFAC (Chapuis et al. , 1989)	$k = 10^{1.291e-0.6435} * D_{10}^{0.5504-0.2987e}$	$e=0,3\sim 0,7$; $d_{10}=0,10\sim 2,0$ mm; $C_u=2\sim 12$; $e d_{10}/d_5>1,4$.
USBR- (Vukovic and Soro, 1992)	$k = 0.048 * \frac{g}{v} * D_{20}^{0.3} * D_{10}^2$	Fornece os melhores resultados quando $C_u<5$.
Alyamani and Şen (1993)	$k = 1.5046 * (I_0 + 0.025 * (D_{50} - D_{10}))^2$	Este método é mais preciso para amostras bem graduadas;
Breyer-Kresic (1998)	$k = 6 * 10^{-2} * \frac{g}{v} * \log\left(\frac{500}{C_u}\right) * D_{10}^2$	$C_u=1\sim 20$, $d_{10}=0,06\sim 0,6$ mm.
Chapuis (2004)	$k = 1.5 * D_{10}^2 * \frac{e^3}{1+e} * \frac{1+e_{max}}{e_{max}^3}$	N/A
Terzaghi-Odong (2007)	$k = 0.084 * \frac{g}{v} * \left[\frac{n - 0.13}{(1-n)^{\frac{1}{3}}} \right]^2 * D_{10}^2$	O valor da média selecionado de 0,084 é na verdade um coeficiente de classificação que normalmente varia entre 0,0061 e 0,00107.

O Quadro 10 apresenta os valores espectáveis de obter para o coeficiente de permeabilidade, tanto com recurso a equações empíricas, ensaios *in situ* e laboratoriais, tendo em conta o tipo de solo.

Quadro 10 – Coeficiente de permeabilidade de vários solos (Adaptado de Coelho, 1996).

k (cm/s)	Drenagem	Tipo de solos
10^2 a 10^1	Boa	Seixo limpo
10	Boa	Areia limpa
10^{-1} a 10^{-3}	Boa	Mistura de areia limpa com seixo
10^{-4}	Má	Areia muito fina
10^{-5} a 10^{-6}	Má	Siltes orgânicos ou inorgânicos, misturas de areia siltosa e argila, depósito de argila estratificada
10^{-7} a 10^{-9}	Praticamente impermeável	Solos impermeáveis, p. ex. argilas homogêneas

2.2.9. Condutividade elétrica

A condutividade elétrica mede a capacidade que o solo tem em deixar passar uma corrente elétrica, esta característica depende da presença de íões e da temperatura a que a medição é executada.

Esta propriedade está relacionada com a salinidade do solo, no entanto *“não há nenhuma relação direta entre a condutividade elétrica e a quantidade total de sais solúveis, devido às diferentes condutividades iônicas dos diferentes sais e a influência das partículas do solo”* (Dias, 2016).

Num solo com elevada salinidade os íões têm tendência a associar-se à superfície das partículas do solo. No entanto, no caso das argilas, como apresentam maior superfície específica a presença de sais diminui a expansibilidade da mesma.

Porém, quando os sais são lixiviados pela água as partículas ficam livres para se associarem a moléculas de água e esta diminuição de íões pode levar a uma redução do pH do solo (Dias, 2016).

As unidades da CE (Condutividade Elétrica) são representadas em Siemens por metro (S/m), no entanto solos que apresentem uma CE baixa é normalmente expresso em microSiemens por centímetro ($\mu\text{S}/\text{cm}$).

Este ensaio apresenta grande importância para determinar a eficiência de aplicações de estabilização químicas, visto que existem métodos, como a aplicação de bentonite, que na presença de alguns sais pode afetar a sua eficácia.

2.2.10. Composição química

A composição química é obtida por fluorescência de raios x, esta técnica permite determinar a composição química de diversos materiais, inclusive de rochas e solos. Esta tecnologia realiza análises tanto qualitativas como quantitativas e possui uma larga capacidade de detecção, cobrindo um número considerável de elementos (Mg, Al, P, Si, S, entre outros) (Dairix, 2017).

Este ensaio funciona da seguinte forma, *“uma amostra é irradiada pelos raios X, os átomos na amostra geram raios X característicos que são emitidos da amostra. Tais raios são conhecidos como raios X “fluorescentes” e possuem um comprimento de onda e uma energia específicos que são característicos de cada elemento. Consequentemente, a análise qualitativa pode ser feita pela investigação dos comprimentos de onda dos raios X. Como a intensidade dos raios X fluorescente está dependente da concentração do elemento, a análise quantitativa também é possível pela medição da quantidade de raios X com o comprimento de onda específico de cada elemento”* (Shimadzu, 2017).

Porém existem alguns fatores como o teor de água das amostras, a temperatura, a colocação incorreta do analisador, bem como outras propriedades físicas das partículas que podem por em causa a fiabilidade desta técnica (Santos *et al*, 2013; Silva, 2013 e Piccoli *et al*,.2011).

Este ensaio tem a vantagem de para além de ser aplicável a uma larga variedade de matérias, pode ser executado tanto *in situ* como em laboratório, sendo que em laboratório é necessário moer o material a ser ensaiado.

2.3. Paredes moldadas

Paredes moldadas corresponde a uma técnica de contenção aplicada principalmente em solos, em que a sua principal função é o suporte das paredes para permitir a escavação no seu interior. Devido à sua versatilidade é possível aplicá-la para fins de fundações, suporte de contenções periféricas e como impermeabilizante (Pinto, 2008; Aldeias, 2011 e Couto, 2014). Contudo, existem dois tipos distintos de aplicação da técnica, parede moldada *in situ* ou com painéis pré-fabricados em betão armado ou pré-esforçado, sendo que o último referido não será abordado na presente dissertação (Coelho 1996).

Para obter sucesso na aplicação desta técnica de contenção é necessário recorrer a um fluido de estabilização. Atualmente, existem dois tipos de fluidos, as lamas bentoníticas (Luz & Oliveira, s.d.

e Barbosa, 2006) e fluídos poliméricos (Patrício, 2015 e Duarte, 2010), no entanto, em obra, é mais comum a utilização de bentonite para estabilização da escavação.

A Figura 5 retrata o modo de construção de paredes moldadas *in situ*, que segundo Coelho (1996) apresenta a seguinte ordem de elaboração:

1. Reconhecimento da obra (geologia, geotécnica, dimensões, reconhecimento de obstáculos como canalizações, condutas, entre outros, análise de edifícios vizinhos, bem como o tipo e estado de conservação das suas fundações, entre outros fatores preponderantes para a execução da obra);
2. Execução dos muros-guia para orientar a escavação dos painéis;
3. Escavação dos painéis e preenchimento com lama bentonítica ou polimérica, para estabilização das paredes da escavação;
4. Colocação de tubo-junta ou juntas que garantem a continuidade das paredes e a sua estanqueidade;
5. Após conclusão da escavação é necessário verificar as condições físicas e o estado de contaminação das lamas, provocados por inclusões do solo;
6. Caso a lama não apresente os requisitos definidos é necessário proceder à troca recorrendo à sua substituição ou circulação, enquanto para o fluído polimérico basta aplicar aditivos (abordados no *tópico 2.5.2.*);
7. Preparação e posterior colocação da armadura mergulhando-a na lama;
8. Betonagem a partir de um tubo abastecedor inserido no fundo da escavação. Simultânea recuperação das lamas devido a apresentar uma densidade inferior ao betão. À medida que é executada a betonagem é necessário subir o tubo abastecedor com vista a diminuir o percurso e o atrito do betão quanto às paredes da escavação como à armadura.
9. Ao iniciar o processo de presa do betão retira-se lentamente os tubos-junta, caso os mesmos sejam provisórios;
10. Demolição dos muros-guia;
11. Por fim, como durante o processo de betonagem se verifica a ascensão das lamas e betão contaminado é necessário recorrer à remoção dos mesmos a partir da escavação do topo da parede.

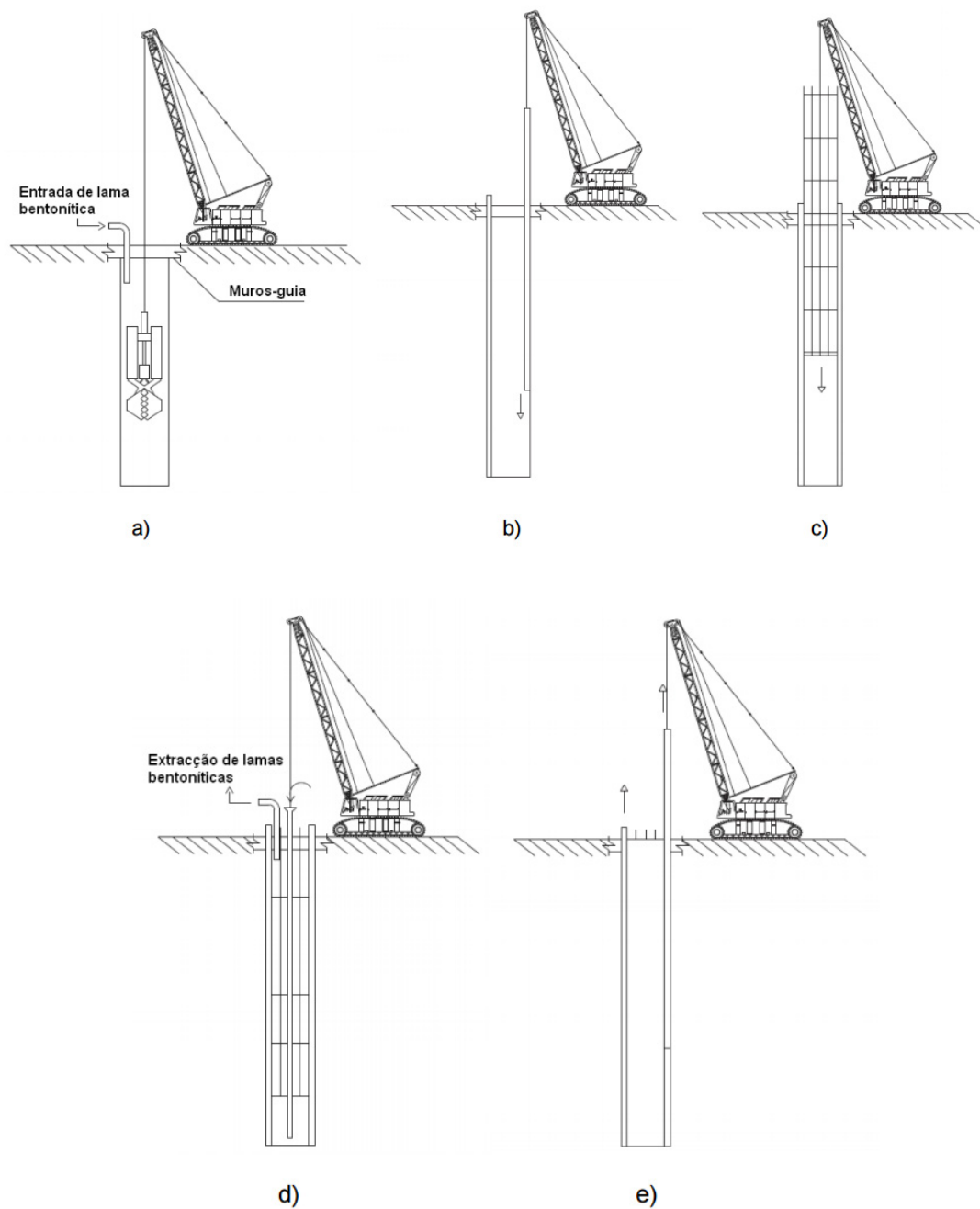


Figura 5 - Fases de execução de uma parede moldada *in situ*: a) escavação; b) colocação de tubo-junta; c) colocação da armadura; d) betonagem; e) extração de tubo-junta (Fonte: Pinto, 2008).

Para executar paredes moldadas é possível recorrer a três tipos de equipamentos distintos, sendo mais vantajoso, no que toca à garantia da verticalidade das paredes, o uso de maquinaria pesada – balde de maxilas ou hidrofesa (Figura 6) – estes equipamentos executam a escavação suspensos no cabo, o que os tornam úteis para obras que apresentam grandes profundidades.

Por outro lado, também pode ser utilizado um equipamento designado de trépano para a execução da escavação, sendo mais comum a sua utilização em casos pontuais com a presença de rocha, com o objetivo de a desagregar (Aldeias, 2011).

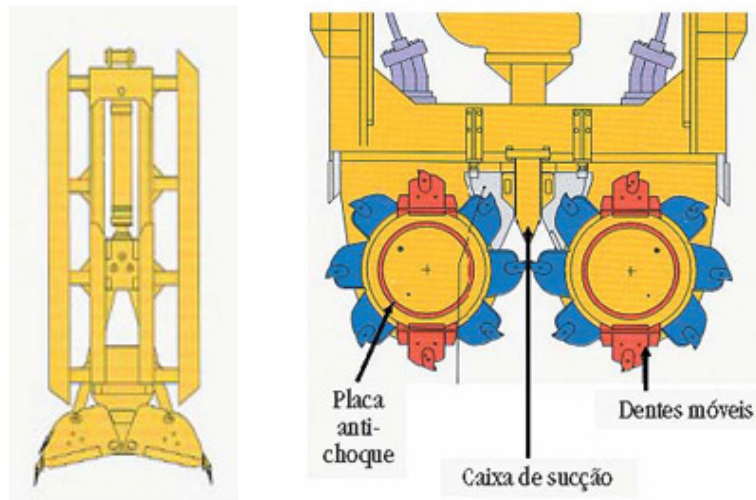


Figura 6 - Ferramentas de corte para execução de paredes moldadas: a) balde de maxilas; b) hidrofesa c) trépano (Fonte: <http://construironline.dashofer.pt/?s=modulos&v=capitulo&c=387>).

Todavia, há que ter sempre em atenção que a velocidade dos movimentos dos equipamentos referidos deve ser reduzida, entre 2-12 m/h, para evitar danificar as paredes de escavação, bem como impedir a oscilação das lamas que poderá levar à instabilidade das paredes (Iamato & Barros, 2013).

Esta técnica de contenção é bastante utilizada na engenharia, sobretudo para garantir estanqueidade no interior da escavação, porém, tal como todas as práticas apresenta vantagens e desvantagens, referidas no Quadro 11.

Quadro 11 - Vantagens e desvantagens da aplicação da técnica paredes moldadas (Adaptado: Mil-Homens, 2012 e Mendonça, 2016).

Vantagens:	Desvantagens:
<ul style="list-style-type: none"> • Permite várias frentes de trabalho; • Bom comportamento sísmico; • Redução do ruído e vibrações comparativamente a outras técnicas de contenção; • Possibilidade de prescindir de acabamento interior em zonas como garagens; • Minimização da descompressão e deformação das construções vizinhas; • Pode atingir profundidades elevadas; • Garante estanqueidade à passagem de água para o interior da estrutura; • Aplicável a diversos tipos de terreno, mesmo com nível freático elevado, percolação de água, terrenos incoerentes ou moles. 	<ul style="list-style-type: none"> • Solução cara, principalmente devido a equipamento de grande porte; • Dimensionamento condicionado pela fase provisória; • Espessura mínima das paredes (40 cm) condicionada pelo equipamento e garantia da verticalidade; • Ocupação da área útil da escavação ou dos pisos; • Exige grande espaço de estaleiro; • Exige equipamentos e mão de obra especializados; • A utilização da bentonite como fluido de estabilização levanta problemas ambientais; • O processo pode ter de ser abandonado se existirem rochas no terreno; • Se o firme rochoso se encontrar a grande profundidade e caso se pretenda a garantia de impermeabilização esta solução torna-se economicamente inviável.

2.4. Estacas

As estacas correspondem a uma obra de fundações profundas que apresenta uma estrutura esbelta e pode ser unicamente apoiada na ponta, se o terreno de apoio assim o permitir. Caso contrário, é possível recorrer a forças de atrito mobilizadas através da parede da estaca (Meireles e Martins 2006 e Mil-Homens, 2012).

Existem vários métodos de implementação de estacas, sendo possível a sua execução a partir de cravação ou perfuração. A primeira forma de execução requer uma estaca pré-fabricada ou de um tubo moldador que após a betonagem da estaca é retirado. O segundo modo de execução corresponde ao método que será abordado no referente trabalho, tendo como principal vantagem relativamente às restantes práticas, a reduzida perturbação do solo à sua execução (Coelho, 1996; Meireles e Martins, 2006; Aldeias, 2011; Mil-Homens, 2012 e Couto, 2014). Esta técnica permite alcançar grandes profundidades, por esse motivo, para garantir que a mesma é executada com sucesso, é comum recorrer a revestimentos provisórios (tubo moldador

recuperável), definitivos (tubo moldador não recuperável) ou fluídos de estabilização (bentonite e polímeros).

A Figura 7 retrata o modo de construção de estacas com lama bentonítica, que segundo Meireles e Martins (2006) apresenta a seguinte ordem de elaboração:

1. Instalação de todo o estaleiro;
2. Aplicação do tubo guia para evitar a entrada de lamas no terreno superficial, guiar o equipamento e facilitar na suspensão da armadura;
3. Furação executada pelo trado contínuo, o solo é retirado subindo o trado, no caso de ser muito desagregado é necessário recorrer ao balde para limpeza do furo. Ao mesmo tempo que o solo é retirado, o furo é preenchido com o fluído estabilizador, garantindo que o nível da lama é constante e não alcança o tubo guia;
4. Realizada a furação segue a limpeza do fundo do furo com recurso a um balde apropriado;
5. Preparação e posterior colocação da armadura mergulhando-a no fluído estabilizador;
6. Betonagem a partir de um tubo abastecedor inserido no fundo da escavação. Simultânea recuperação da lama devido a apresentar uma densidade inferior ao betão. À medida que é executada a betonagem é necessário subir o tubo abastecedor, garantindo que está abaixo do nível superior de betão entre 2 a 4 m;
7. A betonagem está concluída quando o nível do betão estiver pelo menos 1 m acima do topo da estaca, para garantir que o betão que esteve em contacto com a fluído estabilizador é retirado.
8. Retirar o tubo guia e tratamento das lamas para aplicação futura.

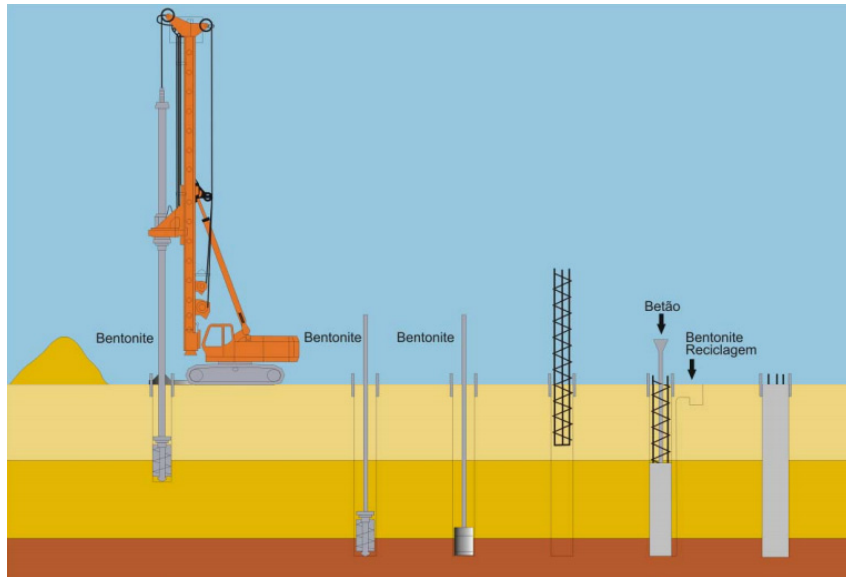


Figura 7 - Sequência de execução de uma estaca com lama bentonítica (Fonte: Meireles e Martins, 2006).

Esta técnica é sobretudo utilizada para a realização de estacas com comprimento superior a 50m, visto que, neste caso a execução da estaca com revestimento é inviável. Mesmo assim a aplicação deste método apresenta algumas vantagens, bem como desvantagens, as quais são apresentadas no Quadro 12.

Quadro 12 - Vantagens e desvantagens da aplicação da técnica de fundações profundas - Estacas (Adaptado: Coelho, 1996 e Aldeias, 2011).

Vantagens:	Desvantagens:
<ul style="list-style-type: none"> • Comprimento da estaca adaptável; • Possível comparar o local da obra com os dados do projeto; • Caso seja aplicada em solos coesivos ou rochas brandas, é possível executar grandes diâmetro, comprimento, bem como alargar a ponteira de duas a três vezes o seu diâmetro; • Técnica executada sem elevado ruído e vibrações. 	<ul style="list-style-type: none"> • A perfuração pode levar à descompressão de solos arenosos ou com a presença de seixos, bem como criar lamas em terrenos argilosos ou de rochas brandas; • Não é possível realizar o alargamento da base em solos sem coesão; • Técnica aplicável apenas para estacas verticais; • Necessita de estaleiro de grandes dimensões no caso de utilizar bentonite como fluido de estabilização; • Problemas ambientais associados à bentonite.

2.5. Flúidos de estabilização

Tal como foi referido, as técnicas estudadas no presente trabalho utilizam recorrentemente flúidos estabilizadores com o objetivo de facilitar a escavação no solo, visto que o flúido garante a estabilização das paredes da escavação.

Tanto a bentonite como o uso de polímeros apresentam os mesmos objetivos, isto é, através da pressão hidrostática impedem a passagem de água para o interior da escavação, bem como sustentam as tensões exercidas pelo terreno adjacente à escavação (Barbosa, 2006 e Pinto, 2008). Conforme se pode verificar na Figura 8, a tensão resistente corresponde à tensão aplicada pelas lamas, enquanto a tensão atuante diz respeito às forças aplicadas pelo solo, pela água existente no mesmo, bem como a sobrecarga aplicada à superfície (por exemplo, edifícios vizinhos, trabalhos no estaleiro, entre outros).

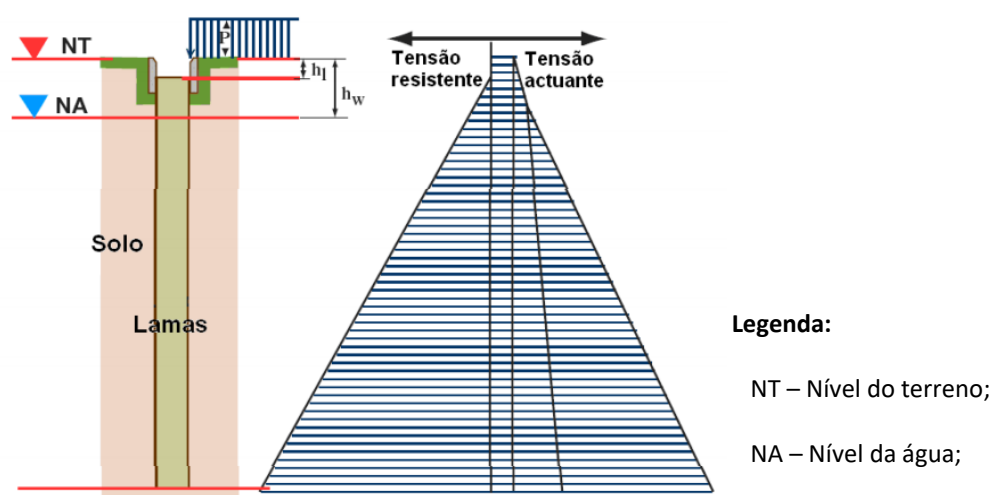


Figura 8 – Ação dos flúidos de estabilização (Fonte: Pinto, 2008).

Tendo em conta a prática de contenção e fundações identificadas na dissertação, paredes moldadas e estacas, o Quadro 13 indica as características e funções das lamas para a realização das mesmas. No entanto, as particularidades identificadas necessitam de características opostas, visto que, a) representa uma lama densa. Por outro lado, para garantir os objetivos mencionados em b) é necessária uma lama muito fluída. Por este motivo, há que obter um ponto de equilíbrio que garanta ambas as características até à betonagem. Também é possível constatar que a limpeza dos flúidos de estabilização é distinta, verificando-se que a lama bentonítica necessita de um maior cuidado nesta particularidade.

Quadro 13 – Características dos fluídos de estabilização (Adaptado de Coelho, 1996 e Trindade, 2010).

Características dos fluídos de estabilização	
<p>a) De lamas menos fluídas:</p> <ul style="list-style-type: none">• Suportar a escavação exercendo pressão hidrostática nas paredes;• Evitar a aglomeração de finos no fundo da escavação mantendo os detritos em suspensão;• Permanecer na escavação, sem penetrar em demasia no terreno.	<p>b) De lamas mais fluídas:</p> <ul style="list-style-type: none">• Ser facilmente removida pelo betão evitando interferências da adesão do mesmo nas armaduras e paredes da escavação;• Bentonite - Possibilidade de ser reciclada a partir de peneiração ou outros processos de remoção de detritos provenientes da escavação;• Polímero – Capacidade de limpeza dos detritos oriundos da escavação, mantendo a lama limpa;• Fácil bombagem.

2.5.1. Bentonite ou lama bentonítica

A bentonite provém de uma argila designada de montmorilonite sódica ou cálcica e pertence ao grupo das esmectites (Luz & Oliveira, s.d.). Entre estes dois tipos de montmorilonite existem bastantes diferenças, *“as sódicas são conhecidas pela sua expansibilidade, viscosidade, tixotropia, formação de película impermeável (“cake”) e capacidade de dispersão. Já as montmorilonites cálcicas têm como propriedades importantes: a alta capacidade de absorção, grande poder de interligação e de branqueamento. Genericamente a bentonite sódica é conhecida como uma argila muito expansiva e a bentonite cálcica como uma argila pouco expansiva, apesar de muito absorvente”* (Trindade, 2010).

A montmorilonite sódica é a utilizada como fluído estabilizador, mas quando a cálcica é predominante numa zona ou país, é comum o uso de bentonite sódica ativada, que corresponde a montmorilonite cálcica com carbonato de sódio que leva à troca dos iões de cálcio por iões de sódio (Tonnesen, 2010).

Das propriedades anteriormente referidas a característica vital para garantir a estabilidade é a lama apresentar uma certa rigidez em repouso, mas quando agitada torna-se mais fluída (tixotropia), isto é, como se pode verificar na Figura 9, em repouso as partículas da lama criam ligações elétricas e quando agitada estas ligações são quebradas (Duarte, 2010).

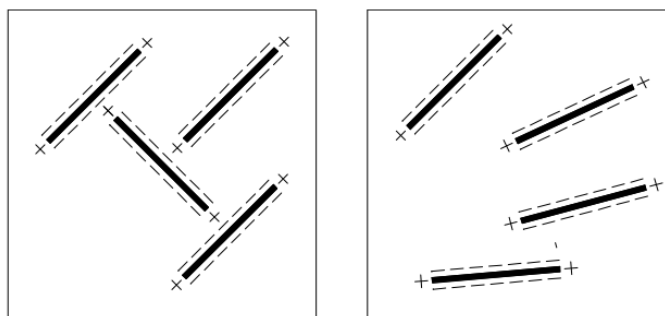


Figura 9 - Lama bentonítica: a) em repouso; b) agitada (Fonte: Federation of Piling Specialists, 2006).

Como já foi referido, a bentonite em presença de água hidrata-se e expande-se ocupando os vazios existentes no solo, dando origem a uma camada impermeável nas paredes da escavação, tal como representa a Figura 10. Esta película também designada de “cake” é a responsável pela estabilidade das paredes da escavação.

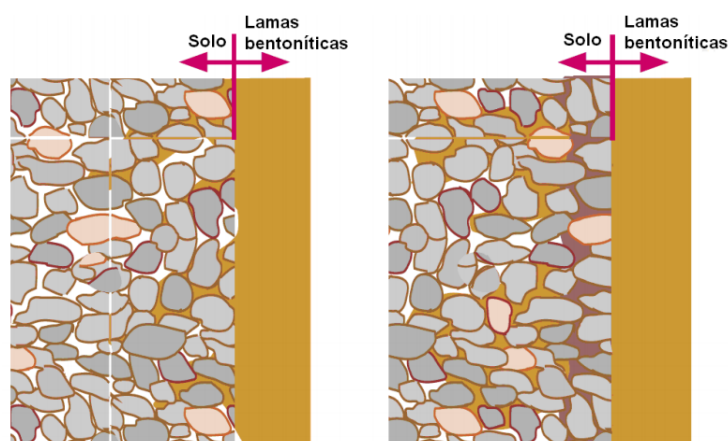


Figura 10 – Formação da película impermeável com a utilização da bentonite (Fonte: Pinto, 2008).

2.5.2. Polímeros ou lama polimérica

“Polímeros são macromoléculas com unidades de repetição menores (os monómeros) que contêm na sua estrutura carbono e hidrogénio. As proteínas, os polissacarídeos, os carboidratos e os ácidos nucleicos são exemplos de polímeros orgânicos. Porém, estes compostos podem ser de origem natural ou sintética” (Eires et al, 2010 e Eires et al, 2014).

Existem vários polímeros naturais (Shanmugam et al., 2005) e sintéticos (McQuarrie et al., 2011), na verdade o ser humano recorre a polímeros sintéticos diariamente (plásticos, borrachas, fibras,

entre outros). O Quadro 14 indica alguns dos polímeros, bem como as suas principais aplicações para estabilização de paredes de escavações.

Quadro 14 – Tipos de polímeros e suas aplicações (Adaptado: Trindade, 2010 e Shiroma, 2012).

Polímeros naturais	Polímeros naturais modificados	Polímeros sintéticos
<p>Amido – Aditivo de controlo de perda de fluído em todo o tipo de lamas, possível aplicar em água salgada e requer utilização antibacteriana devido à rápida degradação;</p> <p>Biopolímero – Aplicável para aumentar a viscosidade e manter a baixa resistência ao corte, aplicável para suspender e transportar material;</p> <p>Goma guar – Agente viscosificante nos fluídos de finalização de poços e fracturação de maciços, não aconselhável aplicar em terrenos com argilas.</p>	<p>Celuloses – Aditivo de controlo de perda de fluído, viscosidade e aumento da resistência ao corte;</p> <p>Hidroxietilcelulose – Agente viscosificante para finalização de poços e para fluídos de fracturação de maciços;</p> <p>Carboximetil amido – Aditivo de controlo de perda de fluído para todo o tipo de lamas, é mais eficaz que o amido quando aplicado em temperaturas elevadas.</p>	<p>Poliacrilatos:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Peso molecular baixo (< 1000 g/mol): Aditivo de aumento da fluidez e desfloculantes; • Peso molecular médio (< 10000 g/mol): Aditivo de controlo de perda de fluído, floculante e estabilizador de xistos argilosos; • Peso molecular alto (> 10000 g/mol): Aditivo floculante e extensor de bentonite. <p>Poliacrilamidas – Aplicável para estabilização de argilitos (evita a expansão da argila) e floculante;</p> <p>Polímeros catiónicos – Aditivo aplicável para estabilização de argilitos e floculante.</p>

Os primeiros polímeros foram desenvolvidos com a finalidade de solucionar os principais entraves causados pela bentonite, como: não contribuir para a decantação natural dos solos provenientes da escavação e expansão de terrenos argilosos. Para tal eram aplicados aditivos de viscosidade, que beneficiavam a decantação e aditivos que impedissem a expansão de terrenos argilosos devido à água existente no fluído de estabilização (Barbosa, 2006; Pinto, 2008 e Trindade, 2010). Exemplos dos aditivos poliméricos aplicados na área da perfuração são o CMC e o PAM. O CMC para aumentar a viscosidade e diminuir as perdas de fluído, enquanto o PAM para diminuir a hidratação de terrenos argilosos e posterior expansão (Barbosa, 2006 e Barbosa *et al.*, 2006).

Com o passar do tempo verificou-se que o polímero apresentava vantagens comparativamente à bentonite, o que elevou a sua utilização. O Quadro 15 indica as vantagens e desvantagens deste produto.

Quadro 15 – Vantagens e desvantagens da aplicação de polímero como fluido estabilizador.

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none">• Fluido mais limpo devido à sua capacidade de desintegração e decantação natural das partículas;• Densidade reduzida mesmo após a escavação (polímeros com maior peso molecular apresentam maior densidade);• Não prejudica o ambiente e é biodegradável (as suas longas cadeias são quebradas a partir de raios UV);• Uso de bombas centrífugas quebra a sua estrutura e elimina a característica de interação com o solo.	<ul style="list-style-type: none">• Aplicação em águas contaminadas degrada o polímero colocando em causa o seu rendimento.

No entanto, os fluidos poliméricos apresentam exatamente a mesma função que a bentonite, mas comporta-se de modo diferente. Uma vez aplicado, a lama polimérica vai penetrando as paredes da escavação e cria ligações com o solo por diferença de carga elétrica, o que dá a origem a uma película denominada de membrana, como é possível constatar este fenómeno na Figura 11 (Trindade, 2010).

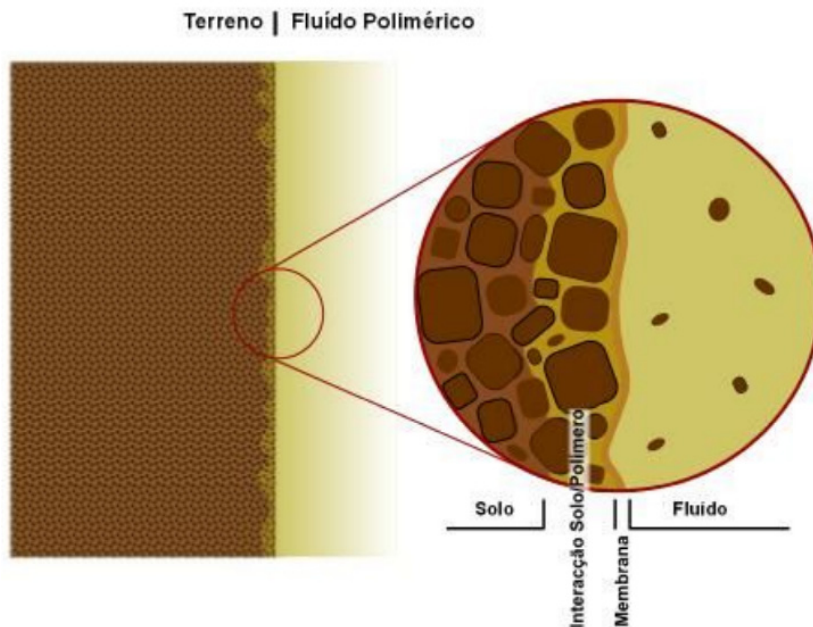


Figura 11 – Interação solo-polímero (Fonte: Trindade, 2010).

Para assegurar a existência da membrana por toda a área de escavação é preciso garantir que a pressão da água existente no solo nunca seja superior à pressão exercida pela lama polimérica. Caso contrário, dará origem a percolação da água para o interior da escavação, rompendo a membrana formada, o que altera a estabilidade da escavação (Pinto, 2008).

A Figura 12 representa a aplicação do polímero vista ao microscópio em solo arenoso, onde é possível verificar as ligações solo-polímero, onde o produto interage com as partículas unindo-as, o que leva a alterações de características como a permeabilidade do solo e assegura a formação da membrana que garante a estabilização das paredes.

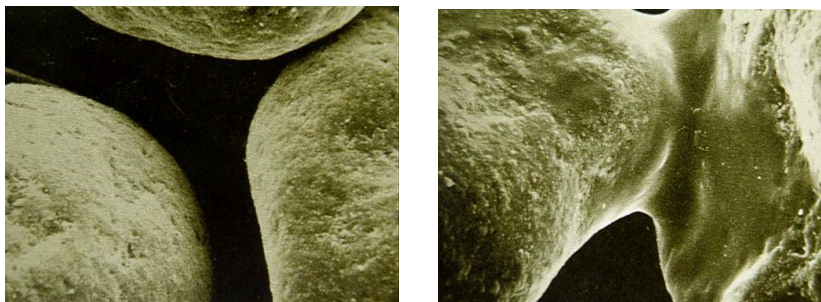


Figura 12 – Aplicação do polímero - a) areia sem polímero; b) areia com polímero (Fonte: <http://www.polypavement.com/>).

A empresa *GEO* utiliza como fluido de estabilização o polímero, mais propriamente o sistema *G3*[®] (terceira geração) em que o seu *“desempenho molecular e tridimensional, reforça as forças intragranulares e propriedades de coesão de formações com perfis de escavação extremamente desvantajosos e as propriedades químicas intrínsecas criam pontes entre as cadeias do polímero, o que gera uma rede multidirecional à face e dentro das paredes da escavação”* (GEO, 2017). Este sistema é composto pelos seguintes polímeros:

- **PolyMud**[®] - Consiste no componente base do sistema *G3*[®], *“com granulado de polímero sintético extremamente concentrado, concebido para interagir quimicamente com os diversos tipos de solo. Apresenta uma formulação de elevado peso molecular e densidade de carga estáveis, resulta numa solução aquosa com desenvolvimento de viscosidades elevadas ideal para a estabilização da maioria das formações geológicas”* (GEO, 2017);
- **Alfabond**[®] - Corresponde a um polímero líquido aplicado no componente base para evitar perdas de fluido e aumentar a viscosidade (García 2010; Trindade 2012 e GEO, 2017);

- **Microbond®** - Polímero líquido aplicado para melhorar a estabilização e a autolimpeza da lama por decantação, pode ser aplicado tanto na escavação como no tanque de sedimentação (García 2010; Trindade 2012 e GEO, 2017).

No entanto, a empresa *GEO* também contém outro polímero granulado sólido o PolyGel®, um polímero acrílico que pode ser utilizado juntamente com o sistema G3® e tal como todos os polímeros não acarreta problemas ambientais e garante a estabilidade.

Por fim, a lama polimérica tem de ser aplicada de acordo com um intervalo de propriedades (Quadro 16), onde é necessário ter em conta que estes intervalos são respeitados, caso contrário poderá por em causa o rendimento do fluído. Para tal, são analisadas em obra propriedades como pH, viscosidade, densidade e teor de areia, com vista a garantir que a lama apresenta as características necessárias até ser realizada a betonagem.

Quadro 16 – Propriedades da lama polimérica quando aplicada (Fonte: GEO, 2017).

	pH	Viscosidade - Cone de Marsh (seg)	Densidade (kg/m ³)	Teor de areia (%)
Mistura com água	11-12	aprox. 65	1,00-1,04	-
Fluído reutilizado	11-12	aprox. 65	≤1,08	<2
Antes de betonar	9-12	aprox. 50	≤1,04	≤2

2.5.2.1. pH

Em solos a matéria orgânica, os aluminossilicatos de frações finas, bem como a lixiviação de alguns sais leva à acidez dos solos. *“A carga elétrica das partículas pode variar com o pH que, por sua vez, influência consideravelmente na troca de iões, dispersão e floculação”* (Batista, 2006). Porém, características como a corrosão dos equipamentos também se encontra dependente desta propriedade.

Para obtenção do valor do pH em obra, grande parte das vezes recorre-se a uma fita de pH. O valor é obtido através de uma cor que aparece poucos minutos após a fita ser mergulhada na lama (Santos, 2012). O polímero é aplicado em ambiente básico, logo tal como está representado no Quadro 17 será de esperar pH superior a 8.

Quadro 17 – Classificação dos solos em função do pH (Fonte: Batista, 2006).

pH	Classificação
pH > 8	Fortemente alcalino
7,4 < pH < 8,0	Alcalino
6,6 < pH < 7,3	Neutro
6,0 < pH < 6,5	Levemente ácido
5,5 < pH < 5,9	Moderadamente ácido
4,5 < pH < 5,4	Ácido
4,3 < pH < 4,4	Fortemente ácido
pH < 4,3	Extremamente ácido

Quando o fluido de perfuração está com característica ácida, torna-se um problema para as ferramentas que estão na escavação, pois pode causar corrosão das ferramentas de perfuração (Santos, 2012).

2.5.2.2. Viscosidade

“A viscosidade é a propriedade relacionada com a maior ou menor facilidade de escorregamento de um material, ou seja, é uma medida da sua fluidez: quanto mais viscoso, menor é a fluidez do material” (Oliveira, 2010).

Esta propriedade é obtida através do cone de *Marsh* (Figura 13) e mede a viscosidade a partir do tempo que a lama demora a passar do cone para um copo de 946 ml, até que o copo se encontre totalmente cheio.



Figura 13 – Cone de Marsh (Fonte: <http://boxminsas.com/equipos-de-medicion/>).

Os fatores que ao longo da aplicação da lama interfere com a viscosidade são a perda do fluido pelas paredes da escavação e a percentagem de teor de areia. No caso da empresa *GEO*, o produto utilizado para solucionar este problema é o polímero em estado líquido *Alfabond*[®].

2.5.2.3. Densidade

A densidade do fluido de perfuração corresponde ao seu peso por unidade de volume, tal como indica a Equação 5. Esta propriedade é responsável pela pressão hidrostática exercida nas paredes da escavação (Santos, 2012).

Equação 5 – Densidade (Fonte: Santos, 2012).

$$d = \frac{m}{V}$$

Onde:

d – Densidade (kg/m³);

m – Massa específica (kg);

V – Volume (m³).

A lama polimérica é colocada no furo com uma densidade bastante próxima da água, entre 1,00-1,04 kg/m³, contudo ao realizar a escavação do furo algumas partículas são libertadas para o fluido e, mesmo que o polímero apresente capacidade de integração e decantação natural das partículas, a sua densidade aumenta. Como tal é necessário determinar a densidade com recurso a uma balança (Figura 14), para garantir que a mesma se encontra dentro dos valores estabelecidos anteriormente.



Figura 14 – Balança de Baroid (Fonte: <http://proetisa.com/proetisa-productos.php?ID=212>).

A densidade da lama é obtida a partir da balança de *Baroid* e para lamas poliméricas é de esperar que esta propriedade não supere os valores admitidos, visto que o polímero apresenta capacidade de autolimpeza e efetua decantação natural do solo proveniente da escavação. Caso a densidade obtida seja superior à admitida recorre-se a aditivos para melhorar as propriedades da lama. A empresa GEO recorre a aditivos como Microbond® referidos anteriormente (tópico 2.5.2).

2.5.2.4. Teor de areia

Esta propriedade, tem de ser controlada com rigor e o seu valor deve ser o menor possível, pois a existência de finos na lama altera propriedades como a viscosidade e densidade (Kirschener, 2008). Quanto maior a percentagem de areia, maior a fricção entre partículas e o desgaste do equipamento de escavação, dando origem a problemas como a coluna dos equipamentos ficar pressa e elevada pressão hidrostática nas paredes da escavação.

2.5.3. Bentonite vs. Polímero

Após descrição da lama bentonítica e da lama polimérica, é possível verificar várias diferenças, embora ambas apresentem como objetivo principal a estabilização das paredes da escavação. O Quadro 18 indica as principais diferenças presentes em ambos os fluídos, no entanto, há que salientar alguns parâmetros, como na preparação a facilidade e rapidez da criação da lama polimérica comparativamente à bentonítica, que devido à necessidade de hidratação total leva a que a obra apresente uma central de maiores dimensões.

Comparando com a bentonite, o polímero pode ser até 45 vezes mais caro, porém o seu preço é amortizado quanto à concentração necessária para formação da lama, por apresentar uma central menor, bem como não necessitar de tratamento antes da betonagem, visto que em caso de não apresentar as propriedades necessárias são aplicados aditivos, como Alfabond® e Microbond® para a empresa GEO e ACCU-VIS, DE-CHLOR, INSTA-CLEAR DRY e MACRO-FILL para a empresa CETCO, para correção dos parâmetros (CETCO, 2013). É possível ser reciclada inúmeras vezes sem perder qualidade ao contrário da bentonite, visto que não causa qualquer transtorno ambiental e é de fácil eliminação (Trindade, 2010).

Quadro 18 – Comparação do polímero com a bentonite (Adaptado de Trindade, 2010; Mil-Homens, 2012; Rattichieri, 2015 e Polymer Drilling Systems,s.d.).

	Polímero	Bentonite
Preparação	Possível misturado num tanque ou à boca da escavação. Concentração: 1 kg/m ³ . Água tratada com NaOH.	Necessita de ser misturado até 24 horas com misturador para hidratação total. Concentração: 30-60 kg/m ³ .
Decantação	Partículas decantam no fundo da escavação	Partículas ficam em suspensão durante um longo período de tempo, necessita de tratamento para correção dos parâmetros.
Água salgada	Possível aplicar em água doce e salgada.	A bentonite não se hidrata em água salgada, logo não é possível a aplicação deste fluído neste ambiente.
Betonagem	O teor de areia após 20 minutos é geralmente menor que 1,0%, o que possibilita a betonagem sem necessidade de tratamento de lamas.	Alto teor de areia devido à suspensão das partículas pode interferir com a betonagem. Em alguns casos necessário tratamento de lamas antes da betonagem.
Reciclagem	Pode ser reciclada num número ilimitado de vezes sem perder a qualidade.	Perde qualidade após 2-3 vezes reciclada.
Efeito ambiental	Degradável.	Causa constrangimentos ambientais devido a ser expansível e impermeável.
Eliminação	Pode ser tratada em obra e eliminada como água residual.	Necessário enviar as lamas para um aterro sanitário para serem tratadas.

Como tal, todas estas características levam à poupança em tarefas auxiliares que são necessárias na aplicação da bentonite e dispensáveis com a utilização de polímero. Tornando assim, a estabilização com recurso a polímero, no seu todo, um meio mais económico e atrativo devido a todas as suas vantagens.

Um estudo realizado por Filho *et al.* (2013) comprovou que para a realização de paredes moldadas, a aplicação de bentonite como fluído de estabilização apresentou um custo de 27,92€/m³, enquanto a aplicação de polímero, tendo em conta todos os trabalhos auxiliares, desceu o custo para 20,05€/m³, o que numa obra de grande envergadura poderá causar diferenças económicas abismais. Porém este estudo foi realizado com base no mercado em 2011, logo, este valor pode não estar de acordo com os valores atuais.

Este estudo conclui também que o custo gasto na eliminação de resíduos sólidos oriundos da escavação é 28% menor em lamas poliméricas do que em lamas bentoníticas. Este valor deve-se ao facto dos resíduos obtidos nas lamas poliméricas não serem considerados materiais contaminados, logo não exige a eliminação por via de aterros sanitários, o que leva à minimização económica do processo.

3 – Protocolos

(página propositadamente em branco)

3. Protocolos

3.1. Preparação da amostra

Segundo a norma E 195-1966, é necessária uma preparação da amostra recebida do campo para a elaboração dos ensaios laboratoriais: análise granulométrica, determinação dos limites de consistência e determinação do equivalente centrífugo de humidade, que no caso em estudo não será aplicado. Logo, esta preparação prévia será necessária apenas para os dois primeiros ensaios anteriormente mencionados.

Aparelhos e utensílios:

- Balança com sensibilidade de $\pm 0,1$ g;
- Série de peneiros ASTM com malha quadrada com as seguintes aberturas: 2,00 mm (nº 10) e 0,420 mm (nº 40);
- Almofariz e pilão para desagregar torrões sem alterar o tamanho individual das partículas;
- Repartidores;
- Estufa ventilada capaz de manter a temperatura de 105-110 °C;

Tamanho das amostras:

O Quadro 19 e 20 indicam o tamanho das amostras para a realização dos ensaios de análise granulométrica e limites de consistência, respetivamente.

Quadro 19 – Peso das amostras para realização do ensaio de análise granulométrica de acordo com o tipo de solo e diâmetro nominal das maiores partículas (Adaptado de E 195-1966, 1966).

Tipo de solo		Massa mínima aproximada da fração passada no peneiro de 2,00 mm (nº10)	
		g	
Arenoso		115	
Siltoso		65	
Argiloso		65	
Diâmetro nominal das maiores partículas		Massa mínima aproximada da fração retida no peneiro de 2,00 mm (nº10)	
Mm		g	
9,51		500	
19,0		1000	
25,4		2000	
38,1		3000	
50,8		4000	
76,1		5000	

Quadro 20 – Tamanho das amostras para realização dos ensaios de limite de liquidez e plasticidade (Adaptado de E 195-1966, 1966).

Ensaio		Massa mínima aproximada da fração passada no peneiro 0,420 mm (nº40)	
		g	
Limite de liquidez		100	
Limite de plasticidade		20	

3.1.1. Procedimento para obtenção das amostras para realização do ensaio de análise granulométrica:

1. Deixar a amostra secar ao ar, à temperatura ambiente, até se apresentar bem seca;
2. Desagregar os torrões com a ajuda do almofariz e pilão, de forma a não reduzir o tamanho individual das partículas;

-
3. Com a ajuda do repartidor, selecionar uma amostra na quantidade necessária, para obter os valores indicados no Quadro 19;
 4. Pesar na balança e registrar o valor obtido;
 5. Recorrer ao peneiro com abertura de 2,00 mm (nº10) para separar a amostra em duas porções;
 6. Desagregar a amostra retida no peneiro de abertura 2,00 (nº 10) com auxílio do almofariz e pilão;
 7. Passar novamente a amostra desagregada pelo peneiro com abertura de 2,00 mm;
 8. Lavar o material retido no peneiro de abertura 2,00 mm para remoção dos finos e secar na estufa a 105-110 °C;
 9. Pesar o material e registrar o valor como a massa do material grosso;
 10. Para análise dos finos utilizar o material passado pelo peneiro com abertura de 2,00 mm (nº 10), com a massa indicada no Quadro 19, segundo o tipo de solo a ensaiar.

3.1.2. Procedimento para obtenção das amostras para realização dos ensaios de determinação dos limites de consistência:

1. Separar a fração que passa no peneiro com abertura 2,00 mm (nº10) com auxílio do peneiro com abertura 0,420 mm (nº40);
2. Desagregar o material retido no peneiro com abertura 0,420 mm (nº 40), com a ajuda do almofariz e pilão, de forma a não reduzir o tamanho individual das partículas;
3. Separar novamente, com recurso ao peneiro de abertura 0,420 mm, o material desagregado;
4. Voltar a repetir o ponto 2 até resultar uma pequena quantidade de material desagregado passado no peneiro de abertura 0,420 mm (nº40);
5. Rejeitar o material retido no peneiro 0,420 mm (nº40) e o material obtido pelas operações de desagregação e peneiração e guardar para futura realização dos ensaios.

3.2. Análise granulométrica por peneiração húmida

O ensaio é apenas aplicado a partículas do solo com dimensões superiores a 0,074 mm, para identificar as dimensões de partículas inferiores aplica-se o ensaio de sedimentação (*tópico 3.3.*). A análise granulométrica por peneiração consiste em peneirar um solo, para determinar as dimensões das partículas existentes no mesmo e assim poder identificá-lo com maior exatidão.

Este protocolo foi realizado com base na norma em vigor E 239-1970.

Aparelhos e utensílios:

- Série de peneiros ASTM com malha quadrada com as seguintes aberturas: 76,10 mm, 50,80 mm, 38,10 mm, 25,40 mm, 19,00 mm, 9,51 mm, 4,76 mm (nº 4), 2,00 mm (nº 10), 0,841 mm (nº 20), 0,420 mm (nº 40), 0,250 mm (nº 60), 0,105 mm (nº 140) e 0,074 mm (nº 200);
- Balança com sensibilidade de $\pm 0,01$ g, $\pm 0,1$ g e ± 1 g;
- Estufa ventilada capaz de manter a temperatura de 105-110 °C;
- Almofariz e pilão para desagregar torrões sem alterar o tamanho individual das partículas;
- Repartidores;
- Copo de precipitação de 500 cm³;
- Hexametáfosfato de sódio comercial;
- Vareta de vidro;
- Frasco de lavagem por esguicho.

3.2.1. Procedimento para a análise granulométrica da fração retida no peneiro 2,00 mm (nº 10):

1. Preparar a amostra com o auxílio do *tópico 3.1.* e com as pesagens mínimas indicadas no Quadro 19;
2. Peneirar o material grosso seco na estufa com o auxílio da série de peneiros com malha quadrada superior a 2,00 mm;
3. Começar pelo peneiro de maior abertura, executar a peneiração com movimentos horizontais de translação e rotação, nunca se deve manipular a passagem das partículas;

-
4. A peneiração é concluída quando após 1 minuto não passar mais de 1% do material retido no peneiro;
 5. Realizar os passos mencionados para todos os peneiros de malha superior a 2,00 mm e registar as massas do material retido em cada peneiro, com o auxílio de uma balança.

3.2.2. Procedimento para a análise granulométrica da fração passada no peneiro 2,00 mm (nº 10):

1. Preparar a amostra com o auxílio do *tópico 3.1.* e com as pesagens mínimas indicadas no Quadro 19;
2. Secar o material na estufa a 105-110 °C e pesar cerca de 100 g (solos arenosos) ou 50g (solos siltosos ou argilosos) para execução do ensaio;
3. Juntar 250 cm³ de água com 0,5 g de hexametáfosfato de sódio comercial;
4. Juntar a solução ao solo num copo de precipitação;
5. Agitar com uma vareta de vidro e deixar repousar por 1 hora, agitando de vez em quando;
6. Após uma hora passar toda a solução para o peneiro de abertura 0,074 mm e lavar o material;
7. Secar o material retido no peneiro numa estufa a 105-110 °C;
8. Peneirar o material fino seco na estufa com o auxílio da série de peneiros com malha quadrada inferior a 2,00 mm;
9. Começar pelo peneiro de maior abertura. Executar a peneiração com movimentos horizontais de translação e rotação, nunca se deve manipular a passagem das partículas;
10. A peneiração é concluída quando após 1 minuto não passar mais de 1% do material retido no peneiro;
11. Realizar os passos mencionados para todos os peneiros de malha inferior a 2,00 mm e registar as massas do material retido em cada peneiro, com o auxílio de uma balança.

Cálculos:

Após realização do ensaio e de serem registadas todas as massas, segue-se a realização dos cálculos indicados da Equação 6 à 10, que permitem a elaboração da curva granulométrica.

Equação 6 – Percentagem de material grosso (Fonte: E 239-1970).

$$N'_{10} = \frac{m_{10}}{m_t} \times 100$$

Equação 7 – Percentagem de material fino (Fonte: E 239-1970).

$$N''_{10} = \frac{m'_{10}}{m_t} \times 100$$

Equação 8 – Massa total da amostra (Fonte: E 239-1970).

$$m_t = m_{10} + m'_{10}$$

Equação 9 – Percentagem de material retida em cada peneiro (Fonte: E 239-1970).

$$N_s = \frac{m_s}{m_t} \times 100$$

Equação 10 – Percentagem acumulada do material que passa em cada peneiro (Fonte: E 239-1970).

$$N''_s = 100 - N'_s$$

Onde:

N'_{10} – Percentagem de material grosso;

m_{10} – Massa total da fração retida no peneiro de abertura 2,00 mm (nº10);

m_t – Massa total da amostra;

N''_{10} – Percentagem de material fino;

m'_{10} – Massa total da fração passada no peneiro de abertura 2,00 mm (nº10);

N_s – Percentagem de material retido em cada peneiro;

m_s – Massa do material retido no peneiro;

N''_s – Percentagem acumulada do material que passa em cada peneiro;

N'_s – Percentagem retida acumulada, obtida no peneiro anterior.

3.3. Ensaio de sedimentação

Neste caso prático o ensaio de sedimentação vem complementar o ensaio de análise granulométrica, com vista a determinar as dimensões do material que não é possível ensaiar na peneiração, ou seja, as partículas que passam o peneiro com abertura de 0,074 mm (nº200).

O presente procedimento foi elaborado com base na norma do LNEC E 196-1966.

Aparelhos e utensílios:

- Água destilada;
- Densímetro graduado em intervalos de densidade de 0,001;
- Termómetro graduado de 0-50 °C, com erro inferior a $\pm 0,5$ °C;
- Proveta graduada com 100 cm³ e 1000 cm³;
- Régua graduada em milímetros;
- Rodela de papel de filtro;
- Frasco de lavagem por esguicho.

Procedimento:

1. Recorrer ao material fino descartado na realização do ensaio de análise granulométrica por peneiração húmida e colocar numa proveta com água destilada até à marca 1000 cm³;
2. Tapar a proveta e agitar vigorosamente;
3. Colocar a proveta na bancada e ativar o cronómetro;
4. Introduzir o densímetro até uma profundidade ligeiramente superior à posição de flutuação e deixar flutuar livremente;
5. Registrar o valor ao fim de 1 min, 2 min e 5 min;
6. Retirar o densímetro da proveta lentamente (10 segundos), para não interferir com a sedimentação das partículas e conservar o mesmo numa proveta com água destilada à mesma temperatura da suspensão;
7. Colocar o densímetro para efetuar leituras aos: 15 min, 30 min, 60 min, 250 min, 1440 min (24 horas) e 2880 min (48 horas);
8. Após realizada cada leitura (L_s), efetuar o mesmo passo referido no passo 6 e colocar uma rodela de papel de filtro sobre a proveta.

Cálculos:

Após realizado o ensaio de sedimentação e efetuada a leitura do densímetro é necessário corrigi-la tendo em conta a Equação 11.

Equação 11 – Leitura do densímetro corrigida (Fonte: LNEC E 196-1966).

$$L_C = L_S + C_M - C_A + C_T$$

Onde:

L_C – Leitura do densímetro corrigida;

C_M – Correção do menisco;

C_A – Correção do antifloculante;

C_T – Correção da temperatura.

3.4. Determinação de limites de consistência

A determinação dos limites de liquidez e plasticidade é apenas aplicável a solos com cerca de 30%, ou mais, de partículas de dimensões inferiores a 0,05 mm. Logo este ensaio torna-se dispensável para solos arenosos, visto que neste caso ambos os limites são admitidos como nulos.

O procedimento para os limites de consistência foi executado com base na norma portuguesa NP-143, 1969.

3.4.1. Determinação do limite de liquidez

Aparelhos e utensílios:

- Concha de Casagrande (Figura 15);
- Riscador;
- Peneiro ASTM de malha quadrada com 0,420 mm de abertura (nº 40);
- Almofariz e pilão para desagregar torrões sem alterar o tamanho individual das partículas;
- Espátula;
- Cápsula de porcelana ou recipiente de vidro com cerca de 10 cm de diâmetro;
- Água destilada;

-
- Aparelhos e utensílios necessários para realizar o ensaio de determinação do teor de água (tópico 3.5.).



Figura 15 – Concha de Casagrande.

Procedimento:

1. Preparar a amostra com o auxílio do *tópico 3.1.* e com as pesagens mínimas indicadas no Quadro 20, ou seja, 100 g de material passado no peneiro com abertura 0,420 mm (nº40);
2. Amassar o solo com o uso da espátula e água destilada na cápsula de porcelana, durante 5 min, até obter uma pasta homogénea e consistente;
3. Para solos argilosos é aconselhável deixar repousar o material húmido por 24 h num recipiente fechado para a humidade se distribuir uniformemente;
4. Para solos tropicais, principalmente solos lateríticos^[1], pode ser necessário misturá-los por 40 min;
5. Verificar se a concha de Casagrande se encontra limpa e se cai livremente e sem demasiadas folgas;
6. Passar o material para a concha do aparelho de Casagrande e preencher até 2/3 da sua superfície;
7. Com uma espátula alisar o solo e retirar o excesso até se obter uma espessura de aproximadamente 1 cm na zona central da concha (a espessura é confirmada pelo riscador);
8. Fazer uma ranhura no solo com o riscador no sentido longitudinal do aparelho;

¹ “Solo vermelho ou material rico em óxidos de ferro e/ou alumínio secundários, altamente degradados, quase sem bases ou silicatos primários, e com possível conteúdo em grandes quantidades de quartzo e caulinite. Desenvolve-se em clima tropical ou em clima temperado florestal, e é um resíduo ou produto final do intemperismo” (Dutra, 2014).

-
9. Girar a manivela com velocidade constante de duas voltas por segundo e contar o número de golpes até que as duas porções separadas entrem em contacto pela parte inferior do sulco numa extensão de 1 cm;
 10. Retirar cerca de 10 g de material do local onde ocorreu a união e determinar o teor de água da amostra com recurso ao protocolo identificado no *tópico 3.5*;
 11. Colocar o material que sobrou na cápsula de porcelana e adicionar mais água para repetir o processo por mais três vezes. Neste ponto, o objetivo é que as pancadas necessárias para fechar o sulco variem entre 10-40, em que dois ensaios devem ser abaixo de 25 pancadas e os outros dois acima.

3.4.2. Determinação do limite de plasticidade

Aparelhos e utensílios:

- Placa de vidro plana;
- Peneiro ASTM de malha quadrada com 0,420 mm de abertura (nº 40);
- Cápsula de porcelana ou recipiente de vidro com cerca de 10 cm de diâmetro;
- Água destilada;
- Espátula;
- Aparelhos e utensílios necessários para realizar o ensaio de determinação do teor de água (*tópico 3.5*).

Procedimento:

1. Preparar a amostra com o auxílio do *tópico 3.1*. e com as pesagens mínimas indicadas no Quadro 20, isto é, 20 g de material passado no peneiro com abertura 0,420 mm (nº40);
2. Amassar o solo com o uso da espátula e água destilada na cápsula de porcelana, até que a massa se torne suficientemente plástica para permitir moldar com facilidade quatro esferas de diâmetros semelhantes;
3. Rolar uma das amostras esféricas, com a palma da mão, sobre a placa de vidro, até se obter um cilindro com diâmetro de 3 mm;
4. Caso ocorra a rotura do filamento antes de atingir os 3 mm, adicionar mais água ao solo. No caso de não romper, moldar novamente o solo em forma de bola e repetir o procedimento até se observar a rotura do filamento quando o seu diâmetro atingir 3 mm;

-
5. Aglomerar os filamentos e obter o teor de água com recurso ao procedimento e material indicado no *tópico 3.5.*;
 6. Repetir as operações indicadas para cada um dos restantes provetes.

3.5. Teor de água

O teor de água corresponde à percentagem de água que evapora após o solo ser colocado à temperatura de 105°C a 110°C. No entanto, há que ter em atenção que para solos constituídos por gesso é aconselhável a aplicação do ensaio a uma temperatura inferior a 80°C. Sendo que, para a maioria dos solos é suficiente uma secagem na estufa de 16-24 horas.

O procedimento que se segue foi elaborado com base na norma portuguesa NP-84, 1965.

Aparelhos e utensílios:

- Balança com limite de erro de 0,025% da massa do provete;
- Série de peneiros ASTM com malha quadrada com as seguintes aberturas: 2,00 mm (nº 10) e 0,420 mm (nº 40);
- Estufa ventilada capaz de manter a temperatura de 105-110°C;
- Recipiente para provete, de boca larga circular, com tampa que vede bem e resistente ao calor e humidade;
- Exsicador com sílica-gel anidra, para conservação dos provetes com massa de pelo menos 30 g.

Provetes:

- Se mais de 80% da massa das partículas passar no peneiro de abertura 2,38 mm (nº 8), é necessário tomar um provete de, pelo menos, 30 g;
- Se mais de 80% da massa das partículas passar no peneiro de abertura 19,1 mm, mas não passar no peneiro de abertura 2,38 mm (nº 8), é necessário tomar um provete de, pelo menos, 300 g;
- Se mais de 80% da massa das partículas passar no peneiro de abertura 38,1 mm, mas não passar no peneiro de abertura 19,1 mm, é necessário tomar um provete de, pelo menos, 2000 g.

Procedimento:

1. Secar o recipiente e a tampa, pesar e registar o valor (m_1);
2. Colocar o provete o mais rápido possível no recipiente e tapar o mesmo;
3. Pesar o recipiente com a amostra e registar o valor (m_2);
4. Colocar o recipiente na estufa sem tampa e secar entre 105-110 °C, até que a diferença de pesagens efetuadas a intervalos de cerca de 4h não seja superior a 0,1% da massa inicial do provete;
5. Retirar o recipiente da estufa, pesar e registar o valor (m_3).

Cálculos:

Obtidos os três valores referidos no processamento calcula-se o teor de água a partir da Equação 12.

Equação 12 – Teor de água (Fonte: NP-84, 1965).

$$\frac{m_2 - m_3}{m_3 - m_1} \times 100$$

Onde:

m_1 – Massa do recipiente (g);

m_2 – Massa do recipiente e do provete antes da secagem (g);

m_3 – Massa do recipiente e do provete seco (g).

3.6. Azul de metileno

Este ensaio consiste na aplicação de uma solução de azul de metileno para verificar a adsorção do mesmo pelo provete. O valor de azul de metileno é expresso em gramas de corante adsorvido por quilogramas da fração granulométrica ensaiada. Porém, quanto maior a quantidade de azul metileno aplicado no solo, maior será a superfície específica e plasticidade do solo em estudo.

Como não se encontra em vigor nenhuma norma portuguesa para realização do ensaio, o procedimento que se segue foi realizado com base na norma francesa NF P 94-068. No entanto, alguns aspetos sofreram alterações para se adaptar a técnica à solução solo-polímero.

Aparelhos e utensílios:

- Solução corante de 1 g de azul-de-metileno para 100 ml de água;

-
- Pipeta graduada de 10 ml;
 - Papel de filtro, quantitativo e isento de cinzas (< 0,010 %); 95 g/m²; espessura 0,20 mm; velocidade de filtração 75 s; tamanho de poros 8 µm;
 - Vara de vidro de comprimento 300 mm e de diâmetro 8 mm;
 - Agitador de ventoinha, com velocidade de rotação variável controlável até 600 ± 60 rotações/minuto com três ou mais lâminas de ventoinha de 75 ± 10 mm de diâmetro;
 - Balança, com a exatidão de ± 0,1 % da massa a pesar;
 - Cronómetro, com a exatidão de 1 s;
 - Peneiro ASTM com abertura de 2,00 mm (nº 10) e, se necessário, um peneiro de resguardo;
 - Gobelé de vidro com capacidade de cerca de 1000 cm³;
 - Estufa ventilada capaz de manter a temperatura de 105-110 °C;
 - Termómetro, com exatidão de ± 1 °C;
 - Espátula.

Provetes:

- Para solos arenosos: provete com massa mínima de 60 g;
- Para solos argilosos: provete com massa de 30-60 g.

Procedimento:

1. São preparados os provetes de acordo com o tipo de solo;
2. Colocar 500 ± 5 ml de água destilada no gobelé, adicionar o provete de ensaio seco e mexer com a espátula;
3. Regular o agitador para uma velocidade de 600 rotações/minuto e posicionar a ventoinha a cerca de 5 mm acima da base do copo;
4. Ligar o agitador, iniciar o cronómetro e agitar o conteúdo do gobelé por 5 min;
5. Injetar uma dose de 5 ml de solução corante de azul-de-metileno no gobelé;
6. Voltar a agitar a uma velocidade 400 ± 40 rotações/minuto, durante pelo menos 1 min ± 10 s e efetuar um ensaio da mancha sobre o papel de filtro. O ensaio da mancha consiste em retirar uma gota de suspensão com a ajuda da vara e depositá-la sobre o papel de

filtro. A mancha que se forma é composta por uma zona central de material depositado, geralmente de cor azul escura, rodeada por uma zona húmida sem cor. O ensaio é considerado positivo se, na zona húmida, uma auréola persistente azul clara de cerca de 1 mm de espessura se formar à volta do depósito central (Figura 16).

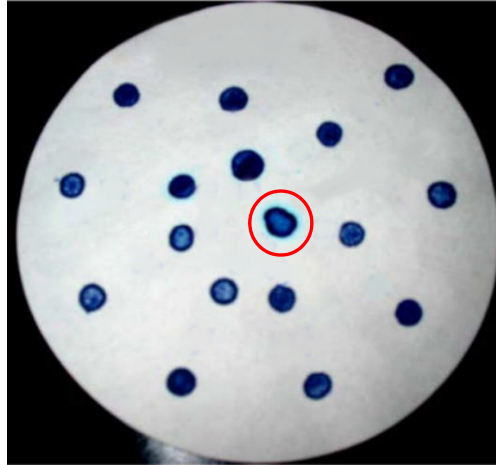


Figura 16 – Auréola azul permanente no ensaio de azul de metileno (Fonte: Dias, 2016).

7. Se a auréola não aparecer, voltar a efetuar o passo 5 e 6;
8. Quando a auréola aparecer, continuar a agitar, sem mais adições de solução corante, e efetuar ensaios da mancha em intervalos de $1 \text{ min} \pm 10 \text{ s}$, durante 5 min.
9. Se a auréola desaparecer antes dos 5 minutos adicionar mais 2 ml de solução corante;
10. Continuar a agitar durante $1 \text{ min} \pm 10 \text{ s}$ e proceder a tantos ensaios da mancha quantos necessários até a auréola persistir durante 5 min.

3.7. Massa específica

Este procedimento foi realizado com base na norma portuguesa NP-83 1965 e define o peso por unidade de volume do solo com recurso ao picnómetro.

Aparelhos e utensílios:

- Picnómetro de, pelo menos, 100 cm^3 ou de cerca de 500 cm^3 ;
- Peneiro ASTM de malha quadrada de abertura 4,76 mm (n.º 4), com fundo e tampa;
- Termómetro graduado de 0 a 50°C , com erro inferior a $\pm 0,5^\circ\text{C}$;
- Cápsula de porcelana;
- Balança com limites de erro de $\pm 0,1 \text{ g}$;
- Estufa ventilada capaz de manter a temperatura de $105\text{-}110^\circ\text{C}$;

-
- Exsicador com sílica-gel de 20 a 25 cm de diâmetro.

Procedimento:

1. É tomada uma porção de 25 g de solo seco constituído por partículas que passam no peneiro com abertura de 4,76 mm (nº 4);
2. Deslocar o provete para o picnómetro;
3. Encher até cerca de 3/4 da capacidade com água destilada, isenta de ar, e deixar embeber durante pelo menos 12 horas. O ar remanescente é extraído utilizando um exsicador de vácuo. Deixar o picnómetro em repouso até que o seu conteúdo atinja a temperatura ambiente;
4. Acrescentar água destilada até ao traço de referência, enxugar cuidadosamente e pesar;
5. Verificar a temperatura do conteúdo do picnómetro.

3.8. Resistência ao corte direto

Este ensaio especifica a realização do ensaio de resistência ao corte direto realizado em solos e é de possível realização tanto em solos intactos, como em amostras remexidas. A realização deste protocolo foi executada com base na norma ASTM D3080/D1080M - 11.

Aparelhos e utensílios:

- Estufa ventilada capaz de manter a temperatura de 105-110°C;
- Balança, com a precisão-de $\pm 0,1$ % da massa a pesar;
- Caixa de corte quadrangular bipartida de aço inoxidável, bronze ou alumínio, com orifícios para drenagem na parte superior e inferior. Largura mínima de 50 mm.
- Placa rugosa com orifícios de óxido de alumínio ou metal que não esteja sujeito a corrosão quando em contacto com o solo;
- Papel de filtro, quantitativo e isento de cinzas (< 0,010 %); 95 g/m²; espessura 0,20 mm; velocidade de filtragem 75 s; tamanho de poros 8 µm;
- Máquina de resistência ao corte de acordo com as normas ASTM D3080 (Figura 17).

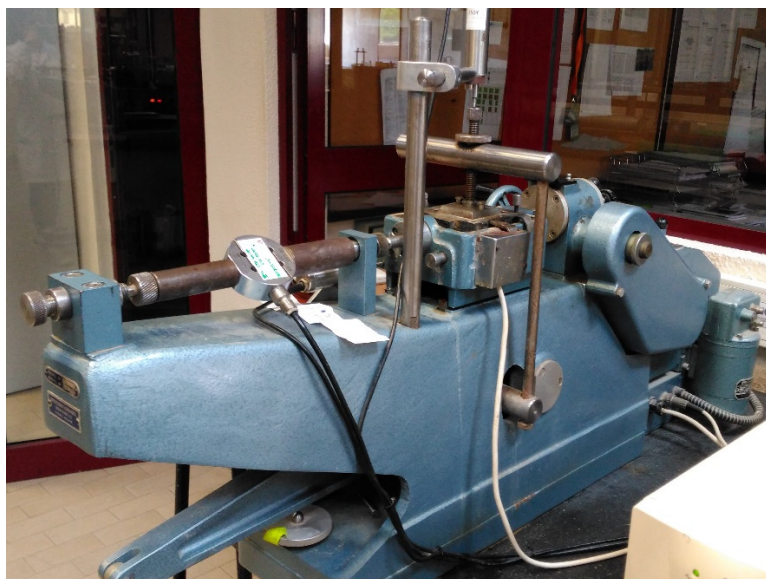


Figura 17 – Máquina de resistência ao corte.

Provetes:

- Proвете remexido – Os provetes devem ser homogêneos e separar as quantidades necessárias para cada provete a ensaiar. Misturar o material com água para obter a densidade e teor de água previamente definidas e de modo a representar as condições *in situ*, o Quadro 21 indica o tempo em que o solo deve permanecer em repouso após a colocação de água. O provete é moldado no anel com o auxílio de um pilão cuja área não pode ser superior a $\frac{1}{2}$ da área do provete.

Quadro 21 – Tempo mínimo necessário de repouso após a colocação de água de acordo com o tipo de solo (Fonte: ASTM D3080, 1998).

Classificação USCS	Tempo mínimo de espera (h)
SW, SP	Sem exigências
SW-SM, SP-SM, SM (>5% de finos)	3
SC, ML, CL, SP-SC	18
MH, CH	36

Procedimento:

1. Obter o provete com a baridade e teor de água que teria em condições de campo;

2. Montar a caixa bipartida com a ajuda dos parafusos de alinhamento;
3. Colocar a base, seguida da placa rugosa;
4. Colocar a pedra porosa humedecida, juntamente com o papel de filtro;
5. Compactar o material dentro da caixa de corte, com o auxílio do anel e do pilão;
6. Colocar o papel de filtro humedecido, seguido da pedra porosa e da tampa da caixa de corte;
7. Colocar a caixa de corte em consolidação, segundo o tempo indicado no Quadro 22;
8. Posicionar e alinhar a caixa de corte na máquina de resistência ao corte, garantir que a parte fixa da caixa se encontra fixa;
9. Alinhar o sistema de aplicação de tensão normal de forma a que este esteja centrado na caixa de corte:
10. Ajustar o sistema responsável pela aplicação da força de corte;
11. Posicionar o medidor de deslocamento horizontal e vertical;
12. Colocar água na caixa exterior;
13. Retirar os parafusos de alinhamento e obrigar a um deslocamento vertical das metades da caixa de corte, para garantir a inexistência de atrito;
14. Iniciar o ensaio e o programa que garante o registo dos valores de deslocamento, bem como da reação aplicada pelo anel dinamométrico.

Quadro 22 – Tempo mínimo necessário de consolidação de acordo com o tipo de solo (Fonte: ASTM D3080, 1998).

Classificação USCS	Tempo mínimo de consolidação
SW, SP (5% de finos)	10 min
SW-SM, SP-SM, SM (>5% de finos)	60 min
SC, ML, CL, SP-SC	200 min
MH, CH	24 h

Cálculos:

Para obtenção da curva tensão-deformação é necessário implementar a Equação 13 e 14, tendo em conta os valores retirados na execução do ensaio.

Equação 13 – Tensão de corte que atua no solo (Fonte: ASTM D3080, 1998).

$$\tau = \frac{F}{A}$$

Equação 14 – Tensão normal aplicada no solo (Fonte: ASTM D3080, 1998).

$$n = \frac{N}{A}$$

Onde:

τ - Tensão de corte (KPa);

F – Força tangencial aplicada (N);

A – Área do provete (mm²).

n – Tensão normal (KPa);

N – Força normal aplicada (N).

3.9. Condutividade elétrica

A condutividade elétrica é realizada em solos para determinar a salinidade dos mesmos. Como este ensaio não apresente norma portuguesa, o procedimento que se segue, foi realizado com base na norma australiana C1A/3.

Aparelhos e utensílios:

- Água destilada;
- Solução de cloreto de potássio, com 0,746 g de cloreto de potássio por litro de solução;
- Medidor de condutividade (Figura 18) e célula;
- Recipientes para agitação;
- Peneiro ASTM de malha quadrada de abertura de 2,00 mm (nº 10), com fundo e tampa.



Figura 18 – Medidor de condutividade elétrica.

Procedimento:

1. Preparar uma suspensão de solo com água destilada numa relação de 1:5, ou seja, pesar 10 g de solo passado no peneiro de 2,00 mm de abertura e adicionar 50 ml de água destilada;
2. Agitar mecanicamente a solução a 15 rpm durante uma hora para dissolver os sais solúveis;
3. Calibrar o medidor de condutividade de acordo com as especificações do fabricante recorrendo à solução de cloreto de potássio preparada (esta solução tem uma condutividade elétrica de 1,413 dS/m, a 25°C);
4. Encher a célula de condutividade elétrica sem redistribuir manualmente o solo;
5. Lavar a célula com água destilada e executar a próxima medição.

3.10. Análise química quantitativa por espectrometria de fluorescência de raios x equipamento portátil

A análise química é realizada numa pequena quantidade de solo com vista a verificar os elementos químicos presentes no mesmo. Este procedimento foi realizado com base num procedimento interno do LGMC.

Aparelhos e utensílios:

- Peneiro ASTM de malha quadrada de abertura 0,063 mm, com fundo e tampa;
- Copos de amostra;

-
- Analisador por fluorescência de Raios X *NITON XL3t 900* (Figura 19);
 - Câmara de suporte (Figura 19);
 - Computador com software *NDT – transferência de dados NITON*.

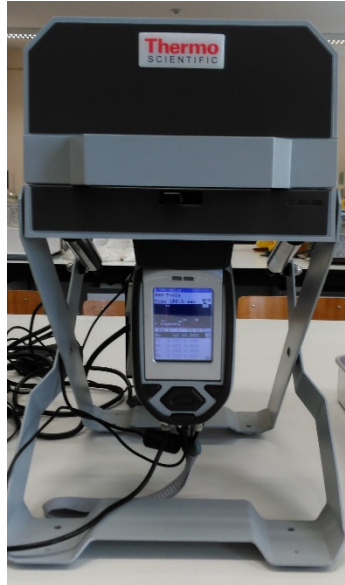


Figura 19 – Câmara de suporte e analisador por fluorescência de raios X.

Procedimento:

1. Separar recorrendo ao peneiro de abertura 0,063 mm uma fração do solo para uso do material passante;
2. Introduzir o pó no copo de amostra devidamente acondicionado e verificar se não existem vazios entre as partículas;
3. Inserir a amostra numa câmara suporte para a realização do ensaio;
4. Fazer a ligação do analisador a um computador com o *software* adequado (*NDT – transferência de dados NITON*), o qual possibilita a elaboração de relatórios de registo dos vários elementos detetados na amostra, em percentagem;
5. Realizar três leituras para cada provete.

3.11. Ensaio de equivalente de areia

O ensaio de equivalente de areia tem como finalidade adquirir a quantidade e qualidade dos elementos finos plásticos existentes num solo. O presente processamento foi realizado com base na norma E 199-1967.

Aparelhos e utensílios:

- Solução concentrada, contendo por litro: 111 ± 1 g de cloreto de cálcio cristalizado anidro (produto puro); 480 ± 5 g de glicerina a 99 % de glicerol (produto farmacêutico); 12 a 13 g de formaldeído a 40% em volume (produto farmacêutico); água destilada até perfazer 1000 cm^3 ;
- Solução diluída, preparada a partir de uma toma de $125 \pm 1 \text{ cm}^3$ de solução concentrada, adicionar água destilada até perfazer $5 \pm 0,05 \text{ dm}^3$, e agitar vigorosamente;
- Proveta cilíndrica transparente com diâmetro exterior de $40 \pm 0,5$ mm, diâmetro interior de $32 \pm 0,5$ mm e altura de $430 \pm 0,25$ mm. Na proveta existem duas referências gravadas às alturas de $100 \pm 0,25$ mm e $380 \pm 0,25$ mm, medidas a partir do fundo;
- Tubo de lavagem, constituído por um tubo rígido (aço inoxidável) com $6 \pm 0,5$ mm de diâmetro exterior e $3 \pm 0,2$ mm de diâmetro interior, munido de uma torneira na parte superior e de uma ponta roscada, em metal inoxidável, com forma de cunha. Cada face da cunha tem um furo com $1 \pm 0,1$ mm de diâmetro;
- Recipiente transparente com cerca de 5 dm^3 e um sistema de sifão;
- Tubo de borracha ou plástico, com cerca de 1,5 m de comprimento e 5 mm de diâmetro interior;
- Pistão de metal inoxidável, devidamente tarado, constituído por: uma haste de altura superior a 430 mm; uma base de $25 \pm 0,25$ mm de diâmetro, com face inferior plana. lisa e perpendicular ao eixo da haste, e possuindo três parafusos laterais para centragem, com pequena folga, do pistão na proveta; uma peça guia metálica, de $10 \pm 0,1$ mm de espessura, adaptável à boca da proveta, munida de um parafuso para fixação da haste do pistão, e permitindo guiar esta última, ao mesmo tempo que serve de referência em relação à parte introduzida na proveta; um peso colocado na extremidade superior da haste para completar a tara de 1000 ± 5 g do pistão (excluída a peça metálica com o parafuso de fixação da haste);
- Agitador mecânico, manual ou elétrico, capaz de imprimir à proveta um movimento horizontal, retilíneo, periódico e sinusoidal de 20 ± 1 cm de amplitude com o período de $1/3$ de segundo;
- Peneiro ASTM de malha quadrada e com abertura de 4,76 mm ($n^{\circ}4$), com fundo e tampa;
- Repartidor com 5 mm de abertura;

-
- Funil;
 - Rolha de borracha;
 - Recipiente com 200 cm³;
 - Balança com limite de erro de ± 1 g;
 - Cronómetro;
 - Régua de 50 cm, graduada em milímetros;
 - Espátula;
 - Tabuleiros;
 - Almofariz e pilão.

Provetes:

- Passar o solo pelo peneiro de abertura 4,76 mm (nº 4) até se obter 500 g de solo passado;
- Secar a amostra ao ar e com auxílio do pistão desagregar os torrões e passar novamente pelo peneiro nº 4 (peneiração deve ser executada com o solo ligeiramente húmido para evitar perda de finos);
- Se os elementos retidos no peneiro de 4,76 mm de abertura (nº 4) ainda estiverem envolvidos por uma camada de elementos finos, lavar esta fração e os finos recuperados são adicionados ao material já passado.
- Misturar cuidadosamente as duas frações com uma espátula e esquartejar, se necessário, com o material mais seco;
- Determinar teor de água segundo o processo indicado no *tópico 3.5.*;
- Recolher duas porções de solo, cada uma com 120 g.

Procedimento:

1. Colocar o recipiente com a solução diluída a 1 m de altura do tampo da mesa de trabalho, contabilizando a partir do fundo do recipiente;
2. Transferir a solução para a proveta cilíndrica até atingir o traço de referência inferior;
3. Introduzir na proveta, com o auxílio do funil, o solo;
4. Bater, com a palma da mão, no fundo da proveta, para retirar as bolhas de ar e facilitar a molhagem do solo;

-
5. Deixar repousar por 10 min;
 6. Fechar a proveta com uma rolha de borracha, colocar no agitador e submeter a uma agitação de 90 ± 1 ciclos em 30 ± 1 s;
 7. Retirar a proveta da máquina, colocar na vertical e retirar a rolha de borracha;
 8. Lavar de cima para baixo, com a ajuda do tubo de lavagem, as paredes da proveta;
 9. Introduzir o tubo até ao fundo da proveta, diversas vezes, fazendo subir os elementos argilosos, com movimentos contínuo e lento de vaivém. Este movimento deverá ser acompanhado por um rodar suave do tubo de lavagem, com uma mão, e da proveta em sentido contrário, com a outra mão;
 10. Retirar lentamente o tubo quando atingir o traço superior da proveta. Este deve ser regulado de tal forma para o tubo não sair totalmente antes de ajustar o nível final ao traço de referência;
 11. Deixar repousar, sem perturbações, durante $20 \text{ min} \pm 10 \text{ s}$;
 12. Determinar a altura do nível superior floculado (h_1) e, se possível, do nível superior da parte sedimentada (h'_2), estes valores são lidos com aproximação ao milímetro;
 13. Descer lentamente o pistão na proveta, até repousar sobre a parte sedimentada. Nesta operação, a peça metálica destinada a guiar o pistão deve estar apoiada na boca da proveta. Após o pistão atingir a parte sedimentada, apertar o parafuso da peça guia de encontro à haste;
 14. Determinar a altura entre a face superior da peça guia e a face inferior do peso do pistão (h_3), aproximado ao milímetro;
 15. Determinar a altura do sedimento (h_2) ao subtrai-se a constante do aparelho (k) do h_3 .

Cálculos:

Após realização do ensaio e de todas as alturas indicadas serem determinadas, obtêm-se o equivalente de areia e o equivalente de areia visual de acordo com a Equação 15 e Equação 16.

Equação 15 – Equivalente de areia (Fonte: E 199-1967).

$$\frac{h_2}{h_1} \times 100$$

Equação 16 – Equivalente de areia visual (Fonte: E 199-1967).

$$\frac{h'_2}{h_1} \times 100$$

Onde:

h_1 – Altura do nível superior do floculado em relação ao fundo da proveta;

h_2 – Altura do nível sedimentado determinado com o auxílio do pistão;

h'_2 – Altura do nível superior do sedimentado em relação ao fundo da proveta.

3.12. pH

O procedimento que se segue indica como realizar a determinação eletrométrica do Ph numa suspensão de solo, no entanto este mesmo procedimento pode ser aplicado para obtenção do Ph em amostras de água do solo. O protocolo foi executado com base na norma E 203-1967.

Aparelhos e utensílios:

- Aparelho para determinação do pH, provido de um eletrodo de vidro de um eletrodo de calomelanos de referência, abrangendo o intervalo de pH de, pelo menos 3,0 a 10,0. Limite de erro deve ser $\pm 0,05$ unidade de pH;
- Balança com limite de erro de $\pm 0,001$ g;
- Agitador ou vareta para agitação manual;
- Três copos de 100 cm³ com vidros relógio;
- Dois balões graduado com 500 cm³;
- Frascos de lavagem com esguicho;
- Água destilada.

Reagentes:

- Solução tampão de pH igual a 4 – Dissolver 5,106 g de ftalato ácido de potássio em água destilada e perfazer o volume de 500 cm³ com água destilada;
- Solução tampão de pH igual a 9,2 – Dissolver 9,54 g de tetraborato e sódio (borax) em água destilada e perfazer o volume de 500 cm³ com água destilada;
- Cloreto de potássio – Solução saturada para manutenção do eletrodo de calomelanos;

-
- Água destilada fervida e conservada num balão pirex ou vidro e fechados com a água ainda quente.

Procedimento:

1. Pesar 30 g de acordo com o procedimento mencionado no *tópico 3.1.*;
2. Adicionar o provete num copo com capacidade de 100 cm³;
3. Acrescentar ao copo 75 cm³ de água destilada fervida;
4. Agitar cuidadosamente por alguns minutos até misturar bem ambos os produtos;
5. Deixar repousar várias horas, de preferência durante a noite;
6. Calibrar o aparelho para determinar o pH, com a ajuda de uma solução tampão (*Tópico 3.12.*) e de acordo com o processo recomendado pelo fabricante;
7. Agitar a mistura;
8. Lavar os elétrodos com água destilada e mergulhar na suspensão agitada;
9. Repetir o passo 7 e 8 até obter duas ou três leituras, as leituras não devem diferenciar de 0,05 unidades de pH e só são realizadas leituras após 1 min o valor das leituras ser constante;
10. Retirar os elétrodos da suspensão e lavar com água destilada;
11. Mergulhar os elétrodos na solução tampão com o pH mais próximo do solo para calibração, se as unidades de pH diferirem mais de 0,05 do valor correto é necessário retomar ao ponto 6.

3.13. Viscosidade de Brookfield

O procedimento que se segue indica os passos a tomar para obter a viscosidade de brookfield de uma solução. O protocolo foi realizado com base em um procedimento interno da *GEO*.

Aparelhos e utensílios:

- Viscosímetro de Brookfield digital – Modelo DV-II;
- ULA Spindle;
- Termómetro calibrado e graduado em 0,1 °C;
- Sala termostática;

-
- Recipiente para colocação da amostra.

Procedimento:

1. Verificar se o equipamento se encontra nivelado;
2. Ligar o equipamento e realizar a calibração;
3. No menu, indicar o spindle utilizado, a velocidade a que o ensaio será realizado, selecionar 20 segundos para o intervalo de dados e 15 minutos de duração;
4. Medir 16 ml de solução e colocar no recipiente;
5. Mergulhar o spindle na amostra e garantir que o mesmo não toca nem no fundo, nem nos lados do recipiente;
6. Pressionar em começar e aguardar 16 minutos para obter os dados do ensaio.

4 – Apresentação e Discussão de Resultados

(página propositadamente em branco)

4. Apresentação e discussão de resultados

4.1. Material de estudo

Para realização de todos os protocolos referidos no *capítulo 3* serão utilizados os materiais indicados no Quadro 23. Porém, todos os dados referidos no Quadro 23 remetem ao estudo realizado por Dias (2016). Sendo que, os valores obtidos nos ensaios realizados no presente trabalho serão expostos e analisados a partir do *tópico 4.2.*

As siglas de cada solo foram obtidas segundo o local de origem de cada um. O PT_X e o PT_G correspondem a solos portugueses, sendo que um é oriundo de xistos e outro de granitos, respetivamente. Por outro lado, os solos IN₁ e IN₂ são solos provenientes da Índia e o ML_K da Malásia.

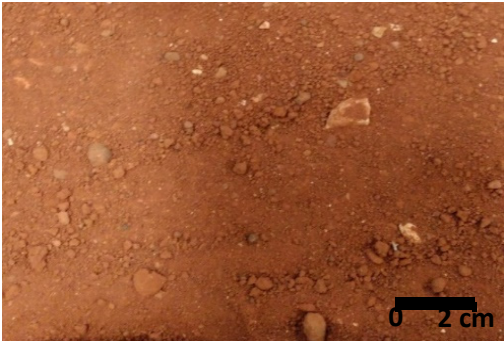
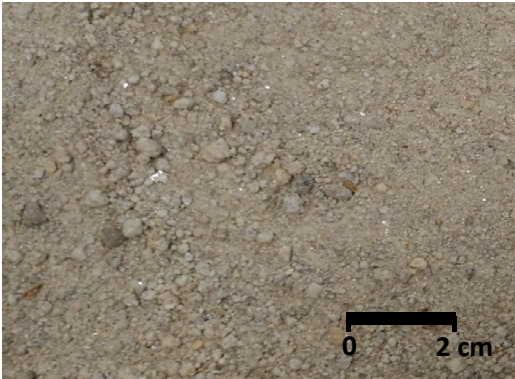
Para o presente trabalho, em primeira fase será importante verificar se os dados obtidos por Dias (2016) correlacionam com os valores obtidos nos ensaios realizados. Em segunda fase será importante constatar qual a melhoria nos materiais após a aplicação do polímero.

A empresa GEO utiliza em obra uma concentração de 0,1% de polímero, esta concentração será abreviada ao longo do trabalho como 1/1, ou seja é aplicado 1 grama de polímero em 1 litro de água. Porém, neste estudo serão utilizadas também concentrações de 0,05% e 0,15% para verificar qual a implicação da concentração de polímero nos solos, nos diferentes parâmetros a estudar. Estas concentrações serão abreviadas ao longo da dissertação como 0,5/1 e 1,5/1.

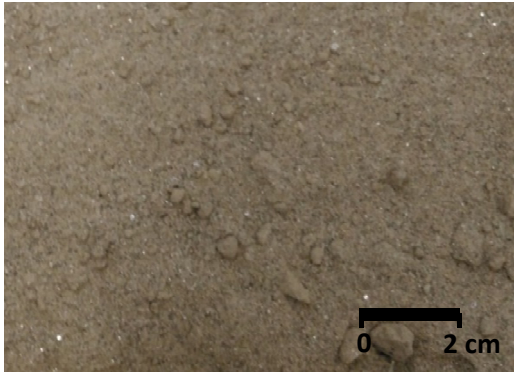
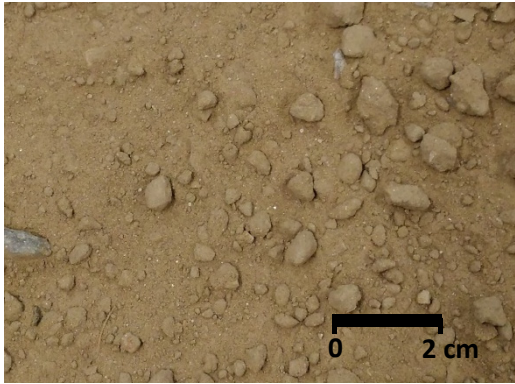
Quanto aos solos a aplicar neste trabalho verifica-se que vai ser estudado uma argila (PT_X), enquanto os restantes solos correspondem a areias, no entanto bastante distintas na sua composição, sendo o IN₂ o que apresenta maior quantidade de finos, dentro das areias.

No que toca ao estudo a realizar o objetivo é verificar qual o comportamento do polímero para diferentes cenários, ou seja, para areias, siltes e argilas. Como tal, a diferente composição dos solos em estudo poderá ajudar na obtenção de dados, ainda que o silte não faça parte dos solos analisados, tal como fez Dias (2016), será necessário basear esse cenário nas areias siltosas, ou seja, o PT_G e o ML_K.

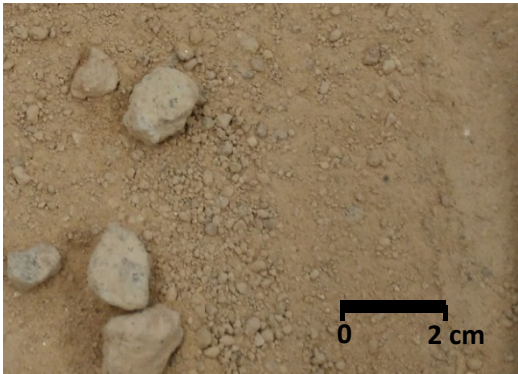
Quadro 23 – Características dos solos em estudo (Adaptado de Dias, 2016).

Características dos solos			
PT _x	Classificação USCS	Argila magra	
	Limite de liquidez (%)	42,55	
	Limite de plasticidade (%)	24,35	
	Índice de plasticidade (%)	18,20	
	Teor de água (%)	7,0	
	Azul de metileno (g de A.M./kg de solo)	22,86	
	Massa específica (ton/m ³)	2,96	
	Equivalente de areia (%)	22,1	
	Condutividade elétrica (μS/cm)	147,9	
PT _G	Classificação USCS	Areia siltosa	
	Limite de liquidez (%)	-	
	Limite de plasticidade (%)	-	
	Índice de plasticidade (%)	-	
	Teor de água (%)	11,8	
	Azul de metileno (g de A.M./kg de solo)	4,16	
	Massa específica (ton/m ³)	3,27	
	Equivalente de areia (%)	79,3	
	Condutividade elétrica (μS/cm)	31,6	

Quadro 23 – Características dos solos em estudo (Adaptado de Dias, 2016) [continuação].

Características dos solos			
IN ₁	Classificação USCS	Areia mal graduada	
	Limite de liquidez (%)	-	
	Limite de plasticidade (%)	-	
	Índice de plasticidade (%)	-	
	Teor de água (%)	21,3	
	Azul de metileno (g de A.M./kg de solo)	1,66	
	Massa específica (ton/m ³)	3,23	
	Equivalente de areia (%)	93,3	
	Condutividade elétrica (μS/cm)	134,4	
IN ₂	Classificação USCS	Areia argilosa	
	Limite de liquidez (%)	22,12	
	Limite de plasticidade (%)	-	
	Índice de plasticidade (%)	22,12	
	Teor de água (%)	7,0	
	Azul de metileno (g de A.M./kg de solo)	7,60	
	Massa específica (ton/m ³)	3,43	
	Equivalente de areia (%)	30,2	
	Condutividade elétrica (μS/cm)	181,8	
	Condutividade elétrica (μS/cm)	232,0	

Quadro 23 – Características dos solos em estudo (Adaptado de Dias, 2016) [continuação].

Características dos solos		
ML _k	Classificação USCS	Areia siltosa
	Limite de liquidez (%)	30,34
	Limite de plasticidade (%)	22,42
	Índice de plasticidade (%)	7,42
	Teor de água (%)	18,0
	Azul de metileno (g de A.M./kg de solo)	3,23
	Massa específica (ton/m ³)	3,17
	Equivalente de areia (%)	39,5
	Condutividade elétrica (μS/cm)	232,0
		

4.2. Análise Granulométrica

Como já foi referido anteriormente, o ensaio de análise granulométrica tem como função identificar a quantidade e dimensão das partículas existente em cada solo, para posterior classificação dos solos. Como tal, o presente ensaio foi realizado sem recorrer ao polímero.

O Quadro 24 indica a percentagem de material de acordo com as suas dimensões, enquanto a Figura 20 e o Anexo I representam as curvas granulométricas de cada solo. Por fim, o Quadro 25 apresenta a classificação dos solos, bem como o coeficiente de uniformidade (C_U) e o coeficiente de curvatura (C_C). Os restantes dados deste ensaio, bem como todos os cálculos auxiliares encontram-se no Anexo II e III.

Para realização das curvas granulométricas, foi necessário ter em conta valores do ensaio de sedimentação, visto que, o ensaio de análise granulométrica só permite registar valores até 0,074 milímetros. Como não foi possível realizar o ensaio de sedimentação em todas as amostras, mais especificamente o PT_x, pois muitas das partículas encontravam-se em suspensão no fluido, o que não possibilitou a medição de resultados e o ML_k, visto que não existia material suficiente para a realização deste ensaio. Como tal, estas curvas encontram-se incompletas na Figura 20.

De acordo com a classificação ASTM é possível verificar que quatro dos solos estudados pertencem a areias e um dos solos corresponde a um silte. Segundo o coeficiente de uniformidade PT_G corresponde a um solo bem graduado, sendo os restantes valores reduzidos, o que é indicador de solos mal graduados.

Quadro 24 – Percentagem de material de cada solo estudado.

	PT_x	PT_G	IN_1	IN_2	ML_K
Seixo (60 - 2 mm)	4%	5%	2%	5%	29%
Areia (2 - 0,06 mm)	68%	77%	85%	45%	48%
Silte (0,06 - 0,002)	38%	13%	9%	44%	23%
Argila (< 0,002 mm)		5%	4%	6%	

Tendo em conta que os cenários a estudar são as areias, siltes e argilas, o PT_G , IN_1 e ML_K irão trazer contributos para areias, visto que o PT_G é composto maioritariamente por areia grossa a média e o IN_1 de areia média a fina, enquanto o ML_K apresenta na sua constituição uma percentagem considerável de seixo (29%). O IN_2 corresponde a um silte, no entanto, ainda apresenta 45% de areia, porém 37% dessa areia é fina. E por último, o PT_x embora corresponda a uma areia argilosa será o único que apresenta argila, embora seja em pequenas quantidades.

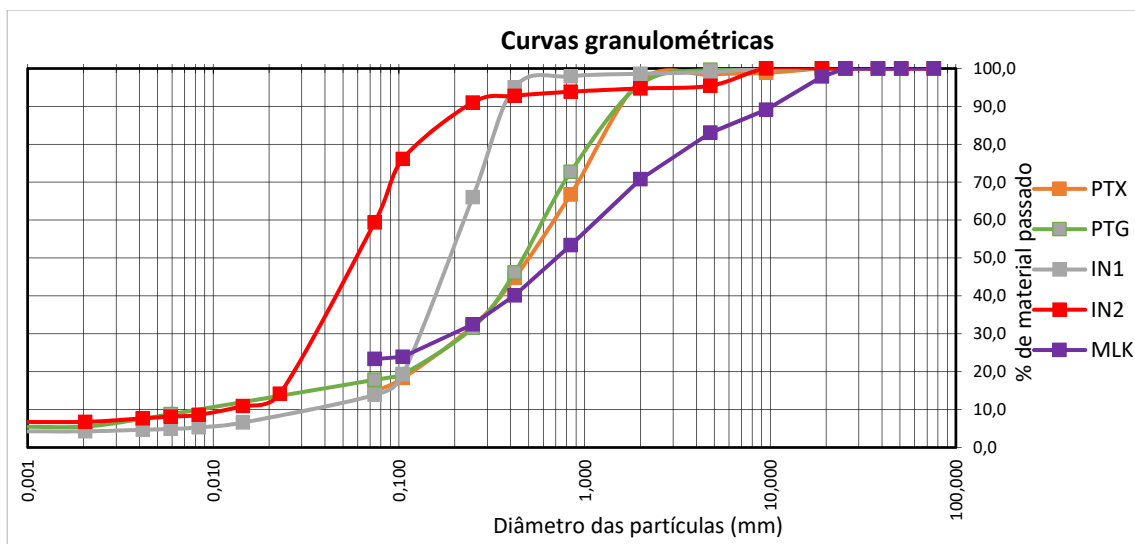


Figura 20 – Curvas granulométricas dos solos

Quadro 25 – Classificação de solos e coeficientes de uniformidade e curvatura.

Classificações	PT _x	PT _G	IN ₁	IN ₂	ML _k
ASTM	SC	SM	SM	ML	SM
	Areia argilosa	Areia siltosa	Areia siltosa	Silte arenoso	Areia siltosa com cascalho
C _u	-	75,00	7,33	6,25	-
C _c	-	10,08	2,97	1,36	-

4.3. Ensaio de sedimentação

A Figura 21 apresenta os valores de densímetro corrigidos de acordo com o tempo em que foram obtidos. O ensaio foi realizado sem e com a aplicação de polímero, os restantes dados deste ensaio encontram-se no Anexo IV e Anexo V.

Tal como é possível verificar na Figura 21, alguns ensaios não apresentam os valores para todos os momentos de registo, isto porque, a solução ensaiada não se encontrava na grelha de leitura do densímetro. Como tal, não foi possível obter nenhum valor para a amostra PT_x e as amostras PT_G +1,5P, IN₁ + 1P e IN₁ +1,5P encontram-se com um número reduzido de dados.

Para todos os solos verifica-se que a sedimentação é mais rápida quando aplicada a proporção 0,5/1 e mais lenta quando utilizada a quantidade 1,5/1. A medida 1/1 apresenta uma velocidade de sedimentação entre as duas proporções já mencionadas.

Segundo a *GEO* o polímero tem a capacidade de acelerar a sedimentação das partículas, esse fenómeno é comprovado a partir dos valores obtidos. Visto que, a *GEO* utiliza uma proporção 1/1 em obra é importante salientar que o IN_1 não apresenta o comportamento esperado, ou seja, ao aplicar a 1/1 de polímero no solo a sedimentação é prejudicada, obtendo uma velocidade de sedimentação inferior à amostra que apenas contém solo.

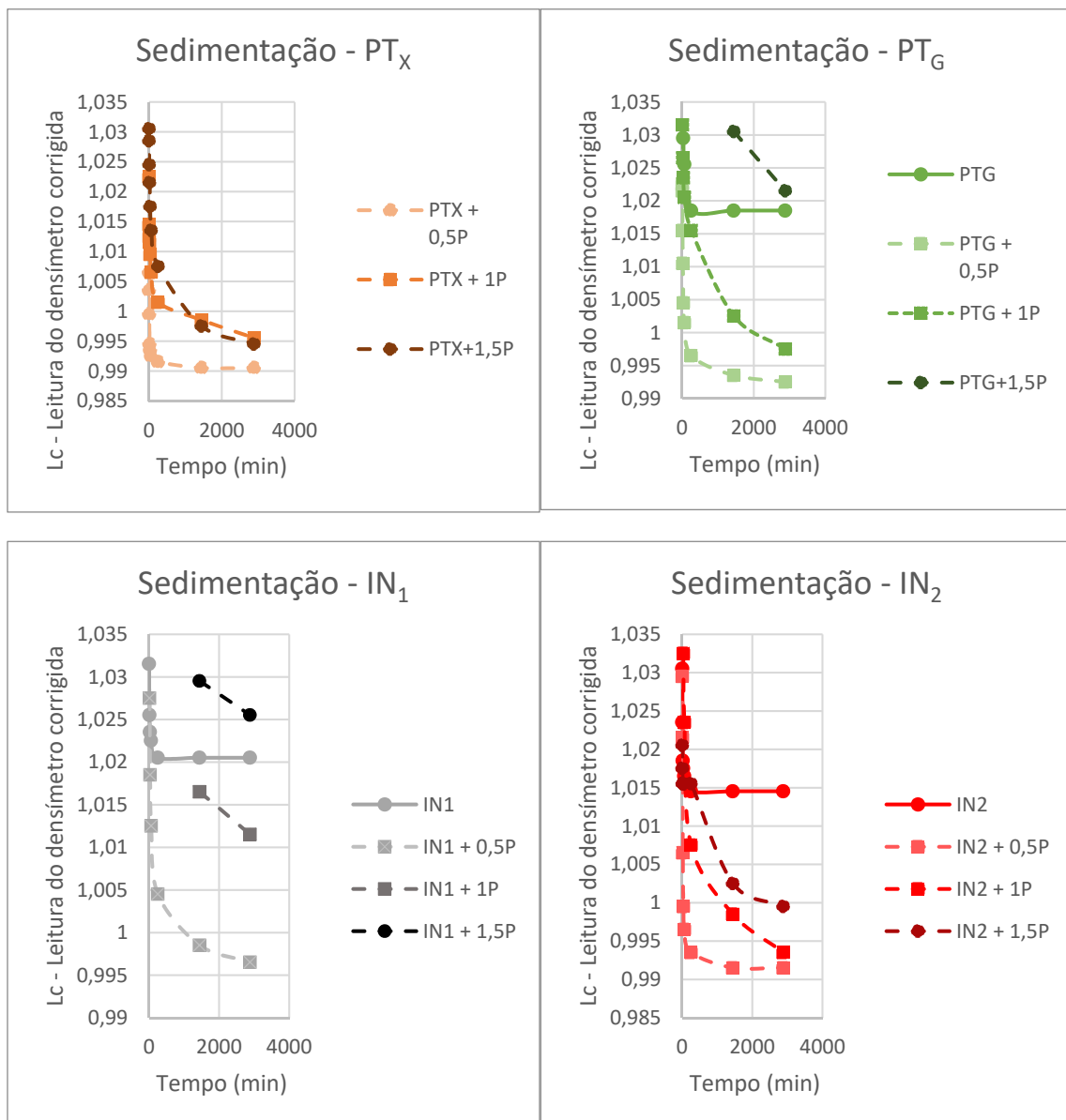


Figura 21 – Valores do densímetro corrigidos em relação com o tempo para os solos com e sem polímero.

Perante os resultados obtidos é possível comprovar que ao aplicar apenas 0,5 gramas de PolyMud® em 1 litro de água no solo a sedimentação das partículas ocorre mais rapidamente. Como tal, tendo em conta apenas esta propriedade a proporção mencionada é a que mais rentabiliza o processo da sedimentação.

Posto isto, é necessário ter em conta se para as restantes características em estudo a proporção 0,5/1 melhora o processo, visto que uma menor concentração de polímero leva à rentabilização económica de todo o processo.

4.4. Limites de consistência

O Quadro 26 indica os valores obtidos tanto para o limite de liquidez, como para o limite de plasticidade, para a amostra sem e com a aplicação de polímero. Os restantes valores dos ensaios e cálculos auxiliares encontram-se no Anexo VI.

No que toca ao LL quanto maior a quantidade de polímero aplicado, maior o valor obtido, ou seja, a amostra para atingir o limite de liquidez necessitava de maior quantidade de água. No entanto, o LP deveria de seguir a mesma lógica de pensamento, o que não se verifica, facto que parece resultar da alteração da viscosidade do meio.

De acordo com Mitchell & Soga (2005) os valores padrão de limites de consistência para caulinite é um LL entre 30-110% e um LP entre 25-40%. De acordo com os dados obtidos para o solo sem aplicação de polímero os limites encontram-se entre este intervalo. Para além disso, o seu índice de plasticidade é superior a 15 e de acordo com Sousa (2011) o PT_x corresponde a um solo de elevada plasticidade.

Ao contrário de Dias (2016), não foi possível realizar os limites de Atterberg para as restantes amostras em estudo, visto que, como já foi indicado no presente trabalho os finos existentes não atingem a quantidade necessária para a realização do ensaio. Todavia, foi realizado o ensaio para o solo IN_2 que demonstrou não ser plástico, nem maleável para a criação do sulco na concha de Casagrande.

De acordo com os dados verifica-se que a aplicação de polímero melhora as características do solo, visto que, para atingir o limite de liquidez e o limite de plasticidade é necessário uma maior quantidade de água. Porém, o ensaio para obtenção do LP deveria ser repetido, visto que seria de esperar um valor mais elevado na proporção 1/1.

Quadro 26 – Limite de liquidez (LL) e limites de plasticidade (LP) obtidos.

		s/polímero	0,5P/1	1P/1	1,5P/1
PT _x	LL (%)	49,60	56,95	63,51	71,09
	LP (%)	25,83	32,25	29,87	36,50
	IP	23,77	24,70	33,64	34,59

4.5. Teor de água

No Quadro 27 estão indicados os valores de teor de água de cada amostra em estudo sem a aplicação de polímero. Porém, a percentagem apresentada não representa o valor do teor de água *in situ*, visto que, as amostras encontram-se fora do seu local original, em tempo indeterminado. Os cálculos auxiliares e restantes dados do ensaio encontram-se no Anexo VII.

Através do Quadro 27 é possível verificar que o PT_x é o material com maior teor de água, sendo os restantes valores bastantes próximos.

Segundo Dias (2016), o IN₁ seria a amostra com maior teor de água, apresentando uma percentagem de 21,3%, enquanto PT_x e IN₂ apresentam o menor, tendo apenas 7%.

Os valores obtidos são justificáveis, pois as amostras foram sujeitas a secagem para realização dos protocolos apresentados na dissertação elaborada por Dias (2016). Sendo assim, o material a ser testado no decorrer deste estudo encontra-se maioritariamente seco.

Na composição das amostras a água é praticamente inexistente, mas não irá causar distúrbios, visto que, grande parte dos protocolos a realizar obrigam a que o material seja previamente seco.

Quadro 27 – Teor em água de cada amostra.

Amostra	PT _x	PT _G	IN ₁	IN ₂	ML _K
Teor em água (%)	4,1	0,3	0,1	0,4	0,3

4.6. Azul de metileno

Este ensaio foi realizado para solo com e sem polímero, a Figura 22 demonstra o comportamento do azul metileno perante a solução solo-polímero. Os dados do ensaio encontram-se no Anexo VIII e a partir do Anexo IX é possível verificar que não se obteve a auréola para nenhum dos solos.

Neste ensaio só é aplicado no máximo 25 mililitros de azul de metileno e esta quantidade não foi suficiente para formar a auréola em nenhuma das amostras.

Quanto à solução solo-polímero e tal como se visualiza na Figura 22, o azul de metileno não se conseguiu misturar com toda a solução, instalando-se maioritariamente à superfície. Como tal, também não foi possível obter valores para a junção do solo com o polímero. Porém, este fator poderá ter sido influenciado pelo fato do goblé utilizado no decorrer do ensaio não respeitar as dimensões exigidas pela norma.

Com a realização deste ensaio, embora não tenha sido possível obter valores, é possível concluir que o polímero realmente ocupa os espaços vazios existentes entre as partículas do solo, interligando-as, e por esse motivo o azul metileno não se misturou com a solução solo-polímero. Por outro lado, o não aparecimento da auréola nos solos, vem comprovar que todos os solos apresentam um índice de vazios significativo, visto que quanto maior o índice de vazios do solo em estudo, maior a quantidade de azul metileno a aplicar para o aparecimento da auréola.

Quanto ao índice de vazios de cada solo, como não se obteve a auréola para nenhum dos solos em estudo não é possível saber qual o solo com menor e maior índice de vazios. Tal como já foi referido, os solos em estudo apresentam menor quantidade de finos no estudo realizado por Dias (2016), ou seja, os espaços que outrora eram ocupados por finos, agora correspondem a espaços vazios. Este fator será comprovado caso no ensaio de obtenção da massa específica dos solos se verifique uma descida nos valores.

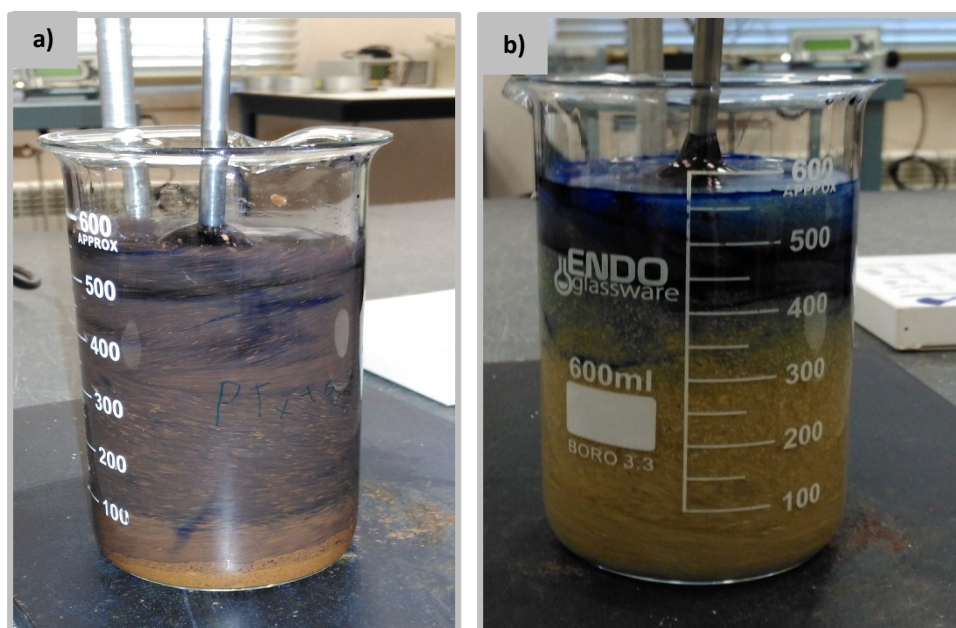


Figura 22 – Interação do azul de metileno com a solução solo-polímero – a) PT_x + Polímero 0,5/1; b) PT_G + Polímero 1,5/1.

4.7. Massa específica

O Quadro 28 apresenta as massas específicas obtidas para cada provete sem a aplicação do polímero, os restantes dados do ensaio encontram-se no Anexo X.

A partir do Quadro 28 é possível averiguar que o provete com maior massa específica corresponde ao IN₁ e, por outro lado, o de menor massa é o PT_G. Também se verifica que os valores obtidos são menores aos apresentados na dissertação de Dias (2016).

Esta diferença é justificada pelo facto do estudo ser realizado com as amostras que restaram do referido estudo e como tal, para realização de alguns protocolos foi necessário recorrer apenas à fração fina do material, o que levou a alterações granulométricas do material em estudo e, conseqüentemente, a alterações na massa específica. Porém, o fato de a massa específica obtida ter sido inferior à esperada é também justificável a partir da não utilização do exsicador na realização do ensaio.

Esta diferença irá dar origem a desigualdades nos resultados dos protocolos que se seguem, visto que, será ensaiado material com diferentes características e que já não é fiel ao solo retirado *in situ*.

Nos ensaios até agora realizados verificou-se uma diminuição na quantidade de finos e por sua vez um aumento dos espaços vazios. A diminuição do valor da massa específica para todos os solos em estudo vem comprovar este fator.

Quadro 28 – Massa específica de cada amostra.

Massa específica (g/cm³)				
PT_x	PT_G	IN₁	IN₂	ML_K
2,09	1,98	2,34	2,08	2,14
Massa específica obtida por Dias (g/cm³)				
2,96	3,27	3,23	3,43	3,17

4.8. Resistência ao corte

Para a realização do ensaio de resistência ao corte, é necessário ter em conta o valor da tensão vertical a aplicar nas amostras de solo, sendo que a utilização de polímero como técnica de sustentação das paredes pela *GEO* não ultrapassa, geralmente, os 50 metros. Optou-se por exercer uma força vertical de 100 KPa, 200 KPa e 400 KPa, para o provete 1 (P1), provete 2 (P2) e provete 3 (P3), respetivamente.

Serão aplicadas as distintas tensões para o mesmo material, sem e com polímero, com o objetivo de verificar se o polímero irá influenciar na resistência ao corte bem como no ângulo de atrito e coesão de cada material.

Este ensaio foi realizado apenas aplicando a proporção 1/1 de polímero, como tal só vai ser possível verificar se existe uma melhoria após a aplicação do PolyMud® e não vai ser possível comparar qual a proporção que mais beneficia esta propriedade.

4.8.1. PT_x

A Figura 23 representa a tensão de corte necessária para obter uma certa deformação nos provetes, enquanto a Figura 24 apresenta os pontos máximos de tensão obtidos para cada provete ensaiado. A partir da Figura 24 é possível obter o ângulo de atrito e a coesão da amostra, porém, como a amostra é remexida a sua coesão é considerada zero. A Figura 24 apresenta também uma linha de tendência com origem na interseção dos eixos denominada de “*linear com coesão nula*”. Esta linha permite verificar o desvio dos valores de tensão máxima para cada provete, ou seja, quanto mais próximo se encontrar a “*linear*” com a “*linear de coesão nula*” menor será o erro adjacente ao ensaio. O Quadro 29 contém os valores de ângulo de atrito obtidos a partir da inclinação das retas de tendência apresentadas na Figura 24, enquanto a coesão corresponde à interseção das retas com o eixo das ordenadas. Os restantes dados do ensaio e cálculos encontram-se no Anexo XI e Anexo XII.

Ao observar a Figura 23 é possível constatar que a tensão de corte diminuiu quando aplicado o polímero. Contudo, as linhas de tendência da amostra PT_x com polímero, representadas na Figura 24, são praticamente coincidentes, o que leva a crer que os erros associados ao ensaio são desprezáveis. Como na Figura 24 os pontos de tensão máxima dão origem a linhas de tendência com declive praticamente iguais, leva a que o ângulo de atrito não se altere para ambos os casos, tal como se pode averiguar no Quadro 29.

Segundo Dias (2016) o solo pertence ao grupo da ilite e de acordo com Costa (2006) este grupo apresenta um comportamento intermédio entre a caulinite e a montmorilonite, apresentando uma baixa capacidade de troca catiónica, entre 5 a 40 meq/100g.

Visto que o polímero é aplicado com o intuito de melhorar as características intrínsecas do solo e não as manter ou, no pior cenário, as piorar, tal como se constatou em todos os provetes ensaiados na amostra PT_x. É possível concluir, que a aplicação de polímero neste tipo de solo, ou seja maioritariamente argilas do grupo ilite, não possibilita a ligação iónica entre o polímero e as partículas do solo.

Posto isto, é necessário averiguar se para as amostras que o comportamento do polímero é físico, são adquiridos resultados mais favoráveis.

Tensão de corte vs Deslocamento tangencial - PT_x

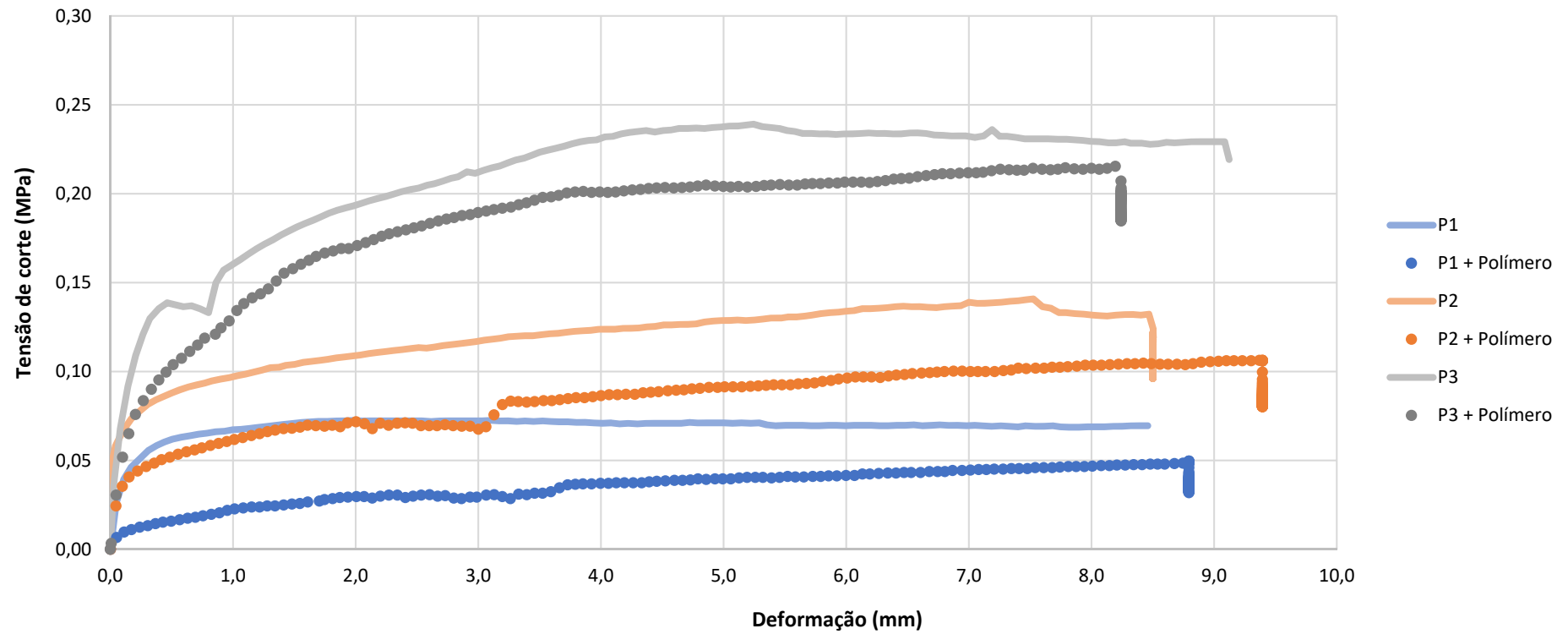


Figura 23 - Tensão de corte no plano de acordo com o deslocamento para a amostra PT_x .

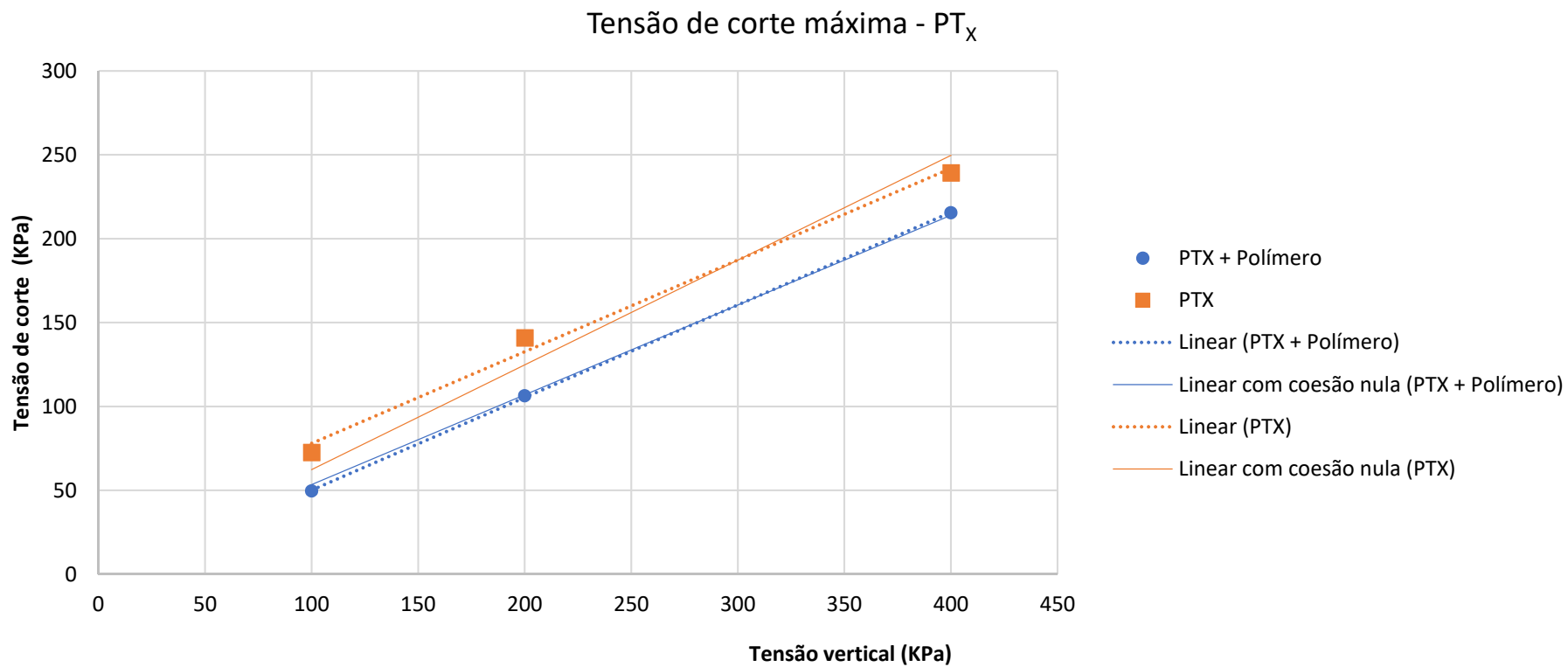


Figura 24 - Valores da tensão de corte máxima obtidos em cada provete.

Quadro 29 – Parâmetros de resistência obtidos a partir do ensaio de resistência ao corte.

	PT_x	PT_x + Polímero
Declive	0,62	0,54
Angulo de atrito (°)	31,98	28,15
Coesão (KPa)	0,00	0,00

4.8.2. PT_G

A Figura 25 exhibe a tensão de corte implementada tendo em conta o deslocamento horizontal. A Figura 26 possui os pontos máximos de tensão de corte de cada provete, enquanto o Quadro 30 corresponde ao ângulo de atrito e coesão obtidos, sendo de realçar que a coesão indicada é meramente indicativa. Os restantes dados do ensaio e cálculos encontram-se no Anexo XIII e Anexo XIV.

A partir da Figura 25, é possível verificar que a tensão aplicada para o mesmo deslocamento quando aplicado o polímero é superior para todos os provetes. Todavia, na Figura 26 constata-se que tanto o valor de tensão máxima de corte para uma tensão vertical de 100 KPa, como 200 KPa, para provetes sem polímero, deu valores superiores aos expectáveis. Isto porque são os que mais se distanciam da *“linha de tendência de coesão nula”*. No que toca ao Quadro 30, a coesão diminui quando aplicado o polímero, ao contrário do ângulo de atrito, que aumenta.

A melhoria verificada quando aplicado o polímero é comprovada pelo ângulo de atrito das partículas ter aumentado. No entanto, a diminuição da coesão justifica-se pela coesão do PT_G ter dado mais elevado do que o esperado. Um simples grão de maior dimensão presente na linha de corte dos provetes pode justificar o aumento da tensão máxima de corte e o respetivo aumento da coesão do material.

Ao contrário da amostra anterior, o PT_G vem comprovar que até então o polímero apresenta melhores comportamentos no que toca a tensão de corte, ou seja, é necessária uma maior tensão de corte para o mesmo deslocamento, para areias com menor quantidade de finos, como é o caso do PT_G que apresenta 18%.

Tensão de corte vs Deslocamento tangencial - PTG

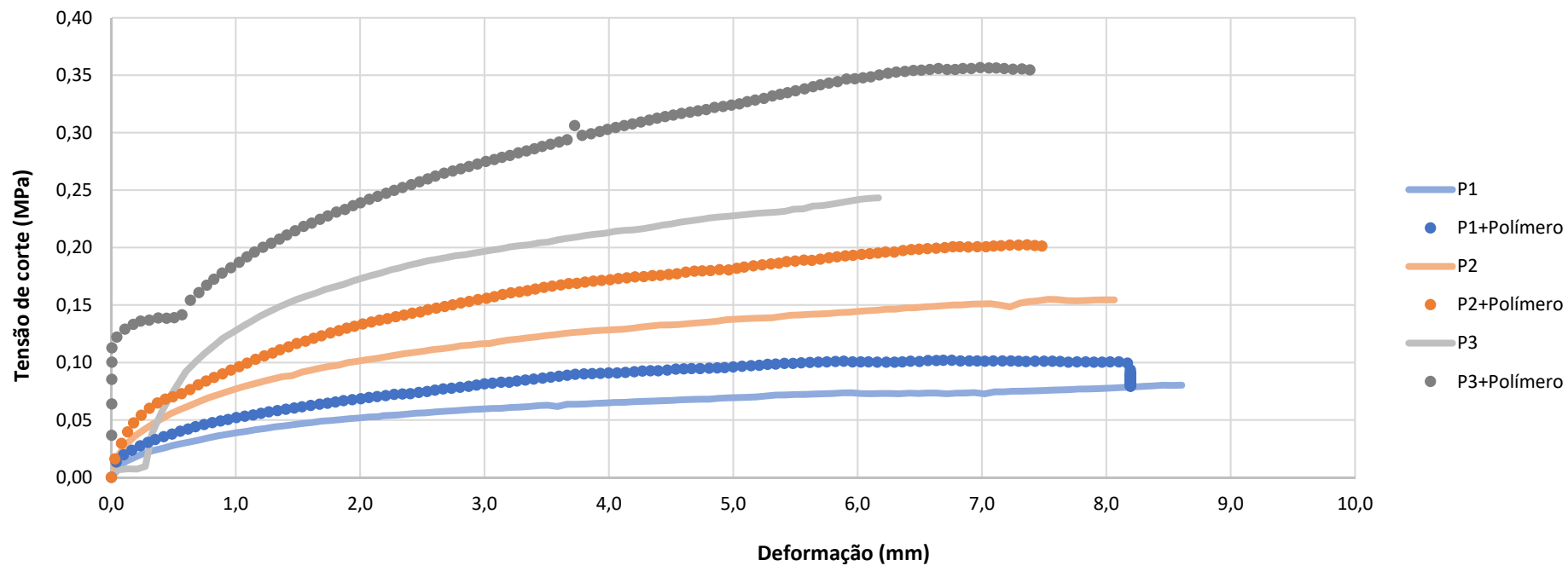


Figura 25 - Tensão de corte no plano de acordo com o deslocamento para a amostra PT_G.

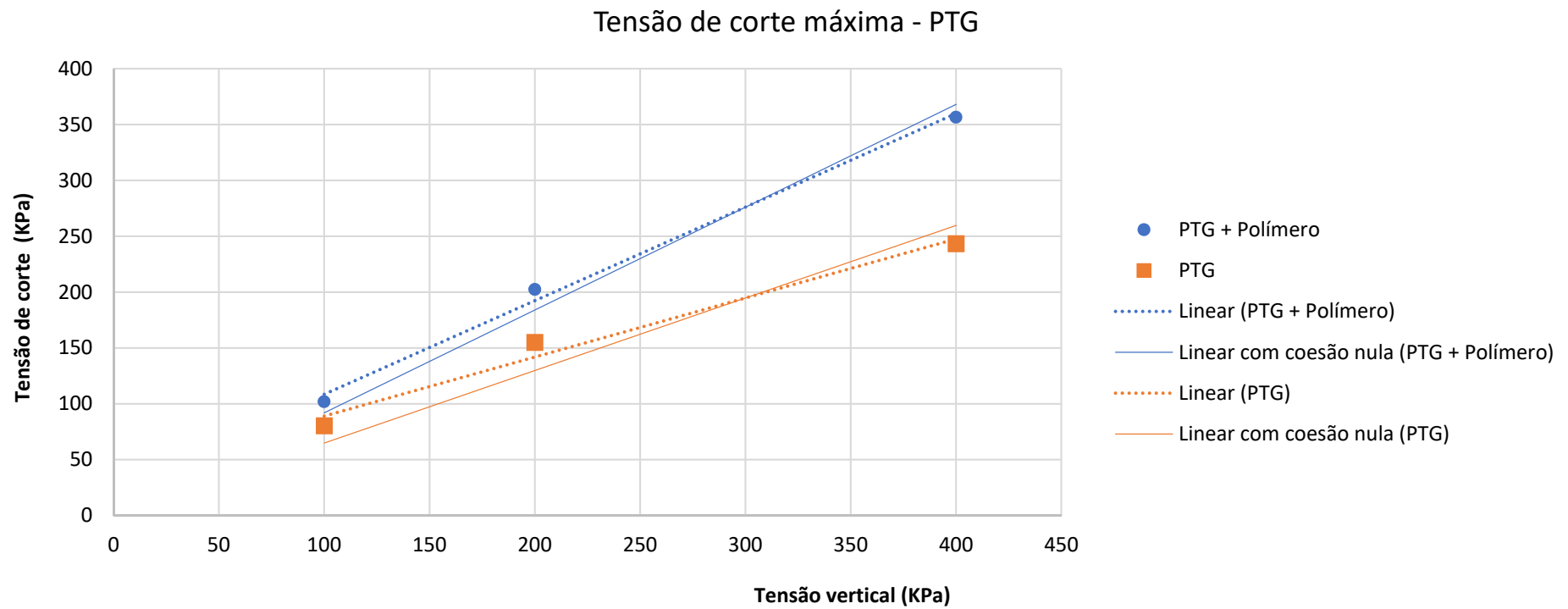


Figura 26 - Valores da tensão de corte máxima obtidos em cada provete

Quadro 30 - Parâmetros de resistência obtidos a partir do ensaio de resistência ao corte.

	PT_G	PT_G + Polímero
Declive	0,65	0,84
Angulo de atrito (°)	33,00	39,96
Coesão (KPa)	0,00	24,78

4.8.3. IN₁

A Figura 27 representa a tensão de corte executada para provocar o deslocamento horizontal apresentado. A Figura 28 apresenta os valores máximos de tensão de corte aplicada em cada provete, para assim obter a coesão e o ângulo de atrito do material ensaiado. Por fim, o Quadro 31 indica o valor de coesão e ângulo de atrito (o valor da coesão apenas para solos é nulo, visto que estamos perante uma amostra remexida). Os restantes dados do ensaio e cálculos encontram-se no Anexo XV e Anexo XVI.

A partir da Figura 27 constata-se que os provetes com polímero apresentam, no geral, um comportamento melhor face à tensão de corte, ou seja, para o mesmo deslocamento é necessário implementar uma tensão de corte superior. É também possível verificar um desfaseamento no provete 3 com polímero (P3 + Polímero), este pode ter sido provocado pela má montagem da caixa de corte, má mistura do polímero com o solo, entre outros motivos. No entanto, não interfere significativamente na leitura de resultados.

No Quadro 31 é visível um aumento substancial da coesão, uma coesão nula passa a 292 KPa.

Segundo Fernandes (2012) o valor obtido para o ângulo de atrito indica que estamos perante uma areia fina a média mal graduada, visto que o solo foi compactado antes da realização dos ensaios de corte direto e o valor do ângulo de atrito encontra-se entre 32° a 36°.

Como já foi referido existe um aumento da resistência ao corte após a aplicação do polímero, este fenómeno é justificável pelo aumento da coesão, sendo até agora a única amostra que apresentou claramente o objetivo do polímero no que toca à estabilização, ou seja interligar as partículas, o que leva ao aumento da coesão da amostra em estudo.

Os resultados obtidos demonstram que o PolyMud® garante a estabilização quando aplicado em areias como é o caso do IN₁, resta então verificar qual o seu comportamento para as restantes amostras em estudo.

Tensão de corte vs Deslocamento tangencial - IN₁

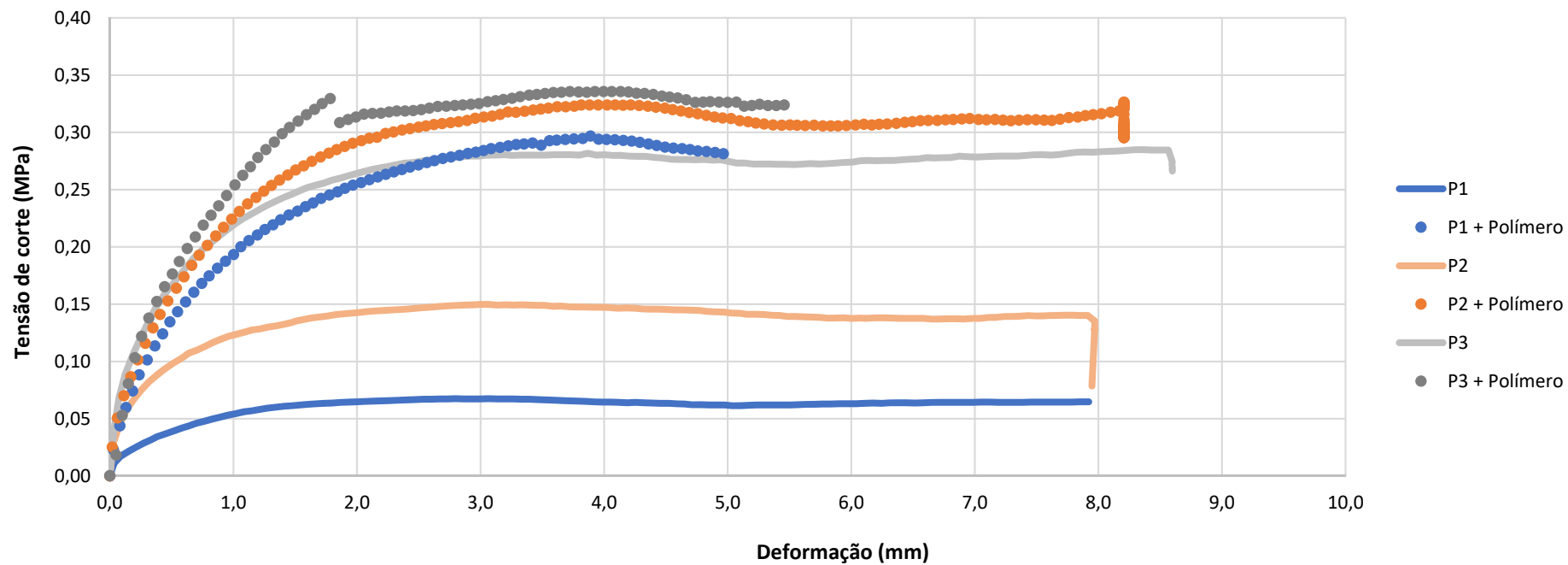


Figura 27 - Tensão de corte no plano de acordo com o deslocamento para a amostra IN₁.

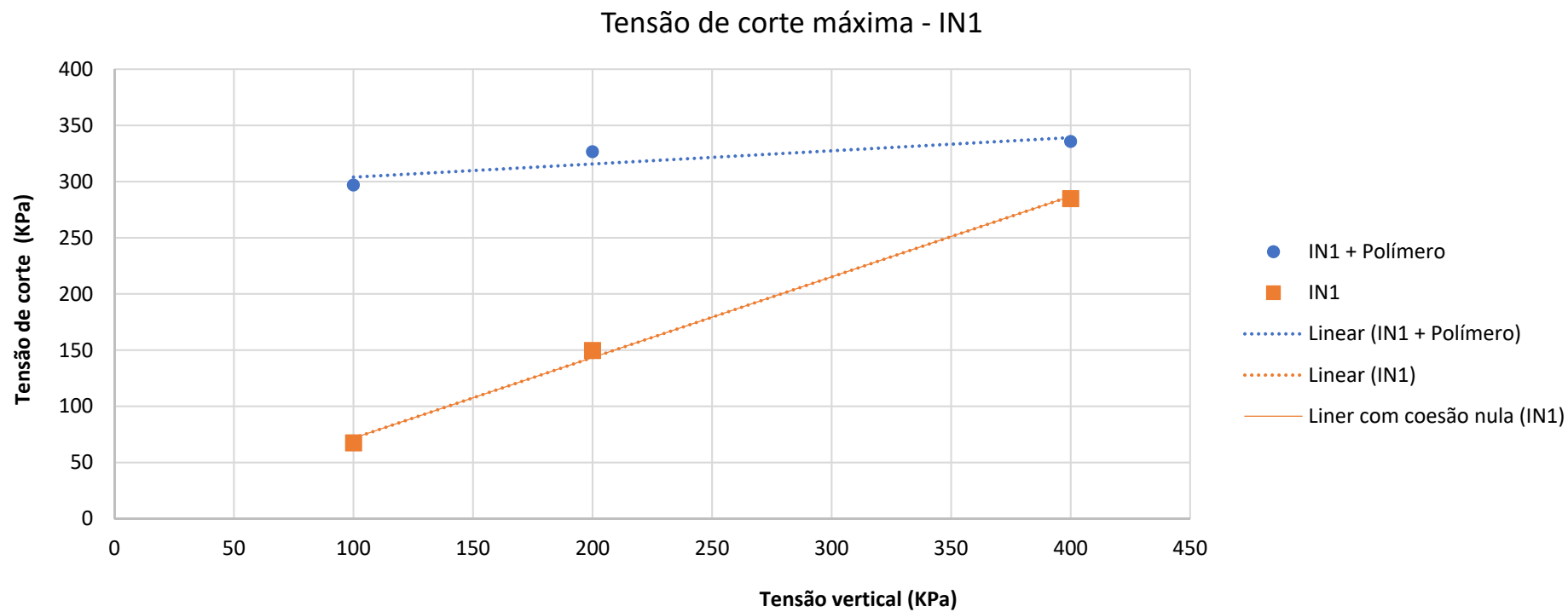


Figura 28 - Valores da tensão de corte máxima obtidos em cada provete.

Quadro 31 - Parâmetros de resistência obtidos a partir do ensaio de resistência ao corte.

	IN₁	IN₁ + Polímero
Declive	0,72	0,12
Angulo de atrito (°)	35,66	6,69
Coesão (KPa)	0,00	292,22

4.8.4. IN₂

A Figura 29 representa a tensão de corte efetuada para impelir o deslocamento horizontal apresentado. A Figura 30 apresenta os valores máximos de tensão de corte aplicada em cada provete, para assim obter a coesão e o ângulo de atrito do material ensaiado transcrito no Quadro 32. Os restantes dados do ensaio e cálculos encontram-se no Anexo XVII e Anexo XVIII.

Ao observar a Figura 29 verifica-se que não existem alterações significativas quando aplicado o polímero no solo, sendo a coesão nula tanto para a amostra com polímero, como para o provete sem polímero. Porém, existe um aumento do ângulo de atrito (Figura 30), passando de 37° para 43°, tal como indica o Quadro 32, o que parece indicar uma influência positiva do polímero.

De acordo com Fernandes (2012), os siltes apresentam um ângulo de atrito próximo de 30° (quando compacto, e cerca de 28°, se medianamente compacto), como o ângulo obtido foi de 37°, é possível concluir que é mais elevado que o esperado.

O facto de não ocorrer alteração da resistência ao corte após a aplicação do polímero justifica-se com a coesão permanecer nula, estes valores indicam que o polímero não conseguiu interligar as partículas do solo IN₂.

Este ensaio veio comprovar que quanto menor a granulometria dos finos menor a capacidade do PolyMud® se instalar nos espaços vazios existentes e interligar as partículas entre si. O que leva então a que não existam alterações quanto à resistência ao corte quando o polímero é aplicado em solos com finos.

Tensão de corte vs Deslocamento tangencial - IN₂

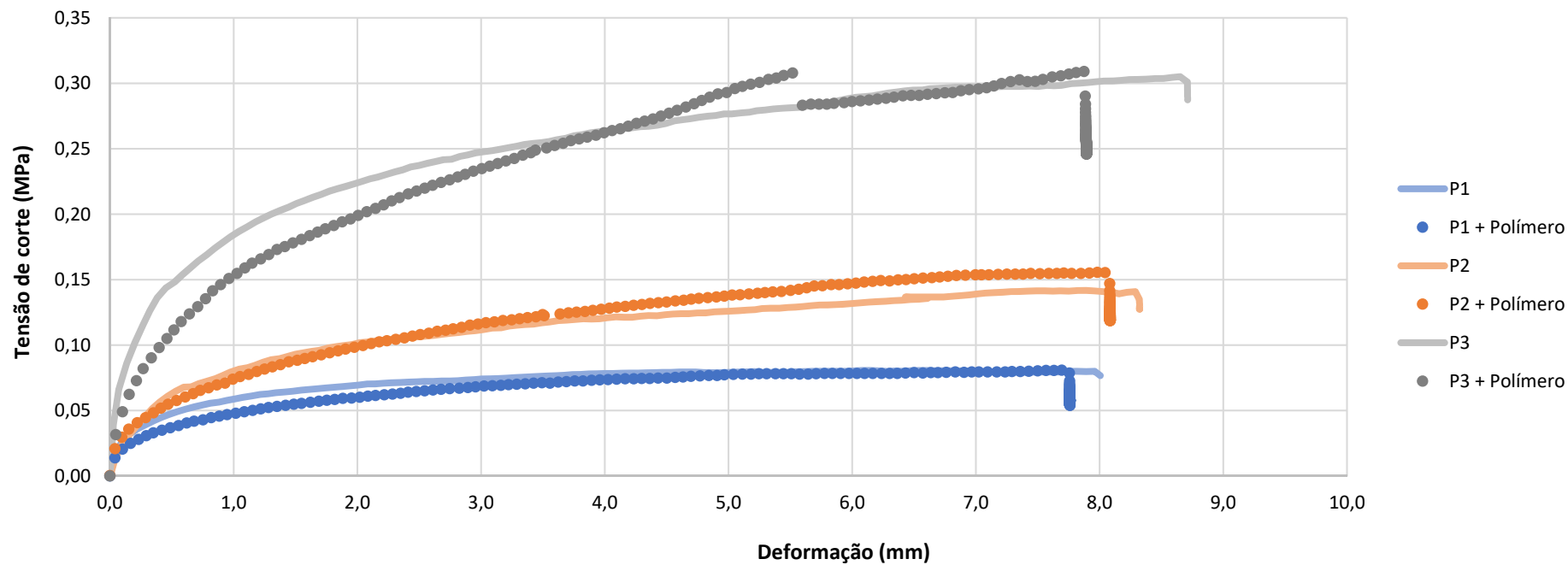


Figura 29 - Tensão de corte no plano de acordo com o deslocamento para a amostra IN₂.

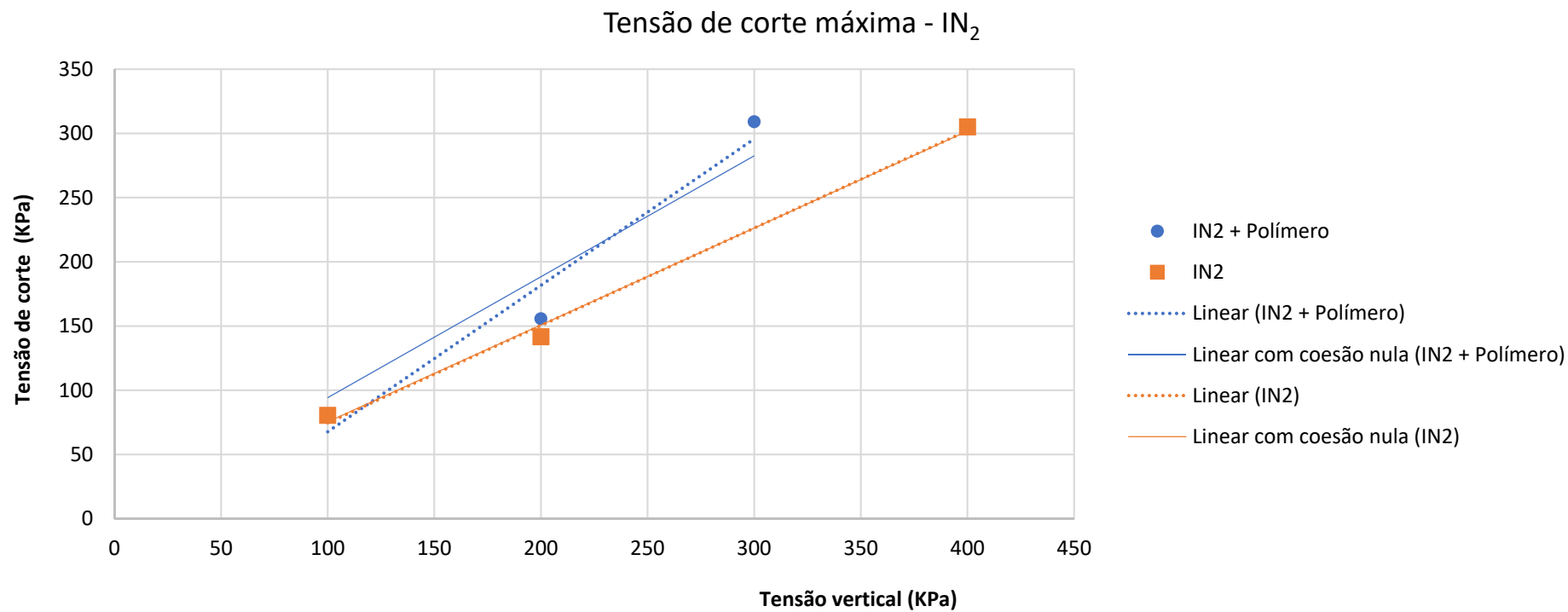


Figura 30 - Valores da tensão de corte máxima obtidos em cada provete.

Quadro 32 - Parâmetros de resistência obtidos a partir do ensaio de resistência ao corte.

	IN ₂	IN ₂ + Polímero
Declive	0,75	0,94
Angulo de atrito (°)	37,03	43,29
Coesão (KPa)	0,00	0,00

5.7.5. ML_k

A Figura 31 representa a tensão de corte exercida para obter o deslocamento horizontal apresentado. A Figura 32 contém os valores máximos de tensão de corte implementada em cada provete e a partir desse gráfico obtém-se os valores de ângulo de atrito e coesão apresentados no Quadro 33. Os restantes dados do ensaio e cálculos encontram-se no Anexo XIX e Anexo XX.

A partir da Figura 31 é possível verificar que os valores obtidos de resistência ao corte para a aplicação de polímero são idênticos aos valores sem a aplicação do polímero até atingir os 2,5 mm, porém após este deslocamento horizontal a amostra com polímero necessita de uma maior tensão para realizar a mesma deslocação que a amostra sem polímero. No que toca ao ângulo de atrito é visível um aumento de 7° e um aumento de 29 KPa na coesão.

De acordo com Fernandes (2012), as areias bem graduadas apresentam um ângulo de atrito entre 38° a 46° (quando compacto, e cerca de 34° a 40°, se medianamente compacto), o ML_k apresenta um ângulo de atrito de 39°, o que vai de acordo com os dados obtidos na análise granulométrica.

Os valores obtidos indicam que o polímero conseguiu interligar as partículas do solo ML_k, porém não com tanta eficácia como o solo IN₁, visto que não ocorreu um aumento tão significativo da coesão. Mesmo assim, é visível que para deslocamentos horizontais superiores a 2,5 mm é necessária uma tensão de corte diretamente proporcional à força vertical aplicada, ou seja, maior a tensão vertical, maior a tensão de corte para proporcionar o mesmo deslocamento.

É então possível concluir, que a estabilidade das paredes do furo é garantida em solos arenosos, sem a presença de finos (dimensão inferior a 0,074 mm), como 23% da composição do solo ML_k é finos, não se verifica um aumento da resistência tão significativa como o IN₁, no entanto, verifica-se estabilidade mesmo para grandes tensões verticais.

Tensão de corte vs Deslocamento tangencial - ML_K

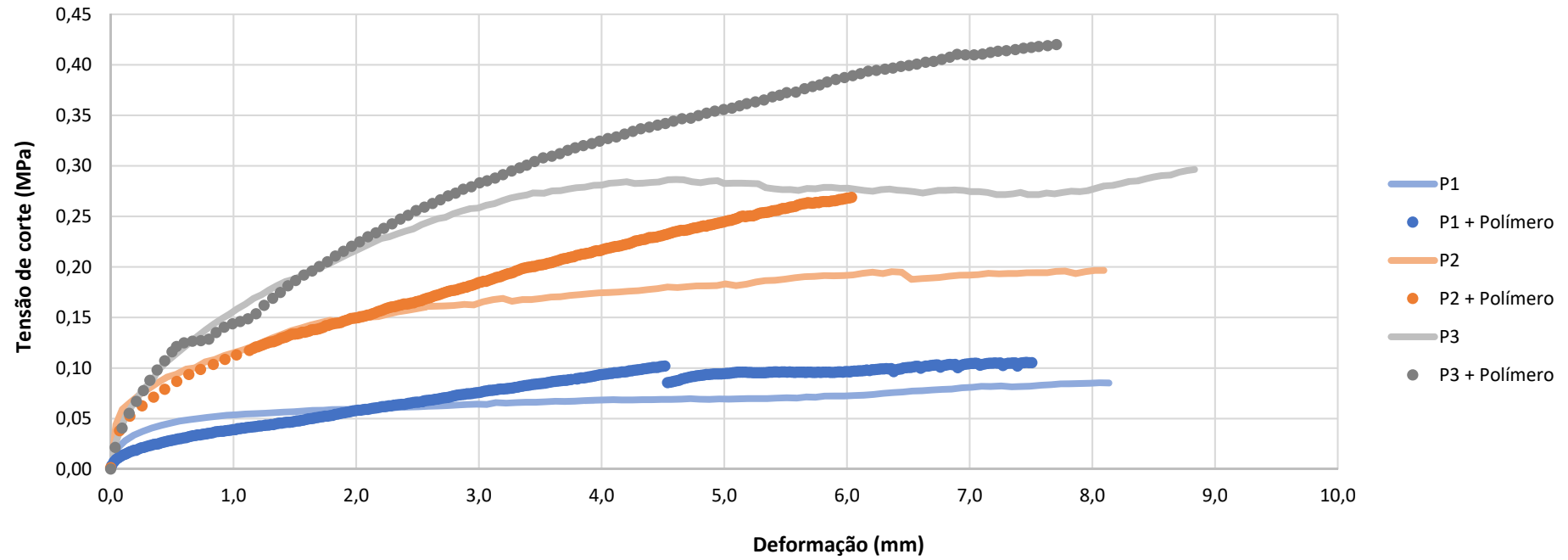


Figura 31 - Tensão de corte no plano de acordo com o deslocamento para a amostra ML_K.

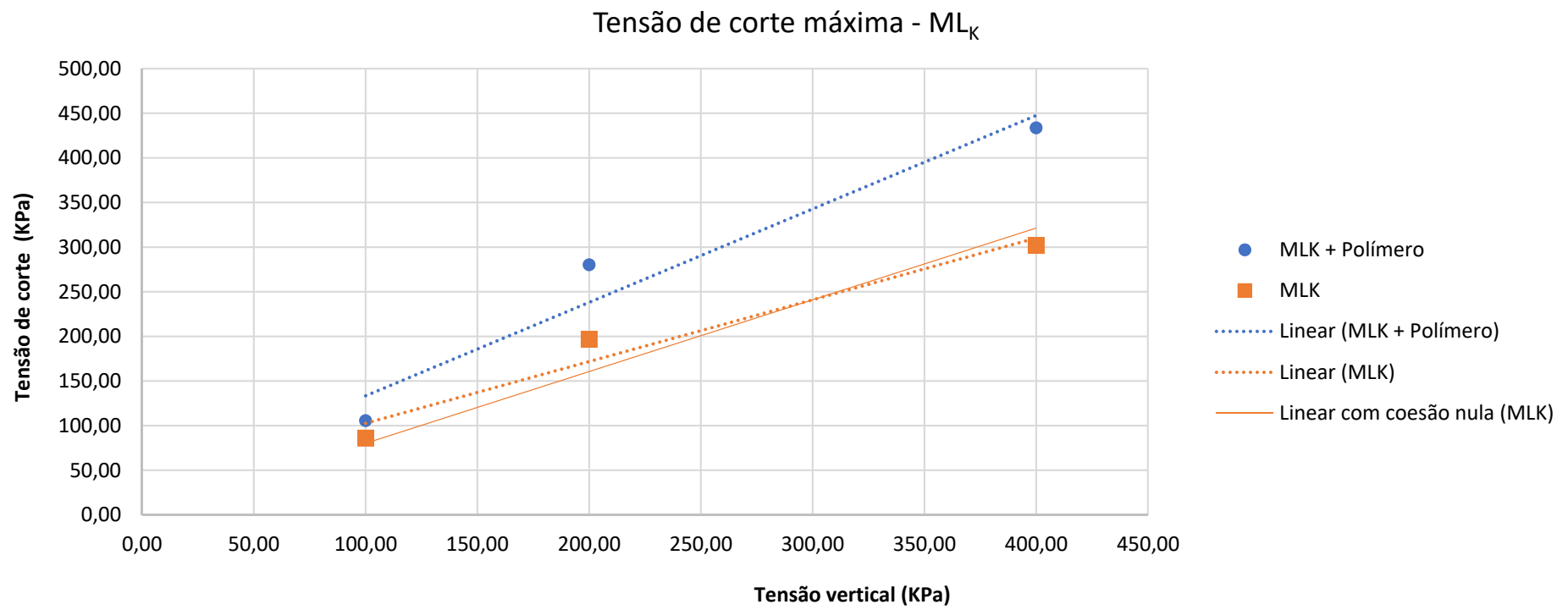


Figura 32 - Valores da tensão de corte máxima obtidos em cada provete.

Quadro 33 - Parâmetros de resistência obtidos a partir do ensaio de resistência ao corte.

	ML _K	ML _K + Polímero
Declive	0,80	1,05
Angulo de atrito (°)	38,79	46,31
Coesão (KPa)	0,00	28,79

4.9. Permeabilidade

O Quadro 34 apresenta os valores de permeabilidade obtidos, segundo os métodos empíricos indicados.

Para o solo PT_X e ML_K não foi possível calcular os valores, visto que a curva granulométrica de ambos se encontra incompleta. Nos restantes solos, o que apresenta maior permeabilidade é o IN₁, seguido do IN₂ e por fim o PT_G.

Comparativamente com Dias (2016) os valores de permeabilidade segundo a fórmula de Kenney *et al.* (1984) foram inferiores, porém as restantes fórmulas apresentam valores superiores.

O fato da permeabilidade ser maior é justificável pelo aumento do índice de vazios, comparativamente com o material estudado por Dias (2016).

Mais uma vez, tal como no ensaio de azul de metileno e massa específica, verificou-se que o índice de vazios dos solos em estudo foi influenciado e já não corresponde ao valor que o solo apresentava *in situ*.

Quadro 34 – Valores de permeabilidade obtidos de acordo com métodos empíricos.

Permeabilidade (cm/s)						
Método empírico		PT _X	PT _G	IN ₁	IN ₂	ML _K
Kenney <i>et al.</i> (1984)	$k = (0,005) * D_5^2$	-	2,00*10 ⁻⁸	1,80*10 ⁻⁷	-	-
Breyer-Kresic (1998)	$k = 6 * 10^{-2} * \frac{g}{v} * \log\left(\frac{500}{C_u}\right) * D_{10}^2$	-	3,09*10 ⁻³	1,32*10 ⁻¹	1,61*10 ⁻²	-
USBR- (Vukovic and Soro, 1992)	$k = 0.048 * \frac{g}{v} * D_{20}^{0.3} * D_{10}^2$	-	1,59*10 ⁻³	2,96*10 ⁻²	2,26*10 ⁻³	-

4.10. Condutividade elétrica

O Quadro 35 indica os valores de condutividade elétrica obtidos para cada solo sem e com a aplicação de polímero. A Figura 33 representa os valores obtidos tendo em conta a proporção de polímero utilizado, os restantes dados do ensaio encontram-se no Anexo XXI.

A partir dos dados indicados no Quadro 35 é possível verificar que os valores de condutividade elétrica aumentam consoante a quantidade de polímero aplicado, ou seja maior concentração de polímero, maior condutividade elétrica. Na Figura 33 é possível verificar que todos os solos apresentam uma tendência linear nos seus valores.

De acordo com Dias (2016), os valores obtidos para cada solo são inferiores, sendo a maior diferença o MLK que no seu estudo apresenta 232 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e a menor o PT_G que apresenta 31,6 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

A condutividade elétrica está relacionada com a tendência que os solos apresentam de se associarem às partículas de um solo. Esta particularidade vem defender o porquê de o solo ML_K apresentar melhores resultados no ensaio de corte direto comparativamente ao solo PT_G. Ambos os solos correspondem a areias, porém o ML_K apresenta uma condutividade elétrica oito vezes superior à do PT_G, ou seja, existem mais interligações iónicas no solo ML_K, o que facilita a interligação do polímero com o solo. Sendo assim, embora o ML_K apresente maior percentagem de finos que o PT_G, o facto de o seu valor de condutividade elétrica ser substancialmente maior veio contribuir para estabilidade do solo.

A partir deste ensaio foi possível comprovar que a condutividade elétrica de um solo pode por em causa a eficiência da aplicação de estabilizações químicas. Visto que, o PT_G corresponde a uma areia e a partir da sua classificação granulométrica seria de esperar que o polímero garantisse a sua estabilização, o que não se verifica.

Quadro 35 – Valores de condutividade elétrica obtidos em cada solo.

	s/polímero	0,5P/1	1P/1	1,5P/1
	μS/cm			
PT _x	98,5	177,2	250,0	259,0
PT _G	19,2	77,2	186,3	216,0
IN ₁	81,4	176,2	270,0	336,0
IN ₂	140,0	179,0	259,0	287,0
ML _k	154,4	215,0	294,0	335,0

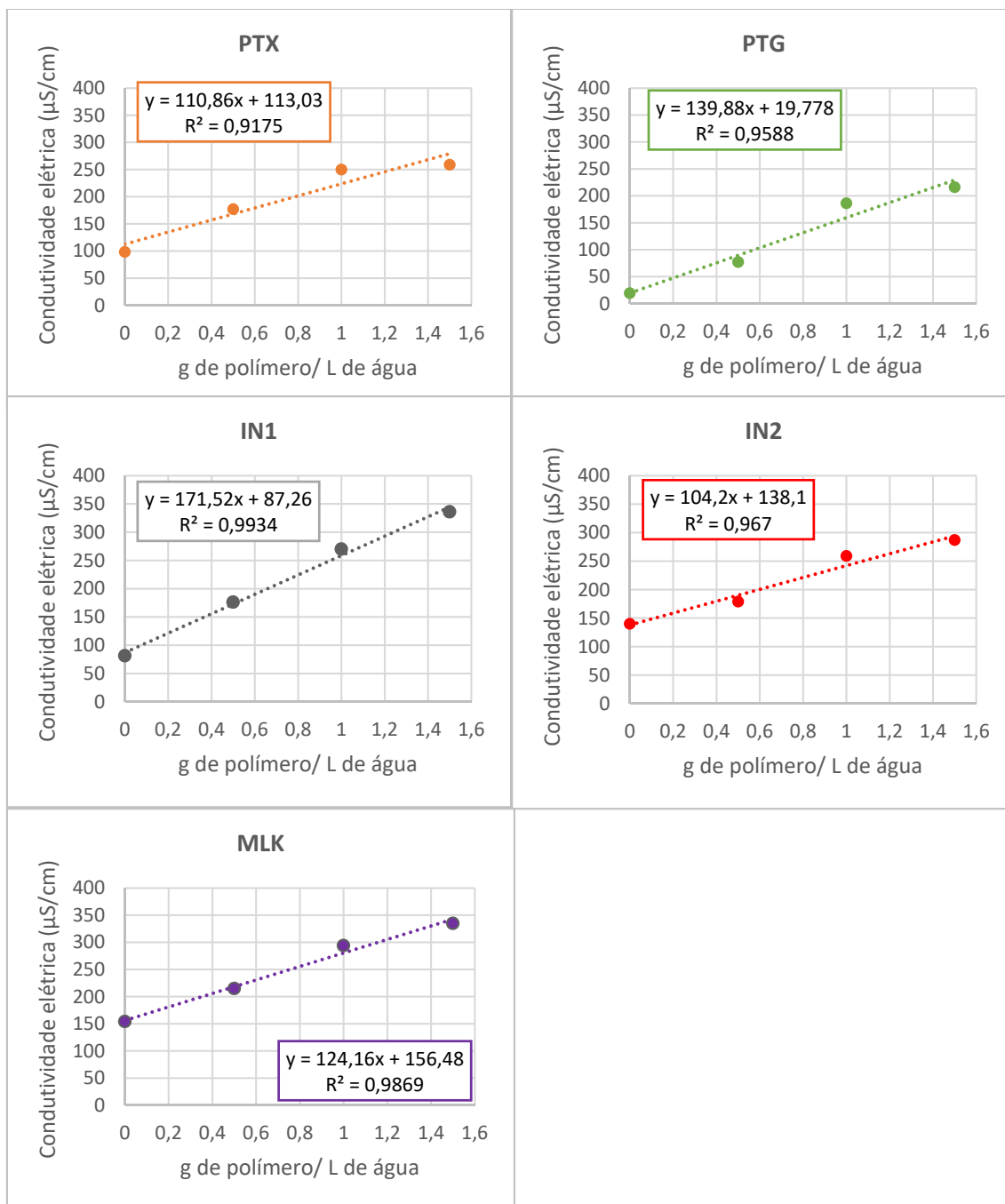


Figura 33 – Valores de condutividade elétrica obtidos em cada solo.

4.11. Análise química quantitativa

A Figura 34 apresenta as concentrações de óxidos obtidas para o solo PT_x sem e com polímero, os cálculos realizados para obtenção dos dados encontram-se no Anexo XXII.

O objetivo deste ensaio laboratorial era exclusivamente verificar se em contacto com o polímero o solo sofria alguma alteração química, a partir da Figura 34 é possível comprovar que não existe nenhuma alteração da composição química do solo. Os restantes gráficos das amostras em estudo encontram-se no Anexo XXIII e nenhum dos provetes sofreu alterações após a aplicação de polímero.

Os valores obtidos encontram-se na mesma ordem de valores dos adquiridos por Dias (2016), o que seria de esperar visto que amostras só sofreram alterações granulométricas de um estudo para o outro, portanto não iria interferir com a concentração relativa de óxidos pertencente a cada solo.

Os valores obtidos indicam que o polímero em contacto com as amostras em estudo não altera a composição química dos solos. O motivo de com a aplicação do polímero não se visualizar nenhuma variação nas composições química estudadas, é o fato do polímero não apresentar óxidos na sua constituição.

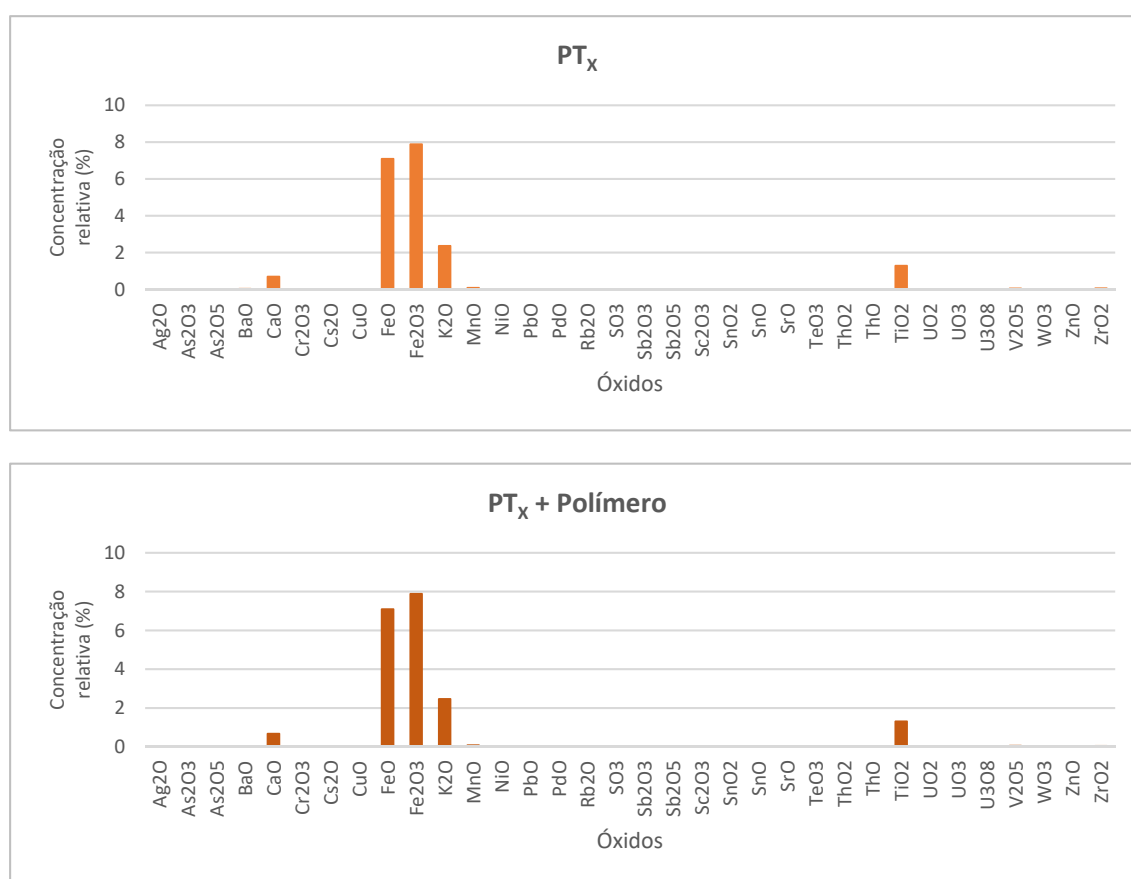


Figura 34 – Concentração relativa de óxidos no solo PT_x e no solo PT_x com adição de polímero.

4.12. Equivalente de areia

O Quadro 36 indica os valores de equivalente de areia obtidos para cada solo, tendo em conta as quantidades de polímero utilizadas. A Figura 35 representa graficamente os valores apresentados no Quadro 36, sendo que o eixo das ordenadas corresponde aos valores percentuais de equivalente de areia e o eixo das abcissas indica as porções de polímero utilizadas. Todos os cálculos e restantes valores do ensaio encontram-se no Anexo XIV.

A partir da Figura 35 e do Quadro 36 é possível verificar um aumento da percentagem de equivalente de areia, sendo o mais significativo o da amostra IN₂, que após a aplicação de polímero, sobe em 67,29% o seu equivalente de areia, ou seja, um solo considerado como material argiloso, passa a ser designado de material arenoso. É possível averiguar a partir da Figura 35 que existe uma tendência polinomial nos valores obtidos, exceto para o provete PT_G. Tendo em conta as tendências polinomiais obtidas é possível analisar qual o valor de polímero a utilizar para obter a maior percentagem de equivalente de areia. Para o PT_x seria uma concentração de 0,7/1, para o PT_G de 1/1, IN₁ de 0,6/1 e IN₂ de 0,7/1. Tendo em conta esses valores (Quadro 36), realizou-se uma média para obter a massa de polímero que melhor se adaptaria aos diferentes ambientes geológicos estudados, sendo o valor obtido de 0,75g para 1L de água.

De acordo com a *GEO* o polímero tem a capacidade de aumentar a velocidade de sedimentação das partículas, o que leva a que os valores do ensaio de equivalente de areia aumentem, tal como é possível averiguar nos dados analisados.

Esta propriedade não é apenas dependente do tipo de solo, mas também da concentração de polímero utilizada. Visto que, um meio com uma concentração elevada de polímero não beneficia de todo solos que na sua constituição apresentem finos, já que dá origem a uma sedimentação obstruída, ou seja o meio em que se encontram apresenta uma viscosidade elevada que dificulta a sua sedimentação. Porém, em solos maioritariamente arenosos, como é o caso do PT_G, a sedimentação é possível mesmo em meios com maior viscosidade. Sendo assim, ao analisar os valores é possível constatar que uma concentração de 1,5/1 é inviável no que toca a este atributo, pois os finos vão ficar em suspensão na lama polimérica o que irá interferir com a execução dos trabalhos em obra. Como tal, a proporção ideal de polímero tendo em consideração apenas esta propriedade seria 0,75/1.

As características que influenciam no rendimento da lama polimérica são a densidade, o teor de areia, o pH e a viscosidade, no que toca ao equivalente de areia, foi possível constatar, tal como a

GEO referia que o polímero tem a capacidade de aumentar a sedimentação e por sua vez o equivalente de areia. Falta então analisar se o pH e a viscosidade apresentam valores nos intervalos definidos e qual a interferência após o contacto com o solo.

Quadro 36 - Valores de equivalente de areia obtidos em cada solo.

	Equivalente de areia (%)					
	PT _x	PT _G	IN ₁	IN ₂		
Solo	19,78	44,50	61,42	4,35		
Solo+Polímero 0,5/1	51,89	50,00	92,23	71,64		
Solo+Polímero 1/1	42,11	94,74	78,30	52,63		
Solo+Polímero 1,5/1	5,29	72,03	2,54	3,55		
Valor aproximado de polímero para obter a maior percentagem de equivalente de areia	0,70	1,00	0,60	0,70	Média	0,75

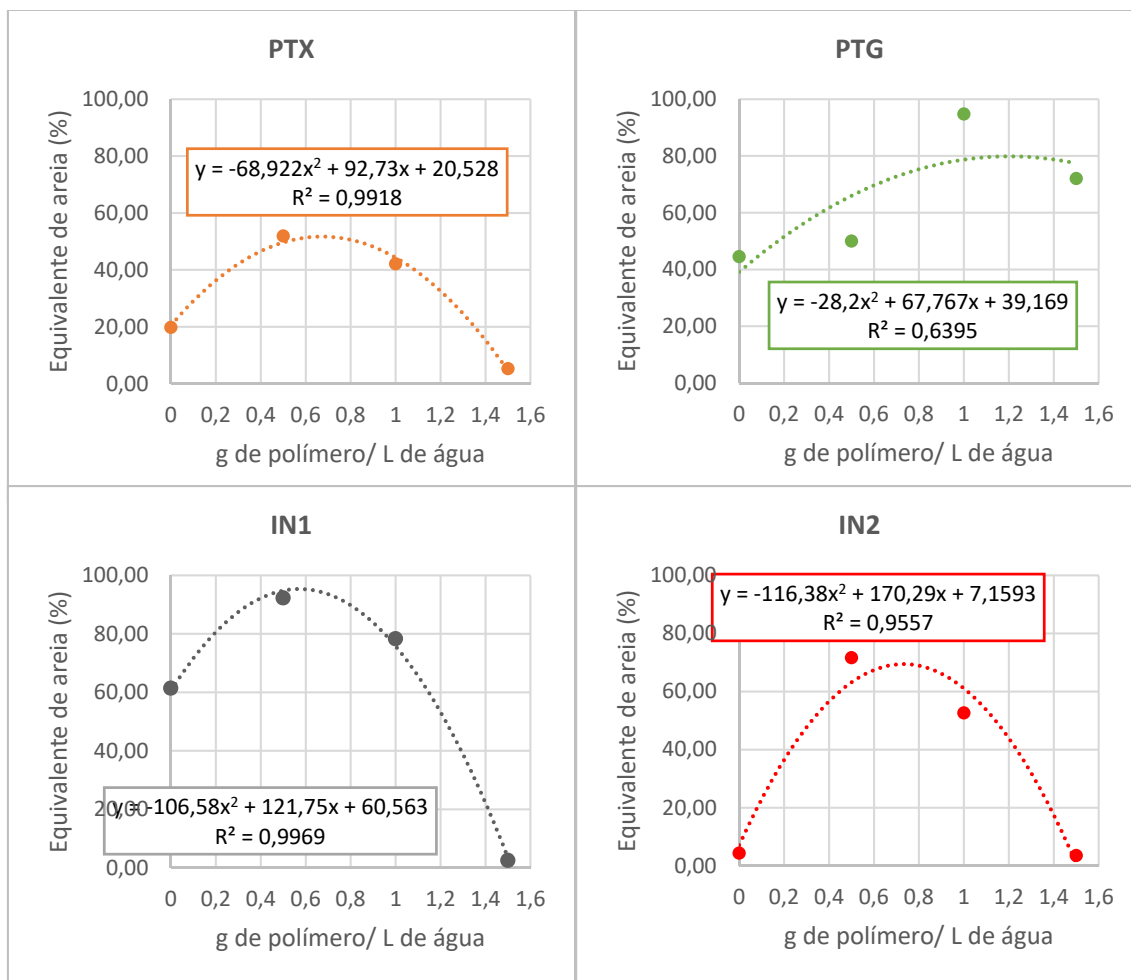


Figura 35 – Gráficos de valores obtidos no ensaio de equivalente de areia para cada solo.

4.13. pH

Este tópico tem como objetivo verificar as alterações do pH do lixiviado após a aplicação das diferentes proporções de polímero. Para tal, o Quadro 37 representa os valores de pH obtidos para os diferentes solos e diferentes quantidades de polímero aplicadas. Todos os cálculos e restantes valores do ensaio encontram-se no Anexo XXV.

A partir do Quadro 37 é possível constatar que o pH não se altera significativamente para as diferentes proporções de polímero, mantendo-se quase sempre na mesma unidade de valores. Porém a amostra IN₁ sem polímero apresenta um pH de aproximadamente 10 e com a aplicação de polímero passa para 9.

Segundo a *GEO* o polímero deve ser aplicado num meio fortemente alcalino, com um pH entre 11-12, mas que em junção com o solo é possível constatar uma descida do valor, porém nunca deixa

de pertencer a um meio alcalino, sendo o menor valor de pH esperado com a aplicação do solo 9. Sendo assim, as amostras IN₁, IN₂ e ML_k, encontram-se segundo os valores esperados, o que não acontece com os solos provenientes de Portugal, ou seja, PT_x e PT_G.

A partir dos valores do Quadro 36, é possível visualizar que independentemente da quantidade de polímero utilizado, a solução solo-polímero apresenta o pH do solo. Como tal, em obra, para saber se o pH após a aplicação da lama polimérica no furo apresentará o intervalo de valores aconselhável, ou seja, entre 9-12, basta verificar qual o pH do solo em que o polímero irá atuar.

O pH corresponde a uma das propriedades que é importante respeitar quando é aplicada a lama polimérica, desta forma é importante constatar que esta propriedade está diretamente relacionada com o solo aplicado e não o polímero. Resta agora verificar de qual variável depende a viscosidade da mistura.

Quadro 37 - Valores de pH obtidos em cada solo.

	s/polímero	0,5P/1	1P/1	1,5P/1
PT _x	7,89	7,71	7,85	7,90
PT _G	7,02	7,25	7,37	7,23
IN ₁	9,65	8,73	9,01	9,08
IN ₂	9,10	8,69	8,93	8,89
ML _k	9,26	8,66	8,91	8,69

4.14. Viscosidade de Brookfield

No Quadro 38 é possível verificar a viscosidade do polímero e do polímero empregue no solo, enquanto a Figura 36 representa graficamente os valores obtidos. Os restantes valores do ensaio e cálculos auxiliares encontram-se no Anexo XXVI.

Em primeiro lugar, é possível verificar que a junção do solo com o polímero leva a uma redução da viscosidade do polímero, bem como, quanto maior a quantidade de polímero aplicada ao solo, maior será a viscosidade da mistura.

Mas para além disso, é possível observar que para a mesma quantidade de polímero aplicado, a amostra PT_x apresenta uma viscosidade maior que a IN₂, sendo que para condições de obra normais, ou seja, de uma proporção de polímero 1/1, a viscosidade do PT_x é o dobro do IN₂.

Porém, é de salientar, que ao aplicar uma relação de polímero 1/1,5, o PT_x quanto à proporção 1/1 aumenta a sua viscosidade em 10 vezes, enquanto o IN₂ aumenta em aproximadamente 20 vezes.

Quadro 38 – Valores obtidos na viscosidade de Brookfield.

	Polímero			Solo + 1/0,5 Polímero		Solo + 1/1 Polímero		Solo + 1/1,5 Polímero	
	1/0,5	1	1/1,5	PT _x	IN ₂	PT _x	IN ₂	PT _x	IN ₂
Viscosidade (cP)	2337,00	4776,00	7920,00	67,05	47,55	406,80	173,40	4500,00	3528,00
Torque (%)	77,90	79,60	66,00	44,70	31,70	67,80	57,80	37,50	29,40
Velocidade (rpm)	0,20	0,10	0,50	4,00	4,00	1,00	2,00	0,50	0,50
Temperatura (°C)	21,20	21,10	21,80	21,50	21,40	21,30	21,40	22,10	22,20
Tempo (min)	15,00								
Precisão (cP)	30,00	60,00	120,00	1,50	1,50	6,00	3,00	120,00	120,00

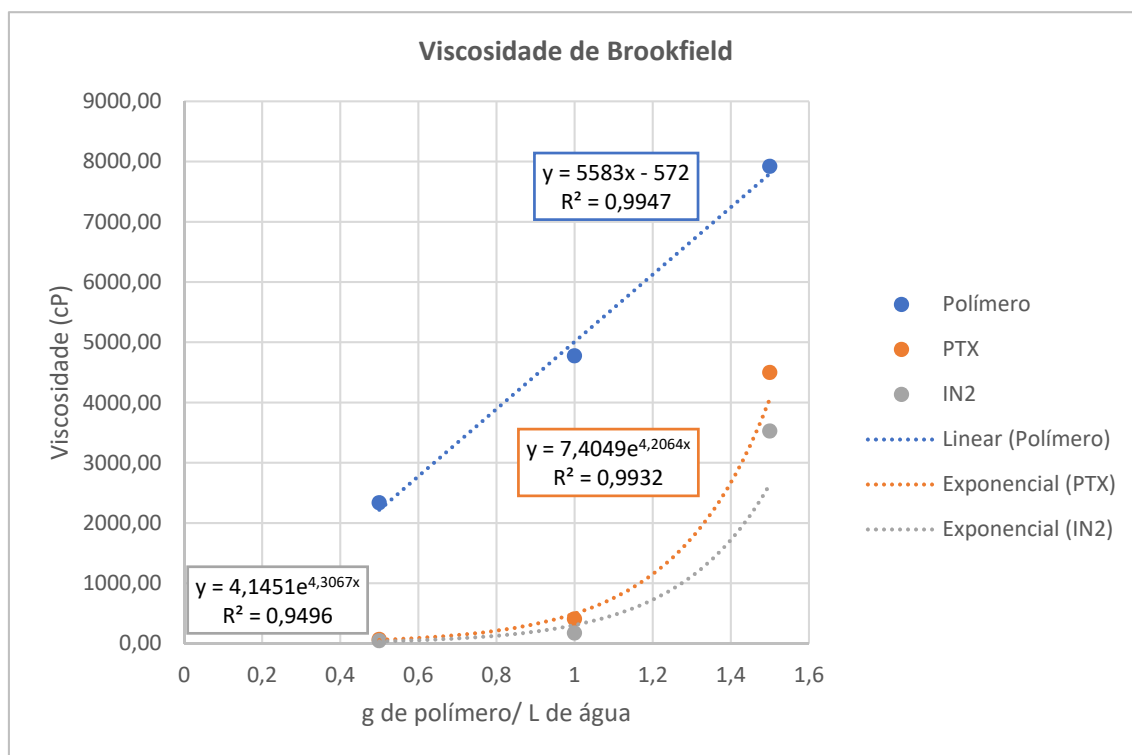


Figura 36 – Valores obtidos na viscosidade de Brookfield.

4.15. Cenários

Tal como foi referido no *tópico 4.1.* do presente trabalho, o objetivo final era verificar quais as diferenças da aplicação do polímero para diferentes cenários. Sendo que os cenários pré-definidos foram a aplicação de polímero em areias, siltes e argilas.

Inicialmente, e segundo os dados indicados por Dias (2016), os solos em estudo eram uma argila e os restantes quatro correspondiam a areias, porém de características distintas. Com os ensaios granulométricos realizados foi possível constatar uma diferença nas frações granulométricas de cada solo. A argila passou a ser areia argilosa, devido a grande parte dos seus finos terem sido retirados para realização de ensaios e um dos solos passou a ser designado de silte, segundo a classificação ASTM.

Para o estudo da ação do polímero nos diferentes cenários criados, foi tido em conta o PT_x para a argila, embora corresponda a uma areia argilosa é o único solo que apresenta na sua constituição argila. O solo IN₂ foi considerado como o cenário geológico silte e os restantes solos ajudaram a compreender as areias num todo, visto que nenhum corresponde a uma areia limpa e pura.

4.15.1. Areias

A utilização do polímero na areia veio trazer alterações benéficas para as características das quais o polímero é dependente para uma aplicação eficaz, o que veio garantir a estabilização e uma boa resistência destes solos com o uso do PolyMud®.

Porém, tal como é possível verificar no Quadro 39, os benefícios só são garantidos para solos arenosos que não apresentem uma percentagem de finos superior a 15%. Esta percentagem foi adquirida tendo como base os restantes solos arenosos em estudo, PT_G e ML_k, areia siltosa e areia siltosa com cascalho, respetivamente. Visto que, para estes solos os resultados obtidos no que toca à estabilidade não foram tão benéficos quanto o solo IN₁, que apresenta apenas 13% de finos.

Quadro 39 – Vantagens e desvantagens de aplicar o PolyMud® em areias.

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none">• Aumenta a velocidade de sedimentação quando usada a proporção 0,5/1 para qualquer areia;• Aumenta a coesão do solo associada a uma ligação das partículas;• Garante a estabilidade das paredes da escavação, porém não é aconselhável mais de 15% de finos (< 0,074 mm) na constituição da areia, visto que ocupam os espaços vazios que o polímero necessita para garantir a interligação das partículas;• Melhora o equivalente de areia, porém apresenta melhores resultados para proporção 0,75/1.	<ul style="list-style-type: none">• Velocidade da sedimentação diminui quando aplicada a proporção de 1/1 em areias finas;• Um solo com baixa condutividade elétrica pode interferir na eficácia do polímero.

4.15.2. Siltes e Argilas

O objetivo final era verificar quais as vantagens e desvantagens tanto para siltes como para argilas, todavia no decorrer dos ensaios laboratoriais foi possível verificar que ambas apresentam o mesmo comportamento, por esse motivo recorreu-se à junção dos cenários.

Tal como foi referido anteriormente no presente trabalho solos com percentagem superior a 15 % de finos não são fiáveis quanto à estabilização de paredes. Sendo assim, solos como siltes e argilas, não trazem melhorias na resistência quando aplicado o polímero. Este fenómeno é justificado pelo facto de solos como siltes e argilas apresentarem maior percentagem de espaços vazios, porém a forma das partículas e o volume que separa as partículas entre si é menor, o que leva a que o polímero não tenha capacidade de se alojar e por sua vez a que não interligue as partículas entre si, que por sua vez não leva a alterações na coesão.

Porém, tal como está referido no Quadro 40, uma particularidade interessante observada na realização de ensaios, é a capacidade que o polímero tem de aumentar a velocidade de sedimentação dos solos finos. Isto porque o polímero agrega-se às partículas, torna-as mais pesadas e por sua vez contribui para a sua sedimentação. Outro fator vantajoso na aplicação do PolyMud® é a melhoria dos limites de consistência dos solos, pois embora o polímero não consiga ocupar os espaços vazios de forma eficaz tal como em solos arenosos, alguns dos espaços são ocupados e como tal, a quantidade de água para atingir os limites de plasticidade e liquidez é maior.

Quadro 40 – Vantagens e desvantagens de aplicar o PolyMud® em siltes e argilas.

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none">• Aplicação do polímero facilita a sedimentação das partículas;• Melhora os limites de Atterberg, ou seja, necessária maior quantidade de água para o solo atingir o índice de plasticidade e liquidez;• Como o processo de sedimentação é acelerado a aplicação do polímero melhora o equivalente de areia de solos argilosos e siltosos.	<ul style="list-style-type: none">• Não provoca alterações no valor da coesão;• Polímero não tem capacidade de ocupar os espaços vazios existente entre as partículas de argilas e criar uma ligação entre elas;• Não altera os valores de resistência ao corte do solo e por sua vez não trás benefícios quanto à estabilidade;• Diminui a viscosidade da solução solo-polímero.

6 – Conclusões

(página propositadamente em branco)

5. Conclusões

Na presente dissertação verificou-se que os solos em estudo não correspondem geologicamente aos solos estudados por Dias (2016), porque apresentam na sua constituição uma quantidade inferior de finos. Esta particularidade veio interferir com todas as características geológicas, mecânicas e geotécnicas estudadas, porém as características químicas dos materiais permaneceram intocáveis. Esta particularidade quebrou todo o vínculo de ligação existente entre os dois trabalhos realizados, visto que o único meio de comparação possível é o químico.

Para facilitar a compreensão foram criados três cenários geológicos (as areias, os siltes e as argilas) com vista a indicar as vantagens e desvantagens da aplicação do polímero em cada um deles. No que toca às areias, verificou-se que para garantir a estabilização dos solos e a integridade das estacas ou paredes moldadas é aconselhável que na constituição granulométrica não apresente uma percentagem de finos superior a 15% e que não apresente uma baixa condutividade elétrica. Tendo em atenção que dos 15% de finos, apenas 5% deverá corresponder a argilas.

É importante salientar que propriedades como a sedimentação e equivalente de areia apresentaram resultados significativos para a proporção 0,5/1, como tal seria importante verificar se esta concentração garante a estabilização do solo, visto que tal fator poderia tornar a aplicação de polímero ainda mais rentável.

Quanto aos siltes e argilas, no decorrer do estudo apresentaram comportamentos similares, ou seja, não apresentam alterações quanto à resistência após a aplicação do PolyMud®, porém a velocidade de sedimentação das partículas aumentou e o teor de água necessário para atingir o limite de plasticidade e liquidez é superior.

Este estudo baseou-se em verificar a estabilização do solo apenas com a aplicação do PolyMud®. No entanto, o Sistema G3® produzido pela GEO, apresenta mais dois produtos que podem ser incorporados no PolyMud® e que irão fortalecer as ligações das moléculas poliméricas e, por sua vez, reforçar a estabilidade do solo. Com isto, a estabilização dos solos siltosos e argilosos e tal como a GEO tem vindo a aplicar em diversas obras, é possível com aplicação completa do Sistema G3®.

Perspetivas futuras

O tema abordado no presente trabalho corresponde a uma técnica de estabilização pouco estudada comparativamente a outras práticas. Como tal, seria de interesse geral investigar a fundo o polímero como técnica de estabilização, pelo que parece pertinente verificar, em trabalhos futuros, os seguintes aspetos:

- Executar o ensaio de resistência ao corte para a proporção de polímero 0,5/1, em areias, para verificar se garante a estabilização das mesmas. Pois caso se verifique é possível rentabilizar economicamente todo o processo;
- Realizar o ensaio de viscosidade com recurso ao cone de Marsh com a finalidade de verificar se a solução solo-polímero respeita os valores padrão;
- Realizar os ensaios laboratoriais executados neste estudo, com o fim de verificar se as conclusões obtidas se confirmam;
- Alargar as formações geológicas/geotécnicas estudadas com vista a verificar concretamente até que percentagem de finos no solo o polímero consegue atuar sem por em causa a sua eficácia;
- Estudar os solos siltosos e argilosos com os aditivos do sistema G3[®], pois poderão beneficiar em muito a estabilização dos mesmos;
- Verificar até que ponto este tipo de estabilização não poderá ser aplicado para outros fins, por exemplo, melhoria das características dos materiais aplicados nas camadas de base e sub-base das vias rodoviárias.

7- Bibliografia

(página propositadamente em branco)

6. Bibliografia

- Aldeias J. B., 2011. Soluções de escavação e contenção periférica intersectando o nível freático. Instituto Superior Técnico. 34-42 p. (Tese de Mestrado).
- Almeida G. C. P., 2005. Caracterização física e classificação dos solos. Universidade Federal de Juiz de Fora. 92-125 p. (Tese de Mestrado).
- Barbosa M. I. R., 2006. Bentonitas aditivadas com polímeros para aplicação em fluidos de perfuração. Universidade Federal de Campina Grande. 6-22 p. (Tese de Mestrado).
- Barbosa M. I. R., Amorim L. V., Barboza K. R. A., Pereira E. & Ferreira H. C., 2006. Bentonitas aditivadas com polímeros para uso em fluidos de perfuração à base de água. XIV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. p. 2-3.
- Batista P., 2006. Avaliação geotécnica de misturas de um solo laterítico com cimento e bentonita para uso em cortinas verticais. Universidade Federal de Ouro Preto. 21-26 p.; 43-65 p. (Tese de Mestrado).
- Bianchini A., Borges P. H. M., Maia J. C. S. & Nicareta.G., 2009 Avaliação de três equipamentos para determinação do teor de água no solo em condições de campo. *Reveng*: 139-154.
- Branco F. C., 1996. A importância do ensaio de adsorção de azul metileno no controlo da qualidade dos agregados. (Lisboa, Portugal). II Jornadas da indústria mineral portuguesa, 1996.
- Caenn R., Darley H.C.H. & Gray G. R., 2014. Fluidos de perfuração e completação: Composição e propriedades. 6ª Edição. Campus.
- Castelo Branco F., Ferreira M. Q., Correia A. G. & Barros R., 1997. O equivalente de areia e o azul de metileno na avaliação do estado de limpeza dos agregados. In: Acta do 6º Congresso Nacional de Geotecnia - A geotecnia nas infraestruturas de transportes, energia e ambiente/ Lisboa: 783-792.
- Coelho S., 1996. Tecnologia de Fundações. Amadora.
- Costa C. N., 2006. Capítulo 4 – Produtos de alteração das rochas. Faculdade de Ciências e Tecnologia. 6-7 p.
- Coutinho J. S., 1999. Agregados para argamassas e betões. Faculdade de Engenharia do Porto. 12-34 p. (Tese de Mestrado).
- Couto P. M. F., 2014. Estudo de soluções de contenção periférica em função das condicionantes de execução. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa. 47-55 p.; 71-76 p. (Tese de Mestrado).
- Crispim F. A., 2015. Técnicas de melhoria de solos - Solo-betume. Universidade do Estado de Mato Grosso. 1-5 p. (Tese de Mestrado)
- Cruz M. L. & Jalali S., 2010. Melhoramento do desempenho de misturas de solo-cimento com recurso a activadores de baixo custo. *Revista Luso-Brasileira de Geotecnia*, Novembro de 2010: 49-64.
- Cunha R. A. F., 2014. Contribuição para a metodologia de estudo de melhoria de um solo com cimento no âmbito de uma obra rodoviária. Universidade Fernando Pessoa. 57-72 p. (Tese de Mestrado)
- Dias B. F. P. B. S., 2016. Caracterização de diferentes solos e análise prospetiva com vista à respetiva estabilização. Instituto Superior de Engenharia do Porto. (Tese de Mestrado)
- Dias J. A., 2004. A análise sedimentar e o conhecimentos dos sistemas marinhos. Universidade do Algarve. 13-16 p.
- Duarte G. J., 2010. Tixotropia em fluidos poliméricos. *Igeopres*, Janeiro-Feveiro de 2010: 18-20.
- Eires R., Camões A. & Jalali S., 2014. Materiais e técnica antigas para melhorar a durabilidade dos edifícios em terra. Congresso Luso-Brasileiro de Materiais de Construção Sustentáveis, 2014. p. 3.

-
- Eires R., Camões A. & Jalali S., 2010. Optimização do desempenho de construção em terra com recurso a bio-polímeros. Universidade do Minho. 1-6 p.
- Federation of Piling Specialists, 2006. Bentonite support fluids in civil engineering. 3-13 p.
- Fernandes M. M., 2012. Mecânica dos solos - Conceitos e princípios fundamentais. 3ª Edição. Vol. 1. FEUP edições. ??? p.
- Filho J. A. P., Dias A. J. G. & Duarte E. B. L., 2013. The use of polymer slurry as an economic and sustainable way to build diaphragm walls - a case study of a construction work in São Paulo/Brazil. 299-306 p.
- García J. F. Estabilización de pilotes de 2.800 mm mediante sistema G3 de GEO. Ingeopres, Agosto de 2010: 22-24.
- Gonçalves H. H. S., Marinho F. A. M. & Futai M. M., 2014. Mecânica dos solos e fundações. 6-17 p.
- Gorski C. M. F. M., 2010. Estabilização de solos argilosos com ligante hidráulico LIPIDUR DS. Universidade da Beira Interior.. 39-41 p.; 51-58 p. (Tese de Mestrado).
- Hang P. T. & Brindley G. W., 1970. Methylene blue absorption by clay minerals. Determination of surface areas and cation exchange capacities. In: Clays and clay minerals. Vol 18. 203-212 p.
- Iamato K. Y. & Barros J. M. C., 2013. Hidrofesa inovadora. Revista Notícias da Construção, Outubro de 2013: 48-49.
- Jaramillo I., Carretero C. & Pavéz C., 2008. Determinacion de los limites de atterberg. Universidad Catolica de Valparaiso. 1-15 p. (Manual de Laboratorio).
- Kirschener B. D., 2008. Avaliação da estabilidade de fluidos de perfuração base água. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. 7-13 p.
- Luz A. B. & Oliveira C. H. Argila - Bentonita. 239-241 p.
- Machado L. F. M., 2016. Uso de polímero na estabilização de solo de Sergipe para fins de pavimentação. Universidade Federal de Sergipe. 2-9 p.
- McQuarrie D. A., Rock P. A. & Gallogly E. B., 2011. Interchapter S - Synthetic Polymers. In: General Chemistry. Universty Science Books. 1-6 p.
- Medina J. & Motta. L. M. G., 2005. Mecânica dos pavimentos. 3ª Edição. COPPE. 48-53 p.
- Meireles A. B & . Martins J. G., 2006.. Fundações e contenção lateral de solos - Execução de cortinas de estacas. 1ª Edição. 18-25 p.
- Mendonça A., 2016. Reforço e contenção de terrenos. Instituto Superior de Engenharia do Porto. (Apontamentos teóricos).
- Mil-Homens S. F., 2012. Contenção periférica e fundações por estacas moldadas. Instituto Superior Técnico. 30-44 p.; 49-60 p. (Tese de Mestrado).
- Mitchell J. K. & Soga K., 2005. Fundamentals of soil behavior. Third Edition. New Jersey: John Wiley & Sons. 70-74 p., 95-97 p.
- Mogrovejo D. R. L., 2013. Avaliação das propriedades geotécnicas de um solo argiloso e outro arenoso com adição de fibras de papel kraft. Faculdade de Engenharia Civil. 19-25 p.; 70-79 p. (Tese de Mestrado).
- Oliveira P.J., 2010. Noções básicas de mecânica dos fluidos e de fluidos não newtonianos - Parte I. 1p.
- Patrício D. J., 2015. Estudo de solos modificados por adição de polímeros para o uso em pavimentos rodoviários. Universidade Federal de Campina Grande. 4-21 p.; 25-30 p.; 80-82 p. (Tese de Mestrado).
- Piccoli R., Nascimento G. C., Perdoná C. R., Perucchi P., Vitoretto P. P. & Wernck A. S. W., 2011. A importância da utilização da difração de raios na caracterização de argilas. Centro de Tecnologia em Cerâmica. 2-4 p.
- Pinto R. N. M. G., 2008. Sistemas Construtivos de Estruturas de Contenção Multi-apoiadas em Edifícios. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. 87-114 p. (Tese de Mestrado).
-

-
- Polymer Drilling Systems. Super mud polymer slurry for excavation perfection. Polymer Drilling Systems. 1-6 p.
- Quintino A. C., Andrade P. J., Silva T. J., Caneppele M. A. & Abreu J. G., 2015. Métodos de determinação de umidade nos solos de cerrado. Enciclopédia Biosfera. 2205-2206 p.
- Rattichieri M. M., 2015. Metodologia constitutiva de paredes diafragma. Universidade Estadual Paulista. 19-27 p.; 38-47p. (Tese de Mestrado).
- Ribeiro S. P. T., 2008. Terraplenagem. Metodologia e técnicas de compactação. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. 33-39 p. (Tese de Mestrado).
- Santana T. & Rodrigues P. F., 2005. Ensaio de caracterização laboratorial de solos com vista à sua utilização em arquitetura de terra crua. Seminário Ibero-Americano de Construção em Terra. Monsaraz.. 2-4 p.; 6 p..
- Santos E. S., Gama E. M., França R. S., Souza A. S. & Matos R. P., 2013. Espectrometria de fluorescência de raios-x na determinação de espécies químicas. Universidade Federal da Bahia. 2-4 p.
- Santos J. A., 2008. Compactação - Elementos teóricos. Instituto Superior Técnico. 4-7 p.
- Santos M., Lima D. & Bueno B., 1995. Estabilização dos solos com cal e betume. 6º Reunião de Pavimentação Urbana. 2-3 p.
- Santos M. B., 2012. Perfuração de poços de petróleo: fluidos de perfuração. 121-127 p.
- Scientific Horiba, 2016. A guidebook to particle size analysis. Horiba Scientific. 20-21 p.
- Shanmugam S., et al., 2005. Natural polymers and their applications. Natural Product Radiance. 478-481 p.
- Shiroma P. H., 2012. Estudo do comportamento reológico de suspensões aquosas de bentonita e CMC: influência da concentração do NaCl. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 23-26 p., 34-37 p. (Tese de Mestrado).
- Silva A. L., 2013. Caracterização mineralógica por difração de raios x e determinação de terras raras por ICP-MS de rochas da região sul da Bahia. Universidade Federal de Minas Gerais. 13-35 p., 43-44 p. (Tese de Mestrado).
- Silva R. E. R., 2013. Determinação da massa específica de solos (que passam na peneira 4,8 mm) pelo método da estufa. Instituto de Ciências Ambientais de Desenvolvimento Sustentável. 4-8 p.
- Soliz V. V. P., 2007. Estudo de Três Solos Estabilizados com Emulsão Asfáltica. Universidade Federal do Rio de Janeiro. 21-28 p. (Tese de Mestrado).
- Sousa P. M. L. P., 2011. Limite de liquidez - Correlações e comparações entre os métodos de fall cone e da concha de casagrande. Faculdade de Ciências e Tecnologia. 23-35 p. (Tese de Mestrado).
- Stapel E.E. & Verhoef P.N.W., 1989. The use of the methylene blue adsorption test in assessing the quality of basaltic tuff rock aggregate. In: Engineering Geology. Vol 16. Mining Science and Technology. 212-220 p.
- State Materials Office, 2009. Soils and foundations handbook. 9 p.,33 p.
- Susianti-K. B. R., 2010. Evaluation of acrylic polymer soil stabilizer using aggregate stability test. Central Connecticut State University. 14-22 p. (Master Theses).
- Tonnesen D. A., 2010. Caracterização e beneficiamento das bentonitas dos novos depósitos de Cubati-PB. Universidade Federal do Rio de Janeiro. 3-6 p. (Tese de Mestrado).
- Torgal F. P. & Jalali S., 2009. Construção em terra: Algumas considerações sobre a selecção de solos. Universidade do Minho. 2-4 p.
- Trindade E., 2012. El Sistema G3 de GEO se consolida como alternativa eficaz a la bentonita en el mercado de cimentaciones indio. Ingeopres, Fevereiro de 2012: 64-66.
- Trindade E. M. A., 2010. Uso de polímero como substituto da bentonite na estabilização de escavações em solos. Universidade de Évora. 7-13 p., 19-63 p. 71-72 p. (Tese de Mestrado).
-

Verruijt A., 2001. Soil mechanics. Delft University of Technology. 6-26 p.

Welling E. G., 2012. Engineering performance of polymer amended soils. Faculty of California Polytechnic State University. 17-51 p. (Master Theses).

Yukselen Y. & Kaya A., 2008. Suitability of the methylene blue test for surface area, cation exchange capacity and swell potential determination of clayey soils. In: Engineering Geology. Vol 102. 38-45 p.

Normas ou regulamentos

ASTM(2016): Designation: D2166/D2166M-16 - Standard test method for unconfined compressive strength of cohesive soil. American Society for Testing and Materials, United States.

DSNR (2013): Soil survey standard test method: Electrical conductivity (C1A/3). Department of Sustainable Natural Resources, Austrália.

LNEC (1966): Especificação E 196-1966, Solos - Análise granulométrica. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.

LNEC (1966): Especificação E 195-1966, Solos - Preparação por via seca de amostras para ensaios de identificação. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.

LNEC (1967): Especificação E 199-1967, Solos – Ensaio de equivalente de areia. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.

LNEC (1967): Especificação E 203-1967, Solos – Determinação do pH. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.

LNEC (1967): Especificação E 199-1967, Solos – Ensaio de equivalente de areia. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.

LNEC (1970): Especificação E 239-1970, Análise granulométrica por peneiração húmida. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.

NP (1965): Norma portuguesa NP – 84, Solos - Determinação do teor em água. Lisboa.

NP (1965): Norma portuguesa NP – 83, Solos - Determinação do peso específico das partículas sólidas. Lisboa.

NP (1969): Norma portuguesa NP – 143, Solos – Determinação dos limites de consistência. Lisboa.

Sites da internet

Boxmin SAS, 2013. Equipo de medición. En: <http://boxminsas.com/equipos-de-medicion/> (consultado em Fevereiro de 2017).

Proeti. Catálogo de Equipo Baroid. En: <http://proetisa.com/proetisa-productos.php?ID=212> (consultado em Fevereiro de 2017).

Shimadzu, 2017. Princípio e Recursos da espectrometria de fluorescência de raios-x. Em: http://www.shimadzu.com.br/analitica/productos/elemental/raios_x/eds/edx7000_8000-1.shtml (consultado em Fevereiro de 2017).

SPFE – Sociedade Portuguesa de Fundações Especiais. Estacas escavadas sem uso de lama bentonítica ou polímero. Em: <http://www.spfe.com.pt/semlama.html> (consultado em Fevereiro de 2017).

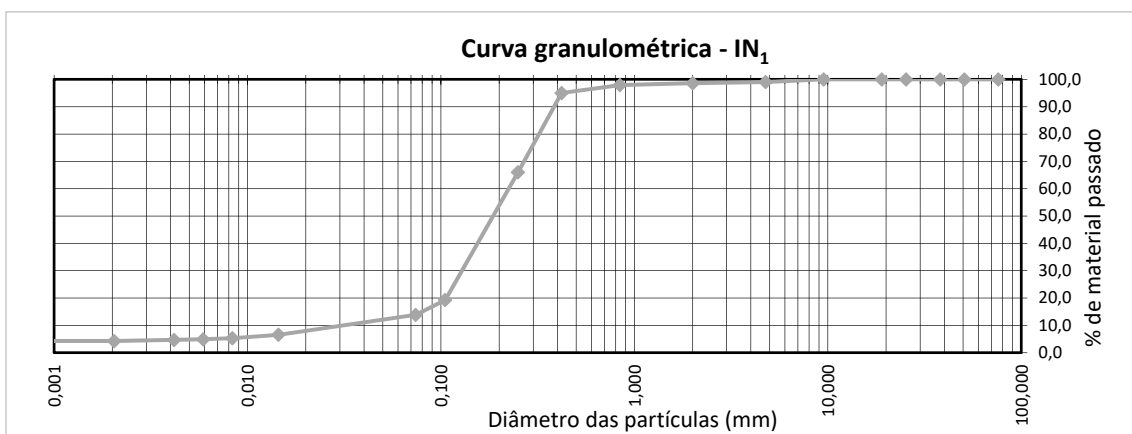
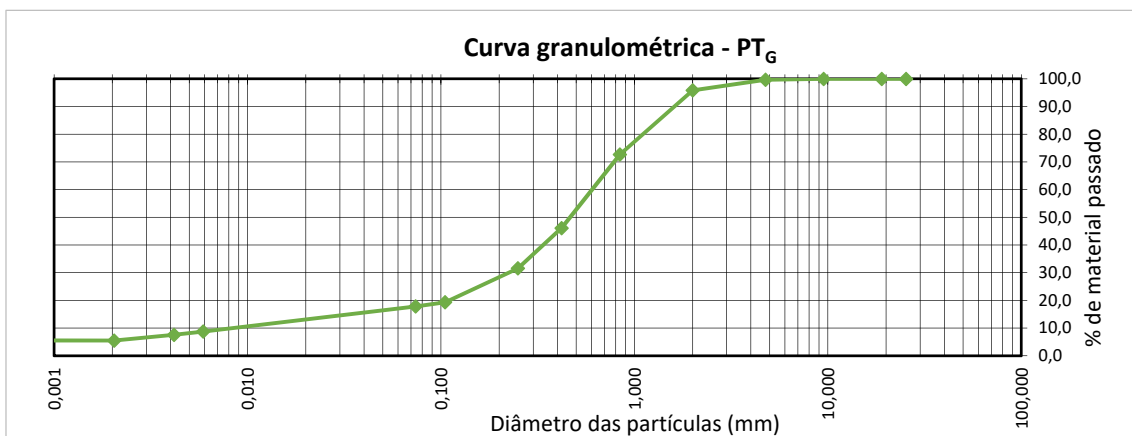
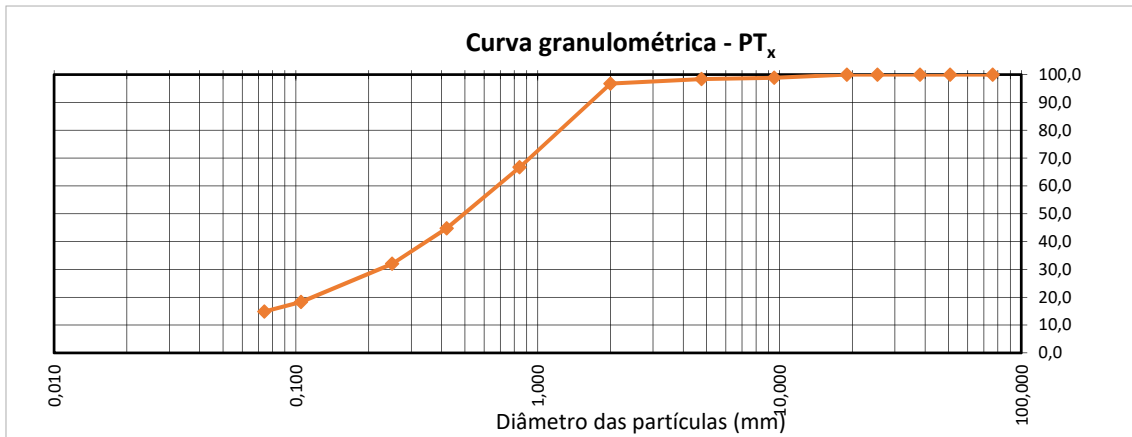
Dairix. XL3T Thermo Fisher. Em: <http://www.dairix.com.br/products/view/98> (consultado em Fevereiro de 2017).

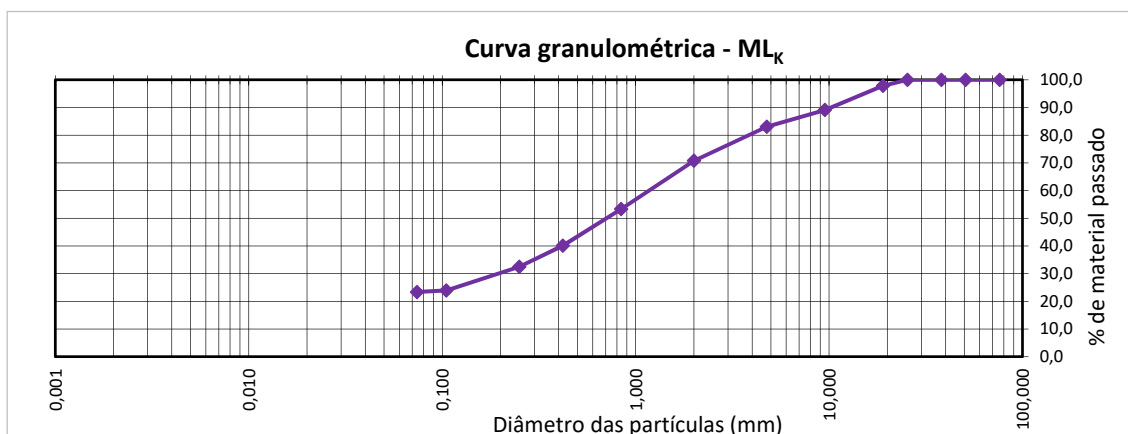
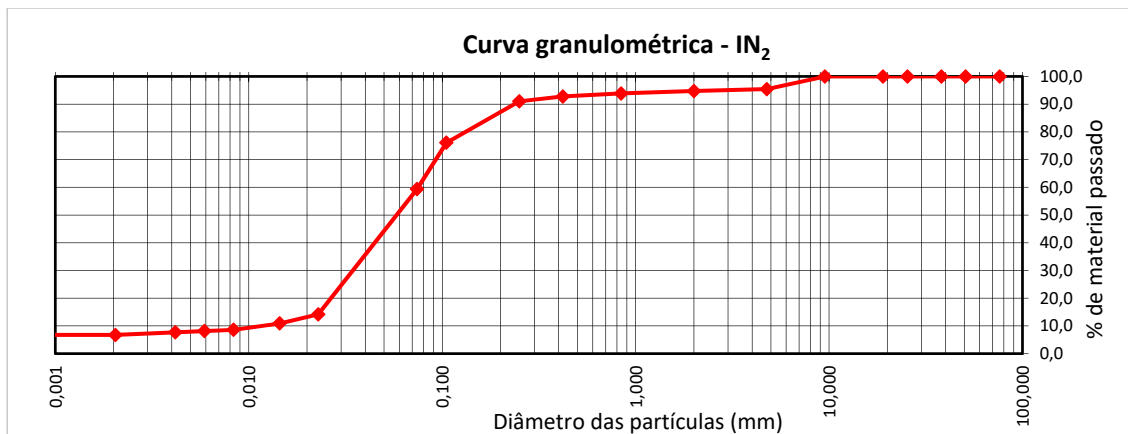
7 – Anexos

(página propositadamente em branco)

7. Anexos

Anexo I





Anexo II – Ensaios – Análise granulométrica (ver CD)

Anexo III – Ensaios – Curva granulométrica (ver CD)

Anexo IV – Ensaios – Ensaio de sedimentação (ver CD)

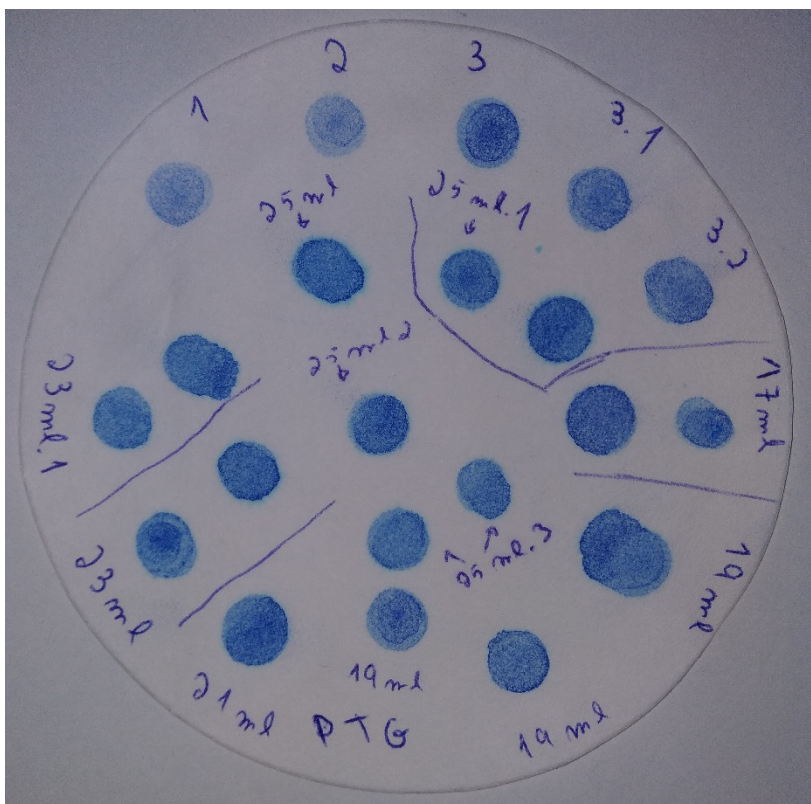
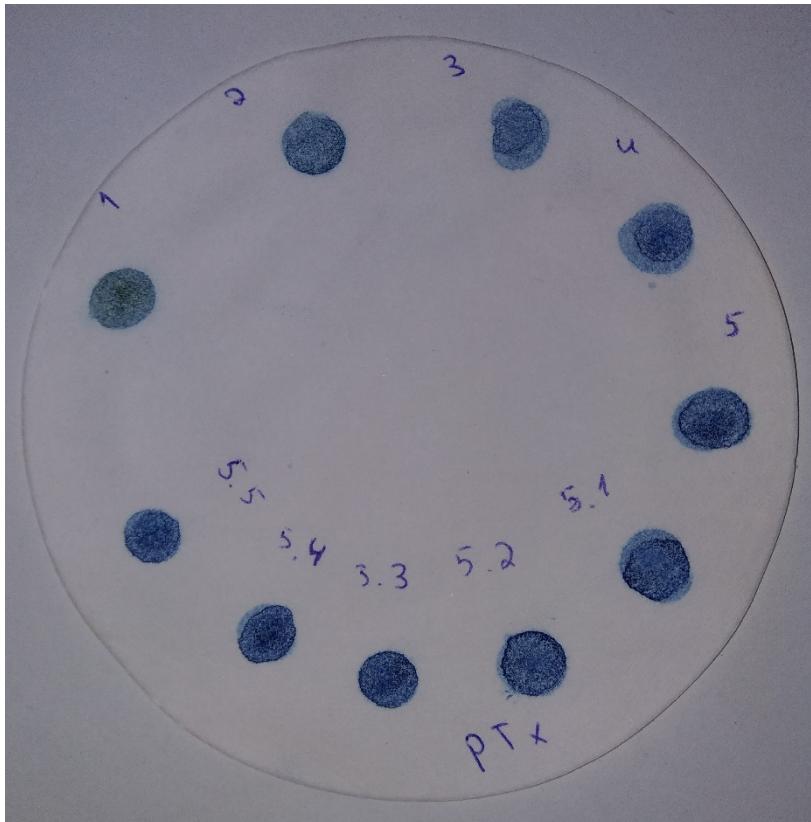
Anexo V – Ensaios – Ensaio sedimentação - Polímero (ver CD)

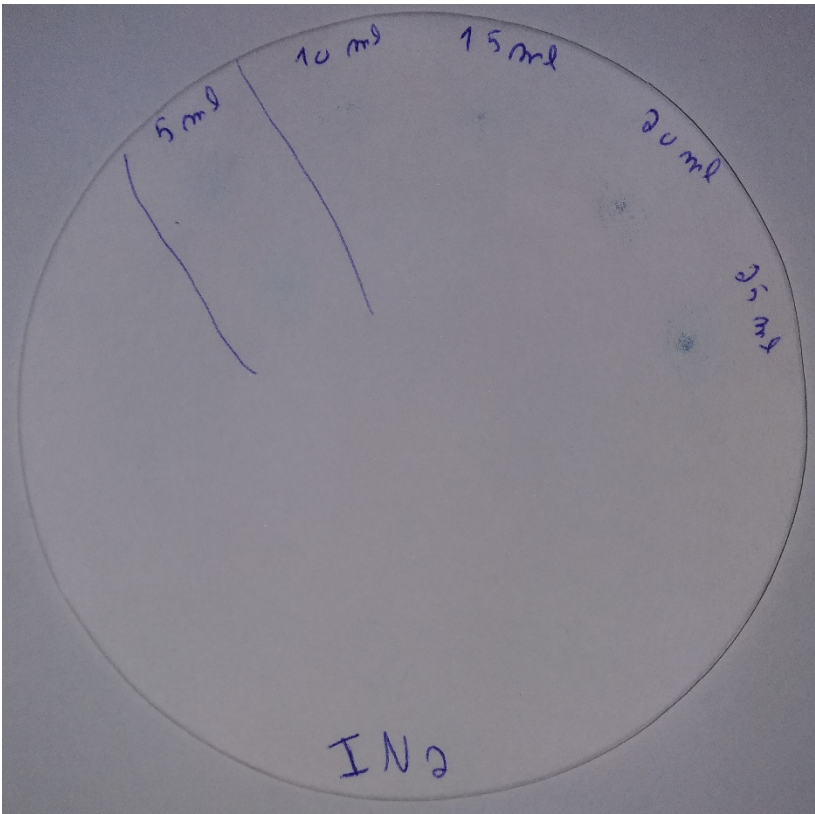
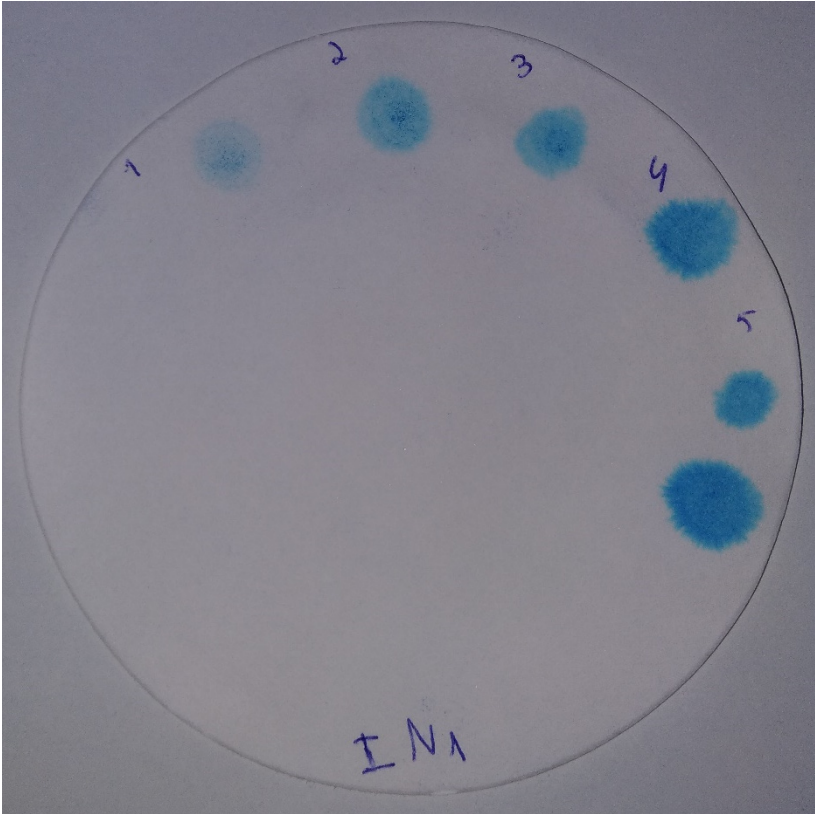
Anexo VI – Ensaios – Limites de consistência (ver CD)

Anexo VII – Ensaios – Teor de água (ver CD)

Anexo VIII – Ensaios – Azul de metileno (ver CD)

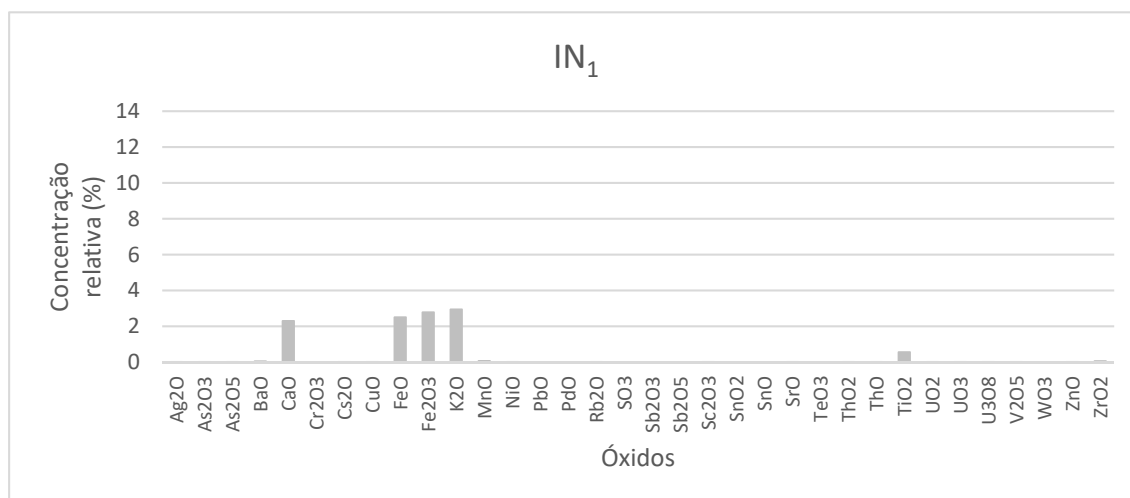
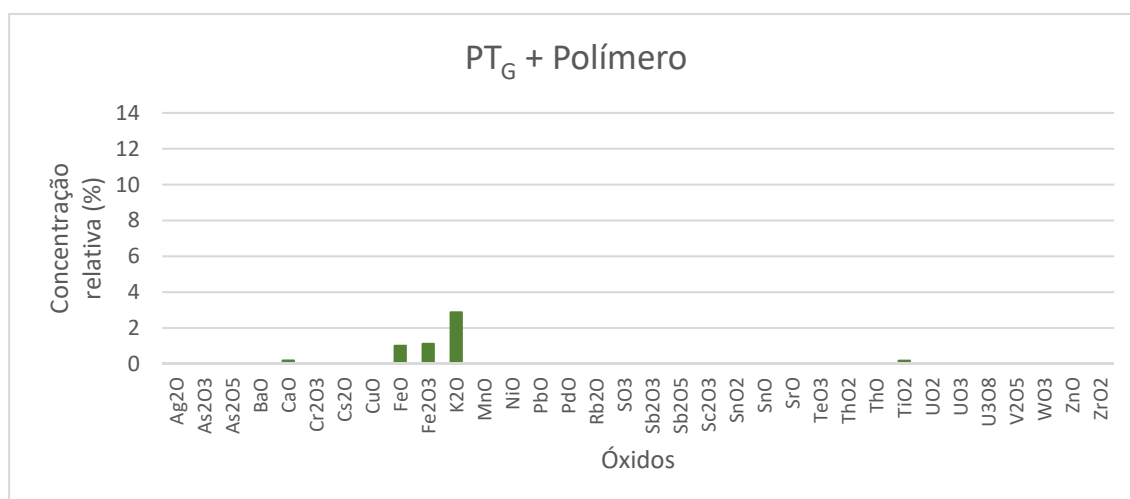
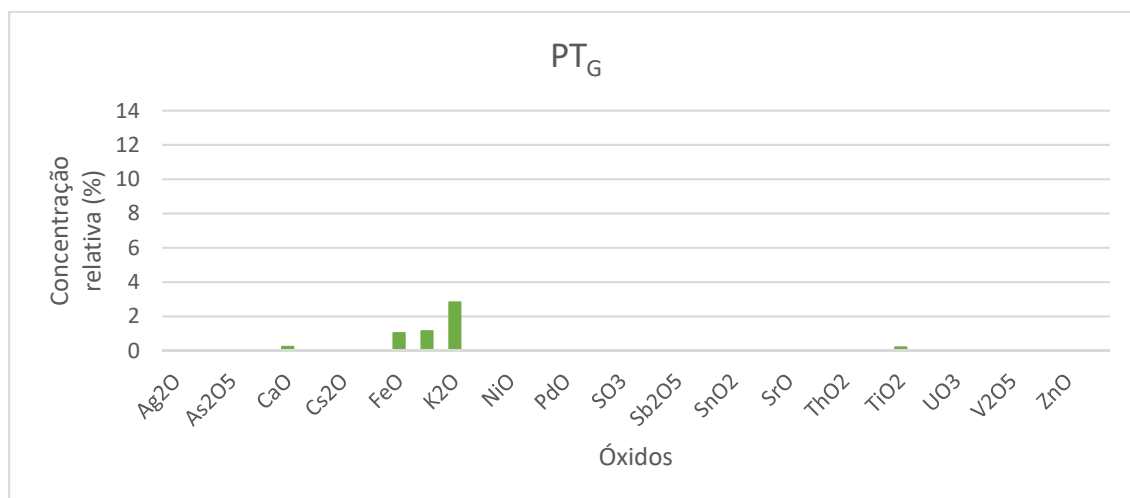
Anexo IX

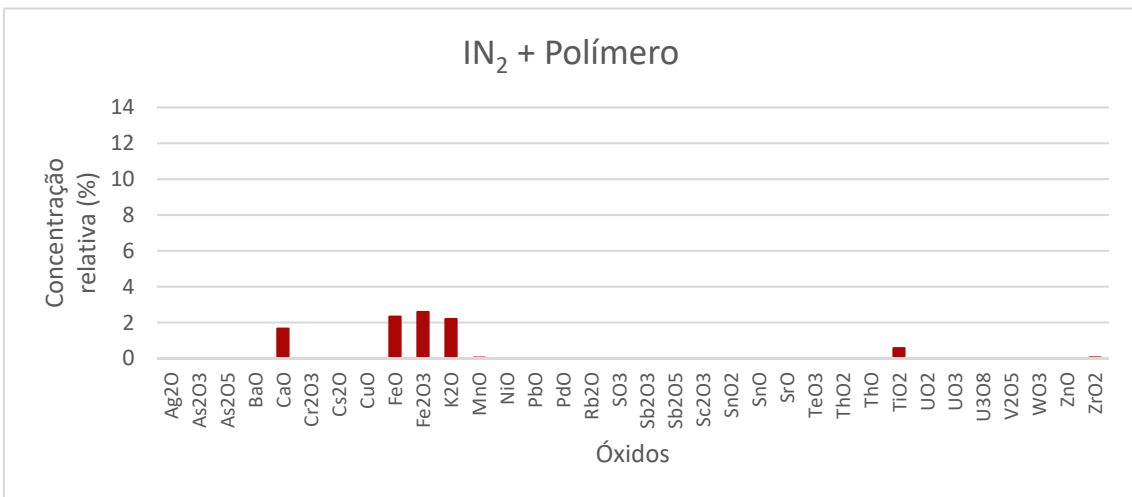
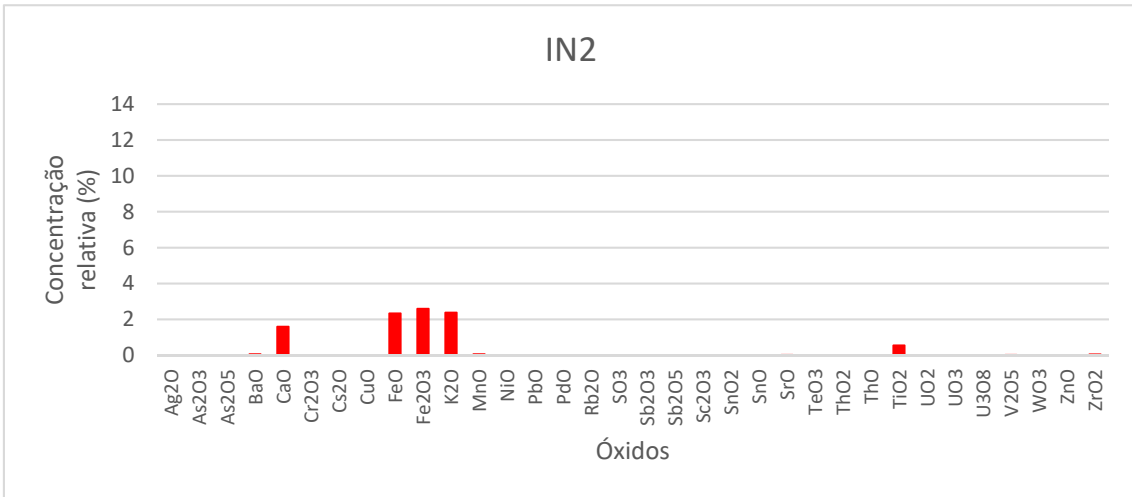
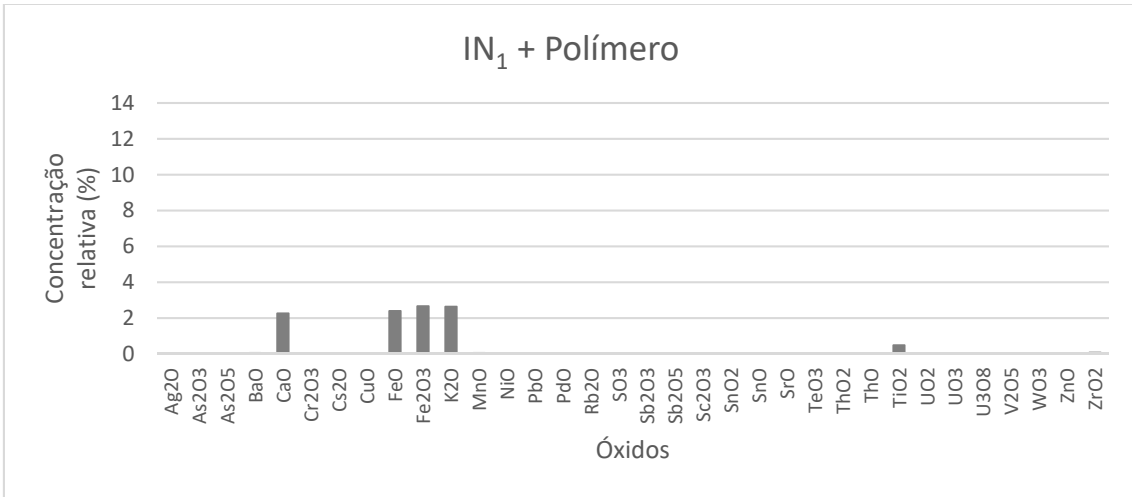


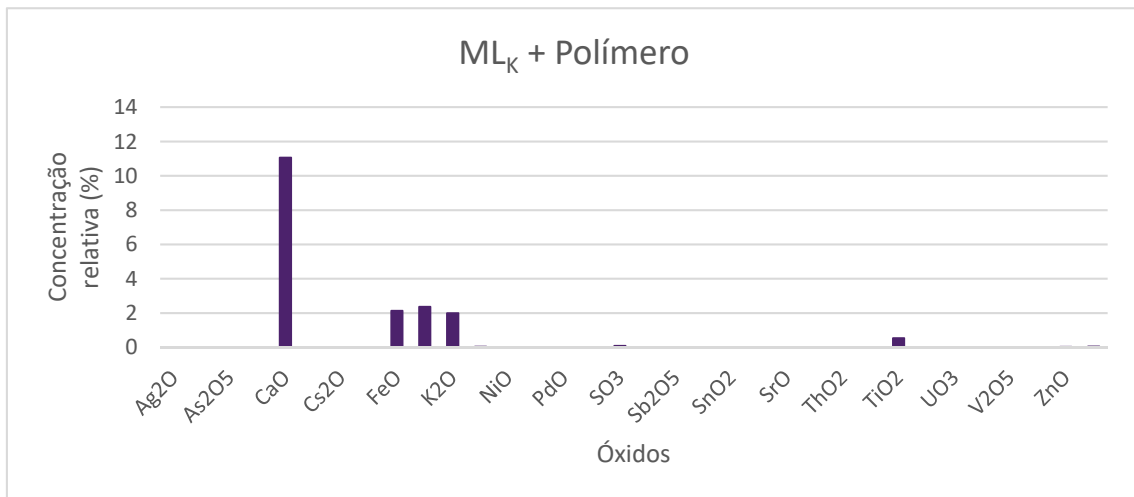
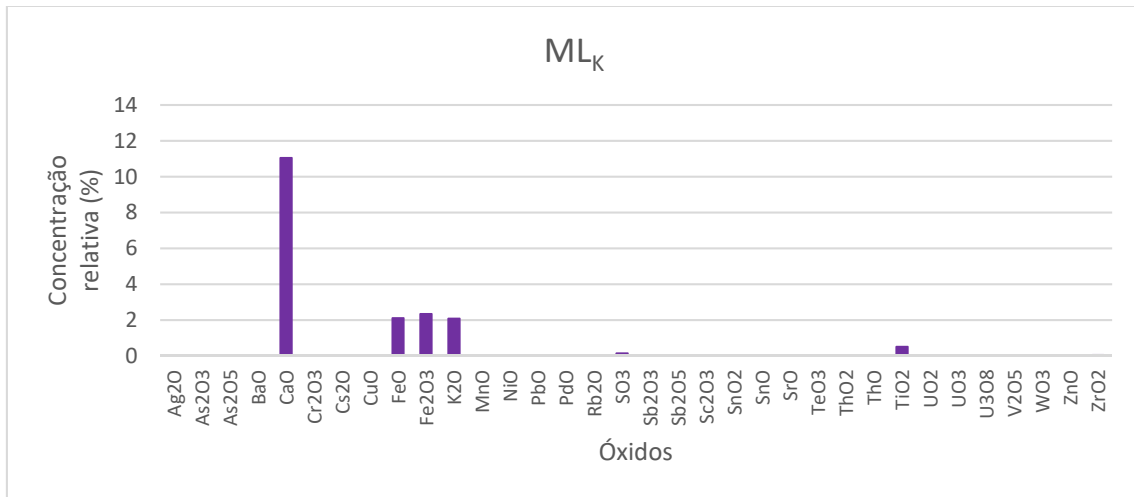


-
- Anexo X – Ensaio – Massa específica (ver CD)
- Anexo XI – Resistência ao corte - PT_x (ver CD)
- Anexo XII – Resistência ao corte - PT_x + Polímero (ver CD)
- Anexo XIII – Resistência ao corte – PT_G (ver CD)
- Anexo XIV – Resistência ao corte – PT_G + Polímero (ver CD)
- Anexo XV – Resistência ao corte – IN_1 (ver CD)
- Anexo XVI – Resistência ao corte – IN_1 + Polímero (ver CD)
- Anexo XVII – Resistência ao corte – IN_2 (ver CD)
- Anexo XVIII – Resistência ao corte – IN_2 + Polímero (ver CD)
- Anexo XIX – Resistência ao corte – ML_k (ver CD)
- Anexo XX – Resistência ao corte – ML_k + Polímero (ver CD)
- Anexo XXI – Ensaio – Condutividade elétrica (ver CD)
- Anexo XXII – Ensaio – Análise química (ver CD)

Anexo XXIII







Anexo XXIV – Ensaios – Equivalente de areia (ver CD)

Anexo XXV – Ensaios – pH (ver CD)

Anexo XXVI – Ensaios – Viscosidade de Brookfield (ver CD)