

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

**Melhoramento de um Solo Dispersivo com o Aditivo
Lignosulfonato de Cálcio**

Lisandra Rocha de Moraes

Porto Alegre
2022

LISANDRA ROCHA DE MORAES

**MELHORAMENTO DE UM SOLO DISPERSIVO COM O
ADITIVO LIGNOSULFONATO DE CÁLCIO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul,
como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em
Engenharia.

Orientador: Nilo Consoli

Co-orientador: Cezar Bastos

Porto Alegre
2022

LISANDRA ROCHA DE MORAES

**MELHORAMENTO DE UM SOLO DISPERSIVO COM O
ADITIVO LIGNOSULFONATO DE CÁLCIO**

Esta dissertação de mestrado foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA, Área de Concentração Geotecnia, e aprovada em sua forma final pelo professor orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 28 de Março de 2022

Prof. Nilo Consoli

Ph.D pela Concórdia University, Canadá
Orientador

Prof. Cezar Bastos

Doutor pela UFRGS
Co-orientador

BANCA EXAMINADORA

Prof. Lucas Festugado (UFRGS)

Dr. Pela Universidade Federal do Rio
Grande do Sul

Prof. Luiz Fernando Spinelli (UFPEL)

Dr. Pela Universidade Federal do Rio
Grande do Sul

**Profa. Sara Rios (Universidade do
Porto, Portugal)**

Pós Doutorado Pela Universidade do Porto

**Ruben Alejandro Quiñónez Samaniego
(Universidad Nacional de Asunción,
Paraguay)**

Dr. Pela Universidade Federal do Rio
Grande do Sul

AGRADECIMENTOS

À minha mãe Iansã pelos caminhos abertos e pela força dada para chegar até aqui. Aos meus guias pelo direcionamento e cuidado.

Aos meus pais por todo suporte financeiro, emocional e logístico. Obrigada pelo incondicional estímulo ao estudo e apoio às minhas decisões. Obrigada por acreditarem no meu potencial, sem o apoio de vocês eu não teria conseguido chegar até aqui.

Ao meu companheiro de vida, Hiago, pelo apoio inestimável e incansável. Obrigada por ser minha força, suporte e confiança para suportar os dias ruins. Todo meu amor e gratidão.

Ao meu professor e orientador Nilo Consoli agradeço muitíssimo por toda orientação, apoio e transmissão de conhecimentos durante este período. Agradeço pelo excelente trabalho, pela atenção, disponibilidade e por estar sempre disposto a me auxiliar. Muito obrigada!

Ao meu professor e orientador Cezar Bastos, com quem tenho a honra de ser orientada desde o meu primeiro ano na graduação, e que se manteve fundamental ao longo de toda minha formação acadêmica e profissional. Agradeço imensamente pelos conhecimentos passados, por sempre estar disponível e não medir esforços para me auxiliar. Você é um profissional exemplar, inspirador e o grande responsável por meus pequenos passos na área da Geotecnia. Muito obrigada!

Ao Laboratório de Geotecnia e Concreto e a Escola de Engenharia da FURG por todo o apoio para a realização desta pesquisa e, mesmo antes, pelos seis anos de parceria durante meu tempo como bolsista enquanto cursava minha graduação e posteriormente como professora auxiliar.

Aos professores Sérgio Marques e Diego Fagundes, pela disponibilidade e auxílio, principalmente na execução dos ensaios triaxiais.

Ao Centro de Microscopia Eletrônica da Zona Sul (CEMESUL – FURG) pela execução e auxílio nos ensaios de DRX e MEV desta pesquisa.

À empresa Borregard Lignotech por disponibilizar o aditivo químico Lignosulfonato de Cálcio utilizado nesta pesquisa, possibilitando que a mesma pudesse ser realizada.

À CAPES e ao CNPQ pela bolsa de estudos, cujo o apoio financeiro foi essencial para realização dessa pesquisa.

A todos os demais que, de forma direta ou indireta, contribuíram para realização deste trabalho.

Nem todo mundo vai compreender isso tudo que você é
o que não significa que você deva se esconder ou se calar
o mundo tem medo de mulheres extraordinárias

Ryane Leão

RESUMO

MORAES, L. R. **Melhoramento de um solo dispersivo com o aditivo químico lignosulfonato de cálcio.** 2021. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio grande do Sul, Porto Alegre.

A Região Sul da Planície Costeira do Estado do Rio Grande do Sul tem destacada ocorrência de solos dispersivos, os quais geralmente são responsáveis por processos de erosão superficial e interna (*piping*) em obras de engenharia. Esses materiais são caracterizados pela defloculação na presença de água relativamente pura e estática, e tais propriedades são observadas em argilas sódicas, pois os cátions de sódio (Na^+) são fracamente carregados, proporcionando um sistema com baixo nível de forças atrativas entre as partículas dos argilominerais. Durante as últimas décadas, no melhoramento de solos tem-se buscado substituir o uso de materiais sintéticos industriais por materiais de base biológica, biodegradáveis e subprodutos reutilizáveis. Neste contexto, o lignosulfonato de cálcio (LS), um polímero de base biológica, obtido como subproduto da indústria de papel, vem sendo utilizado por diversos autores e seu uso além de beneficiar as propriedades do solo também elimina os custos econômicos e ambientais de sua disposição. Dessa forma, o presente trabalho propõe o melhoramento de um solo dispersivo oriundo de área urbana da cidade Pelotas/RS com o aditivo lignosulfonato de cálcio. Para isso, o desempenho do solo melhorado foi avaliado em termos de resistência à compressão simples, rigidez inicial, durabilidade e dispersibilidade, visando obter a melhor combinação de peso específico aparente seco máximo, teor de LS e tempo de cura que forneceria maior ganho de resistência à compressão simples e reversão da dispersibilidade. Além disso, a microestrutura da mistura de melhor desempenho foi estudada através da difração de raios-X (DRX) e microscopia eletrônica de varredura (MEV). Os resultados indicaram grande efeito do tempo de cura na resistência e melhoramento da dispersibilidade das amostras. No que diz respeito à microestrutura, pôde-se verificar mudanças na mineralogia do solo através dos resultados de DRX e mudanças substanciais na morfologia desse por meio das imagens de MEV. Por fim, pode-se constatar a bem sucedida supressão da dispersibilidade do solo, em decorrência da adição do LS, através do *pinhole test*, *crumb test* e sedimentometria comparativa.

Palavras-chave: *melhoramento de solos; solo dispersivo; lignosulfonato de cálcio.*

ABSTRACT

MORAES, L. R. **Improvement of a dispersive soil with the chemical additive calcium lignosulfonate.** 2021. Dissertation (Master's degree in Geotechnics) – Postgraduate Program in Civil Engineering, UFRGS, Porto Alegre.

The Southern Region of the Coastal Plain of the State of Rio Grande do Sul in Brazil, has dispersive soils, which are always performed by internal processes (piping) recurrent in engineering works. They are characterized of flocculation in the presence of relatively pure and static water, and such properties are observed in sodium clays, as the sodium cations (Na⁺) are weakly charged, providing a system with a low level of attractive forces between the clay minerals particles. . During the last decades, soil improvement has sought to replace the use of industrial synthetic materials with bio-based, biodegradable materials and reusable by-products. In this context, calcium lignosulfonate (LS), a bio-based polymer, obtained as a by-product of the paper industry, has been used by several authors and its use, in addition to benefiting the properties of the soil, also eliminates the economic and environmental costs of its use disposition. Thus, we present the dispersed work of improvement of a single plant from the urban area of Pelotas/RS with the calcium lignosulfonate additive For this, the performance of the soil was evaluated in terms of resistance designed and designed for the initial time, theoretical durability, aiming to improve the specific weight of maximum cure, which provides the greatest resistance to the gain of durability to simple sustainability and reversal of dispersibility In addition, the best-performing X-mixture microstructure was studied through ray diffraction (XRD) and scanning electron microscopy (SEM). The results indicated a great effect of the curing time on the strength and improvement of the dispersibility of the samples. With regard to microstructure, changes in soil mineralogy could be verified through XRD results and substantial changes in soil morphology through SEM images. Finally, it can be seen the successful suppression of soil dispersibility, due to the addition of LS, through the pinhole test, crumb test and comparative sedimentometry.

Key-words: *improvement of soils; dispersive soils; calcium lignosulfonate.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Delineamento da pesquisa.	23
Figura 2.1 - Diagrama da estrutura da caulinita. (fonte: adaptado de Mitchel, 1976 apud Cruz, 2008).....	27
Figura 2.2 - Diagrama esquemático da estrutura das caulinitas e serpentinitas. (fonte: Cruz, 2008).....	27
Figura 2.3 - Fotografia eletrônica de partículas de caulinita. (fonte: Mitchel, 1976 apud Cruz, 2008.).....	28
Figura 2.4 - Diagrama da estrutura das ilitas. (fonte: adaptado de Mitchel, 1969 apud Cruz, 2008).....	28
Figura 2.5 - Fotografia eletrônica de partículas de ilita. (fonte: Cruz, 2008).....	29
Figura 2.6 - Imagem de microscopia eletrônica de varredura: crescimento de esmectita sobre um grão de feldspato detrítico (setas). (fonte: Costa <i>et al.</i> , 2010).....	30
Figura 2.7 - Comportamento de argilas sódicas e não-sódicas em água. (fonte: adaptado de Belarbi <i>et al.</i> , 2013).	31
Figura 2.8 - Problemas causados em argilas dispersivas em solos do Arizona. (fonte: adaptado de Sherard <i>et al.</i> , 1972).....	33
Figura 2.9 - Limites de consistência (Carta de Plasticidade de Casagrande): solos dispersivos x solos não dispersivos. (fonte: adaptado de Sherard <i>et al.</i> , 1975).....	35
Figura 2.10 - Identificação visual dos graus de dispersão pelo Crumb Test. (fonte: adaptado de Ipswich Planning Scheme, 2016, p.3)	36
Figura 2.11 - Equipamento do Pinhole Test. (fonte: adaptado de Furtado e Machado, 1982). 37	
Figura 2.12 - Diagrama de classificação quanto à dispersão pelo Pinhole Test. (fonte: NBR14114 (ABNT, 1998)).	38
Figura 2.13 - Relação entre a dispersão e a química da água dos poros do solo com base em pinhole tests e experiência com erosão na natureza. (fonte: adaptado de Sherard <i>et al.</i> , 1975).	40
Figura 2.14 - Determinação da razão de dispersividade através da curva granulométrica do ensaio de sedimentação com dispersante (a) e sem dispersante (b). (fonte: adaptado de Belarbi <i>et al.</i> , 2013).....	41
Figura 2.15 - Previsão de comportamento de erosão interna de uma areia siltosa tratada com lignosulfonato de cálcio. (fonte: adaptado de Athukorala <i>et al.</i> , 2013).....	48

Figura 2.16 - Difratoograma de um solo expansivo natural e tratado com 2% de LS. (fonte: adaptado de Alazigha <i>et al.</i> , 2016)	50
Figura 2.17 - Dependência do tempo de cura no comportamento de expansão de um solo tratado com LS. (fonte: adaptado de Alazigha <i>et al.</i> , 2016).....	52
Figura 2.18 - Imagem microscópica ampliada 4000x de uma argila não tratada. (fonte: Ta'negonbadi e Noorzad, 2017)	53
Figura 2.19 - Imagem microscópica ampliada 4000x de uma amostra de lignosulfonato de cálcio. (fonte: Ta'negonbadi e Noorzad, 2017).....	53
Figura 2.20 - Imagem microscópica ampliada 4000x de uma amostra de argila tratada com 0,75% de lignosulfonato de cálcio. (fonte: Ta'negonbadi e Noorzad, 2017).....	54
Figura 2.21 - Imagens de MEV de a) Solo não tratado b) Solo tratado com LS. (fonte: Li <i>et al.</i> , 2019).....	55
Figura 2.22 - Comparação das curvas granulométricas de um solo natural, tratado com 2% de LS e com 2% de cimento. (fonte: adaptado de Alazigha <i>et al.</i> , 2016)	56
Figura 3.1 - Localização do bairro Quartier no mapa do estado do Rio Grande do Sul. (fonte: Google Maps)	61
Figura 3.2 - Mapa de unidades geológicas. Área de estudo localizada na unidade d1a: depósito de leques aluviais. (fonte: adaptado por Xavier, 2017)	61
Figura 3.3 - Mapa de unidades pedológicas. Área de estudo localizada na unidade SX3: planossolo háplico. (fonte: adaptado por Xavier, 2017).....	62
Figura 3.4 - Imagem aérea do bairro Quartier da cidade de Pelotas/RS. (fonte: Teitelbaum, J., 2019).....	62
Figura 3.5 - Vista aérea do bairro Quartier da cidade de Pelotas/RS. (fonte: Teitelbaum, J., 2019).....	63
Figura 3.6 - Embalagem do aditivo lignosulfonato de cálcio (LS) e amostra do mesmo. (fonte: Moraes <i>et al.</i> , 2019).....	64
Figura 3.7 - Local de amostragem do solo, apresentando visualmente comportamento dispersivo: ravinamento e água turva acumulada.....	65
Figura 3.8 - Local de extração das amostras indeformadas do solo utilizado nesta pesquisa. .	66
Figura 3.9 - Prensa hidráulica e moldes metálicos utilizados para moldagem dos corpos de prova.	68
Figura 3.10 - Aspecto do corpo de prova após moldagem.	69
Figura 3.11 - Ruptura dos corpos de prova em compressão simples.	70
Figura 4.1 - Distribuição granulométrica do solo dispersivo.	75

Figura 4.2 - Curvas de compactação com solo dispersivo.	77
Figura 4.3 - Início do Crumb Test para o solo natural com peso específico seco de 16,8kN/m ³	78
Figura 4.4 - Início do Crumb Test para o solo natural com peso específico seco de 17,7kN/m ³	79
Figura 4.5 - Início do Crumb Test para o solo natural com peso específico seco de 18,6kN/m ³	79
Figura 4.6 - Fim do Crumb Test para o solo natural com peso específico seco de 16,8kN/m ³	80
Figura 4.7 - Fim do Crumb Test para o solo natural com peso específico seco de 17,7kN/m ³	80
Figura 4.8 - Fim do Crumb Test para o solo natural com peso específico seco de 18,6kN/m ³	81
Figura 4.9 - Início do ensaio de perda de massa por imersão da Metodologia MCT, solo dispersivo.....	82
Figura 4.10 - Final do ensaio de perda de massa por imersão da Metodologia MCT, solo dispersivo.....	83
Figura 4.11 - Ensaio de perda de massa da Metodologia MCT do solo dispersivo tratado com 3% de LS. a) início do ensaio b) final do ensaio.	84
Figura 4.12 - Imersão dos CPs de solo natural antes do ensaio de RCS.	85
Figura 4.13 - Curvas de Tensão para os CPs moldados com o $\gamma_d = 16,8\text{kN/m}^3$ e curados por 7 e 28 dias, respectivamente.	87
Figura 4.14 - Curvas de Tensão para os CPs moldados com o $\gamma_d = 17,7\text{kN/m}^3$ e curados por 7 e 28 dias, respectivamente.	88
Figura 4.15 - Curvas de Tensão para os CPs moldados com o $\gamma_d = 18,6\text{kN/m}^3$ e curados por 28 dias.....	88
Figura 4.16 - Efeito do γ_d e do tempo de cura sobre a RCS.	90
Figura 4.17 - Efeito do γ_d e do teor de LS sobre a RCS.	90
Figura 4.18 - Efeito do teor de LS e do tempo de cura sobre a RCS.	91
Figura 4.19 - Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados das variáveis sobre a RCS.....	91
Figura 4.20 - Início do Crumb Test para Solo + 3%LS, $\gamma_d = 16,8\text{kN/m}^3$ curado por 28 dias..	93
Figura 4.21 - Final do Crumb Test (após 1h de ensaio) para Solo + 3%LS, $\gamma_d = 16,8\text{kN/m}^3$ curado por 28 dias.	94
Figura 4.22 - Resultados de vazão média (cm ³ /s) no Pinhole Test.	95

Figura 4.23 - Corpos de prova de solo natural $\gamma = 16,8\text{kN/m}^3$, após Pinhole Test.....	96
Figura 4.24 - CP tratado com 3%LS $\gamma = 16,8\text{kN/m}^3$ e curado por 28 dias, após Pinhole Test.	96
Figura 4.25 - Coloração do efluente durante o Pinhole Test. a) solo natural b) solo tratado com 3%LS.	97
Figura 4.26 - Curvas granulométricas do ensaio de SCS das amostras de Solo + 3%LS.	98
Figura 4.27 - Corpo de prova de solo tratado com 3% de LS, compactado com $\gamma_d = 16,8\text{kN/m}^3$ e curado por 28 dias.	99
Figura 4.28 - Corpos de prova de solo tratado com 3% de LS, após imersão de 5h no primeiro ciclo do ensaio de durabilidade.	99
Figura 4.29 - Corpos de prova após secagem de 42h em estufa a 71°C , no primeiro ciclo do ensaio de durabilidade.	100
Figura 4.30 - Corpos de prova durante a imersão, no segundo ciclo do ensaio de durabilidade.	100
Figura 4.31 - Corpos de prova após secagem de 42h ao ar, no primeiro ciclo do ensaio de durabilidade.	101
Figura 4.32 - Perda de Massa Acumulada (PMA) por ciclo no ensaio de durabilidade.	102
Figura 4.33 - Perda de Massa Individual (PMI) por ciclo no ensaio de durabilidade.	102
Figura 4.34 - Leitura do tempo t_p correspondente à amostra de solo natural.	103
Figura 4.35 - Leitura do tempo t_s correspondente à amostra de solo natural.....	104
Figura 4.36 - Leitura do tempo t_p correspondente à amostra de solo tratada com 3% de LS.	104
Figura 4.37 - Leitura do tempo t_s correspondente à amostra de solo tratada com 3% de LS.	104
Figura 4.38 - Preparação das amostras para o MEV e aplicação de alto vácuo.	106
Figura 4.39 - Imagem MEV da amostra de solo natural compactada $\gamma_d = 16,8\text{kN/m}^3$, em níveis de ampliação de 1500x e 4000x, respectivamente. Poros circulados em vermelho. ...	106
Figura 4.40 - Imagens MEV do lignosulfonato de cálcio (LS) utilizado na pesquisa, em níveis de ampliação de 500x 1500x e 4000x, respectivamente.	107
Figura 4.41 - Imagens MEV de amostras de solo tratado com 3% de LS, compactado com $\gamma_d = 16,8\text{kN/m}^3$ e curado por 28 dias, em níveis de ampliação de 500x 1500x e 4000x, respectivamente. Poros circulados em vermelho.....	108
Figura 4.42 - Difratômetro de raios -X Bruker, D8 Advance.....	110
Figura 4.43 - DRX da amostra de solo dispersivo.....	111
Figura 4.44 - DRX da amostra de solo tratado com 3% de LS e curada por 28 dias.	111

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Graus e padrões de dispersão no ensaio de Crumb Test	36
Tabela 2.2 - Classificação conforme a razão de dispersão, segundo alguns autores.....	41
Tabela 2.3 - CTC dos principais argilominerais.....	42
Tabela 3.1 - Resumo do programa experimental.....	57
Tabela 3.2 - Especificações técnicas sobre o lignosulfonato de cálcio (LS).....	64
Tabela 4.1 - Características físicas do solo dispersivo	75
Tabela 4.2 - Características químicas do solo dispersivo	76
Tabela 4.3 - Resumo das variáveis utilizadas na elaboração dos corpos de prova para o ensaio de RCS.....	84
Tabela 4.4 - Resultados do Pinhole Test	95

LISTA DE SIGLAS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
- ASTM – American Society for Testing and Materials
- CTC – Capacidade de troca catiônica
- DR-X – Difractometria de raio-X
- IP – Índice de Plasticidade
- LL – Limite de Liquidez
- LP – Limite de Plasticidade
- LS – Lignosulfonato de cálcio
- MEV – Microscopia eletrônica de varredura
- PD – Porcentagem de dispersão
- NBR – Norma Brasileira reguladora
- RCS – Resistência a compressão simples
- RAS – Razão de adsorção de sódio
- SCS – Ensaio de sedimentometria comparativa
- PST - Porcentagem de sódio trocáveis
- TDS – Teor de sais presentes na água intersticial

LISTA DE SÍMBOLOS

γ_d – peso específico aparente seco (kN/m³)

q_u – resistência à compressão simples (kPa)

G_0 – módulo cisalhante inicial (MPa)

w – teor de umidade (%)

V_s – velocidade da onda cisalhante (m/s)

ϕ' – ângulo de atrito (°)

c' – coesão (kPa)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	20
1.1	RELEVÂNCIA E JUSTIFICATIVA.....	20
1.2	OBJETIVOS	21
1.2.1	Objetivo Geral	21
1.2.2	Objetivos Específicos	21
1.3	PRESSUPOSTO	22
1.4	PREMISSA	22
1.5	DELIMITAÇÕES	22
1.6	LIMITAÇÕES.....	22
1.7	DELINEAMENTO E ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	22
2	REVISÃO DE LITERATURA	24
2.1	NATUREZA DOS SOLOS.....	24
2.1.1	Origem e Formação dos Solos.....	24
2.1.2	Mineralogia dos Solos	24
2.1.3	Argilominerais	25
2.1.3.1	Caulinitas	26
2.1.3.2	Illitas	28
2.1.3.3	Esmectita.....	29
2.2	SOLOS DISPERSIVOS E O FENÔMENO DA DISPERSÃO.....	30
2.3	IDENTIFICAÇÃO DE SOLOS DISPERSIVOS.....	33
2.3.1	Crumb Test	35
2.3.2	Pinhole Test	37
2.3.3	Sais Dissolvidos na Água Intersticial	39
2.3.4	Sedimentometria Comparativa	40
2.3.5	Capacidade de Troca Catiônica	42
2.3.6	Identificação dos Argilominerais Via DRX	42
2.3.7	Microscopia Eletrônica de Varredura.....	44
2.4	ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS	44
2.4.1	Estabilização Físico-Química.....	45
2.4.2	Lignina e Derivados	45
2.5	LIGNOSULFONATO DE CÁLCIO (LS).....	47
2.5.1	Solo-LS.....	48
2.5.2	Efeitos dos Teores de LS	50

2.5.3	Efeito do Tempo de Cura	51
2.5.4	Efeito do LS na Microestrutura	52
3	PROGRAMA EXPERIMENTAL	57
3.1	VARIÁVEIS INVESTIGADAS	58
3.2	MATERIAIS	59
3.2.1	Solo Dispersivo	59
3.2.2	Lignosulfonato de Cálcio	63
3.3	MÉTODOS	64
3.3.1	Coleta das Amostras	65
3.3.2	Preparação das amostras.....	66
3.3.3	Programa de Ensaios	67
3.3.3.1	Caracterização física do solo	67
3.3.3.2	Ensaio de resistência à compressão simples (RCS).....	67
3.3.3.3	Caracterização da dispersão do solo	70
3.3.3.4	Ensaio de durabilidade por molhagem e secagem	71
3.3.3.5	Ensaio de pulso ultrassônico.....	73
4	RESULTADOS.....	74
4.1	CARACTERIZAÇÃO DO SOLO DISPERSIVO	74
4.2	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES	84
4.2.1	Efeito do Peso Específico Seco Máximo, do Teor de LS e do Tempo de Cura	89
4.3	CARACTERIZAÇÃO DA DISPERSIBILIDADE DO SOLO MELHORADO.....	92
4.3.1	Crumb Test	92
4.3.2	Pinhole Test.....	94
4.3.3	Sedimentometria Comparativa	97
4.4	ENSAIOS DE DURABILIDADE POR MOLHAGEM E SECAGEM.....	98
4.5	ENSAIO DE PULSO ULTRASSÔNICO.....	102
4.6	ENSAIOS DE MICROESTRUTURA	105
4.6.1	Microscopia Eletrônica de Varredura.....	105
4.6.2	Difratometria de Raios-X	109
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	113
5.1	CONCLUSÕES.....	113
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	116
6	REFERÊNCIAS	118
7	ANEXOS	127

1 INTRODUÇÃO

1.1 RELEVÂNCIA E JUSTIFICATIVA

Cotidianamente desenvolvem-se obras de Engenharia sob condições geotécnicas não favoráveis, como solos com baixa capacidade de suporte, solos colapsíveis, solos dispersivos, solos expansivos, entre outros. Na região Sul da Planície Costeira do Estado do Rio Grande do Sul encontram-se constantes problemas relacionados à instalação de processos dispersivos em obras de engenharia como aterros, barragens, canais de irrigação e drenagem e em áreas de empréstimo inativas, sobre as quais se instalam ravinas e voçorocas. No entanto, no Brasil, a literatura técnica é bastante incipiente a respeito do trato de solos dispersivos em obras geotécnicas, o que motiva a proposição de estudos avançados relacionados à questão.

Solos dispersivos são caracterizados, basicamente, por uma estrutura instável, facilmente floculada em água, e muito erodível a baixos gradientes hidráulicos ou até mesmo sem fluxo de água. De maneira geral, a fração de argila do solo se torna dispersiva devido a uma maior porcentagem de cátions de sódio (Na^+) em sua água adsorvida. O cátion de sódio (Na^+) aumenta a espessura da dupla camada elétrica de água adsorvida que envolve as partículas de argila, fazendo com que as forças de repulsão se sobreponham às forças de atração de modo que as partículas entrem em suspensão na presença de água.

Visando contornar o problema, existem técnicas de melhoramento de solos que possibilitam não abandonar ou modificar radicalmente o projeto inicial. Uma das técnicas de melhoramento de solos dispersivos consiste na substituição dos íons monovalentes de sódio (Na^+) por cátions de maior valência, como o cálcio (Ca^{+2}) ou alumínio (Al^{+3}), essa substituição torna o sistema mais carregado, resultando em maior aglomeração entre as partículas. Esses cátions são obtidos mediante a incorporação de materiais à base de cálcio, como hidróxido de cálcio, cloreto de cálcio, silicato de cálcio, dentre outros.

Nesse contexto, o lignosulfonato de cálcio surge como uma alternativa para o melhoramento de solos, e vem sendo bastante explorado pela comunidade acadêmica internacional (University Wollongong, Universidad Buenos Aires, Babol Noshirvani University of Technology) com resultados surpreendentes.

Segundo diversas pesquisas de autores como Indraratna *et al.* (2008), Athukorala *et al.* (2013), Berlarbi *et al.* (2013), Koohpeyma *et al.* (2013), Chen *et al.* (2014), Panditharadhya *et al.* (2017), Li *et al.* (2019), Moraes *et al.* (2019) dentre outros, o lignosulfonato de cálcio melhora propriedades do solo como aumento na capacidade de suporte, redução de plasticidade, redução de expansão, redução de processos dispersivos e erosivos, etc. Além disto, é um aditivo relativamente econômico, em vista dos baixos teores indicados nos estudos, não é tóxico, é um composto renovável e sustentável, não polui o solo nem águas subterrâneas e por consequência não interfere na utilização posterior do terreno para fins orgânicos.

Nesse sentido, o presente trabalho se propõe a estudar o comportamento mecânico e a microestrutura da mistura de um solo dispersivo melhorado com lignosulfonato de cálcio. O solo é proveniente da cidade de Pelotas-RS, do bairro Quartier, e o aditivo lignosulfonato de cálcio é fornecido pela empresa Borregaard LignoTech Brasil. Estima-se quantificar a influência das variáveis fundamentais no comportamento das misturas, assim como caracterizar a microestrutura das misturas através de ensaios de difração de raios-X e microscopia eletrônica de varredura.

1.2 OBJETIVOS

Os objetivos do presente trabalho estão divididos em objetivo geral, o qual pode ser entendido como um panorama global da pesquisa, e objetivos específicos, os quais têm embasamento no objetivo global e auxiliam o desenvolvimento das diretrizes de trabalho.

1.2.1 Objetivo Geral

Avaliação do comportamento dispersivo e desempenho mecânico e de durabilidade de um solo da região sul do Rio Grande do Sul, em termos de grau de dispersão, resistência, rigidez inicial, durabilidade e microestrutura, quando melhorado com lignosulfonato de cálcio.

1.2.2 Objetivos Específicos

A partir do objetivo geral, são estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- a) Verificar a influência do peso específico aparente seco, teor de lignosulfonato de cálcio e tempo de cura na resistência à compressão simples do solo melhorado;

- b) Avaliar a dispersibilidade do solo natural e mistura (solo + lignosulfonato) de melhor desempenho em termos de resistência à compressão simples;
- c) Analisar a natureza da microestrutura da mistura (solo + lignosulfonato) de melhor desempenho de reversão da dispersibilidade e ganho de resistência, com o intuito de identificar os compostos ligantes formados e mudanças na estrutura do solo melhorado.

1.3 PRESSUPOSTO

O presente trabalho tem por pressuposto que a mistura entre solo dispersivo – lignosulfonato de cálcio pode proporcionar reversão do comportamento dispersivo, e um adequado desempenho mecânico e de durabilidade.

1.4 PREMISSA

O trabalho tem por premissa que o melhoramento com lignosulfonato de cálcio é eficiente para reverter o comportamento dispersivo de diversos solos, mas não costuma apresentar grandes ganhos de resistência mecânica. Além disto, a aplicação deste melhoramento seria para utilização em camadas superficiais de pavimentos e aterros, sob baixo carregamento.

1.5 DELIMITAÇÕES

A pesquisa delimita-se a analisar o solo dispersivo proveniente de uma área urbana específica da cidade de Pelotas/RS.

1.6 LIMITAÇÕES

São limitações do trabalho:

- a) Quantidade limitada de solo disponível do mesmo lote para estudo;
- b) Tempo de cura;
- c) Controle de temperatura e umidade de cura;
- d) Equipamentos;
- e) Tempo para execução dos ensaios.

1.7 DELINEAMENTO E ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O presente trabalho foi estruturado conforme o diagrama apresentado na Figura 1.1 a seguir:



Figura 1.1 - Delineamento da pesquisa.

O **capítulo 2** apresenta toda a revisão de literatura desta pesquisa, contendo os principais tópicos relacionados a solos dispersivos, que incluem discussões sobre o fenômeno e mecanismos da dispersão, além de técnicas para identificação de solos dessa natureza. Também inclui um compilado bibliográfico acerca de temas relevantes à estabilização de solos, como estabilização química, as reações na estabilização de solos argilosos e aspectos de sustentabilidade na estabilização de solos. Além disto, também são apresentados detalhes sobre o aditivo utilizado nesta pesquisa, bem como sua ação no solo e efeitos de diferentes teores e tempos de cura.

O programa experimental, que inclui a abordagem das variáveis do experimento, caracterização física, química e mineralógica dos materiais aqui empregados (solo dispersivo e lignosulfonato de cálcio) e descrição dos ensaios realizados, está no **capítulo 3**.

Os resultados, análises e discussões dos ensaios são apresentados no **capítulo 4** e as considerações finais, as quais incluem conclusões acerca dos resultados experimentais e sugestões para trabalhos futuros, são realizadas no **capítulo 5**.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 NATUREZA DOS SOLOS

Neste capítulo serão apresentados conceitos sobre a natureza de solos dispersivos, bem como formas de identificação dos mesmos.

2.1.1 Origem e Formação dos Solos

Os solos tem sua formação inicial resultante da ação do intemperismo (desintegração mecânica e/ou decomposição química) sobre as rochas que compõe a crosta terrestre. A desintegração mecânica está relacionada a processos de transporte (através do vento ou da água) e/ou variações de temperatura, dando origem a materiais de granulometria grossa a intermediária (pedregulhos, areias e siltes). Já a decomposição química é responsável por originar solos finos (argilosos) por meio de alterações, solubilizações e deposições dos minerais da rocha matriz através de processos de oxidação, hidratação e hidrólise, carbonatação, lixiviação e trocas catiônicas onde o principal agente é a água.

Assim, os solos podem ser classificados quanto à sua gênese geológica como residuais ou transportados. Solos residuais são os sedimentos que permanecem no local da rocha matriz, caracterizados por diferentes horizontes de intemperização. Já os solos transportados são resultantes de ações de transporte (por água, vento, gelo ou gravidade), que o deslocaram de seu local de origem.

No entanto, estas classificações não permitem induzir sobre propriedades mecânicas e hidráulicas dos solos.

2.1.2 Mineralogia dos Solos

Mineral é uma substância de ocorrência natural, sólida, com estrutura cristalina ou amorfa, geralmente inorgânica e com composição química específica. Podem se formar a partir dos líquidos magmáticos, por soluções termais, recristalização ou como produto de reações químicas entre sólidos e líquidos.

Conforme Salomão e Antunes (1988), muitas propriedades físicas e químicas do solo são determinadas pelo conteúdo mineral do mesmo. Alguns elementos presentes na composição mineralógica das rochas ditam algumas características específicas, por exemplo: o ferro e o manganês tem parte ativa no processo de oxirredução e são os elementos fundamentais na coloração dos solos. Por outro lado, o silício e o alumínio constituem elementos indispensáveis para a formação dos argilominerais.

Rochas compostas por minerais ricos em sílica, como o quartzo, dão origem a solos mais arenosos, enquanto aqueles com significativa porcentagem de minerais ferromagnesianos (biotita, olivina e piroxênios) e feldspatos resultam na formação de solos de granulometria mais fina. Por exemplo, argilominerais do tipo illita originam-se frequentemente do intemperismo de materiais micáceos e ricos em potássio, enquanto as esmectitas, um tipo de argilomineral altamente hidrofílico, resultam do intemperismo de minerais ricos em cálcio e magnésio. (CRUZ, 2008, p.11)

2.1.3 Argilominerais

Os argilominerais podem se formar por alteração hidrotermal ou por intemperismo. A ação de líquidos e soluções de temperatura elevada, superior a ambiente, pode causar a alteração de rochas e a consequente formação de argilominerais. (BATEMAN, 1959)

A ação de água superaquecida sobre pegmatitos, granitos e gnaisses propicia a formação de depósitos de caulins primários. Neste processo, os feldspatos sódicos-potássicos se decompõem, sendo primeiro dissolvido o sódio e em seguida o potássio, pelas águas ácidas, formando-se a caulinita como o argilomineral predominante na constituição dos caulins primários residuais. Em condições em que a movimentação das águas de lixiviação é restringida, o potássio pode permanecer retido no sistema. Nesses processos de alteração, a sílica pode ser deixada residualmente ou então ser levada em forma dissolvida ou coloidal, principalmente em água alcalinas. (COLLARES, 2002, p.50)

Grim e Bradley (1953) apontam que, em locais onde existe variabilidade de chuva, ligada às estações, há grande possibilidade da matéria orgânica ser oxidada e destruída. Se as águas são ácidas, ocorre lixiviação dos metais alcalinos terrosos e uma fixação da sílica, juntamente com o alumínio e o ferro, havendo, de preferência a formação de argilominerais. Porém, segundo Keller (1962), se as águas são alcalinas ou neutras, a sílica é solubilizada também, restando

hidróxidos de alumínio e ferro na forma de laterítos e bauxitos. A flocculação dos hidróxidos de ferro e de alumínio na natureza e a deposição sobre argilominerais protegem estes últimos do arrastamento mecânico e da decomposição pelo intemperismo em solos e sedimentos.

Assim, conforme Cruz (2008), a fração argilosa dos solos é constituída predominantemente por argilominerais, caracterizados, em geral, como silicatos de alumínio hidratados. Os grupos de maior ocorrência compreendem as caulinitas, ilitas e esmectitas e, de forma secundária, as serpentinitas, vermiculitas, haloisitas e cloritas.

Diversas técnicas podem ser empregadas para identificar, caracterizar e quantificar os argilominerais, tais como: análise térmica diferencial, análise termogravimétrica, determinação da capacidade de troca catiônica, difração de raios-X, microscopia eletrônica de varredura, microscopia eletrônica de transmissão, espectrometria de absorção de infravermelho, etc.

2.1.3.1 Caulinitas

Os feldspatos são os minerais que predominantemente dão origem à caulinita e haloisita, quer por intemperismo, quer por ação hidrotermal. Micas, especialmente as moscovitas, podem se alterar pela ação do intemperismo de caulinita, e outros minerais, inclusive argilominerais, podem dar origem à caulinita. Outros fatores como a umidade, a variação do nível do lençol freático, a acidez ou a alcalinidade da água de lixiviação, bem como a facilidade e a velocidade de escoamento desta água, podem dar origem simultaneamente à caulinita e à haloisita. (COLLARES, 2002, p.51)

Estes argilominerais cristalizam-se conforme estruturas monoclinicas prismáticas, conformadas em hexágonos ou arranjos romboédricos. A estrutura cristalina 1:1 apresenta alternância de camadas de siloxana e bursita, identificada pela fórmula $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$, e ilustrada na Figura 2.1. No caso em que a estrutura é composta por camadas de siloxana ligadas com gibbsita, tem-se a serpentinita (Figura 2.2). (CRUZ, 2008, p.25)

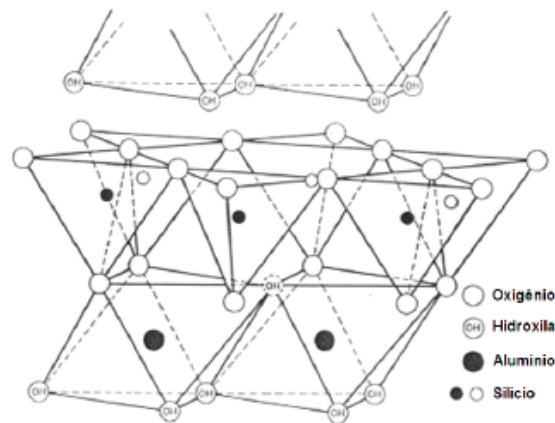


Figura 2.1 - Diagrama da estrutura da caulinita. (fonte: adaptado de Mitchel, 1976 apud Cruz, 2008).

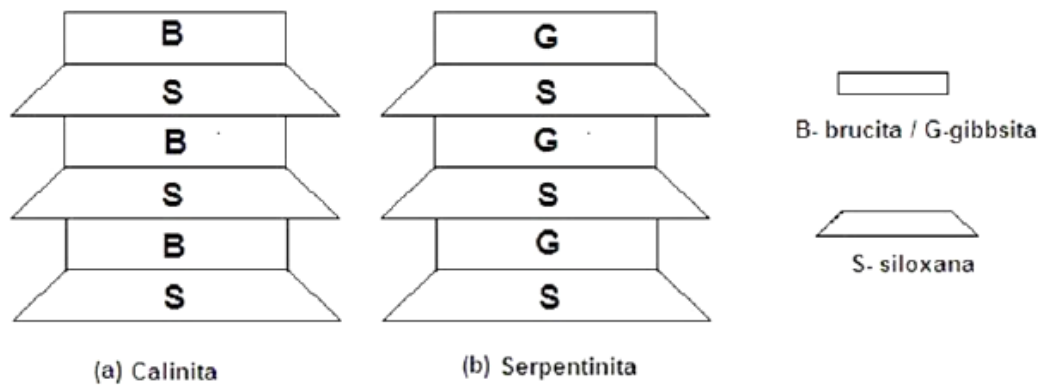


Figura 2.2 - Diagrama esquemático da estrutura das caulinitas e serpentinitas. (fonte: Cruz, 2008)

As folhas de siloxana e bursita/gibbsita são ligadas por pontes de hidrogênio e forças de Van der Waals, que fornecem uma ligação coesa, tornando as partículas eletricamente estáveis e dispostas umas sobre as outras como pequenas placas. As superfícies das partículas são carregadas negativamente, possibilitando a atração de moléculas de água. Contudo, devido às forças de atração das ligações, as partículas não se separam, impedindo o aumento de volume.

Conforme Cruz (2008), a capacidade de troca catiônica (CTC) das partículas de caulinita (Figura 2.3) é cerca de 3 a 15 meq/100g, um valor relativamente baixo se comparado ao de outros argilominerais.

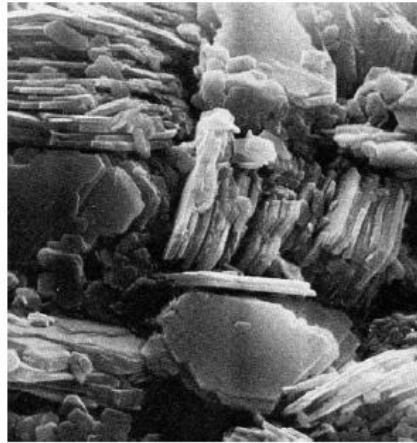


Figura 2.3 - Fotografia eletrônica de partículas de caulinita. (fonte: Mitchel, 1976 apud Cruz, 2008.)

2.1.3.2 Ilitas

As ilitas constituem um dos argilominerais mais comuns na fração argilosa dos solos, sendo conhecidas também como micas hidratadas. As ilitas possuem estrutura 2:1 semelhante às moscovitas, com o silício sendo substituído por alumínio e com íons de potássio entre as camadas de siloxana-gibbsita-siloxana (Figura 2.4). (CRUZ 2008, p.26)

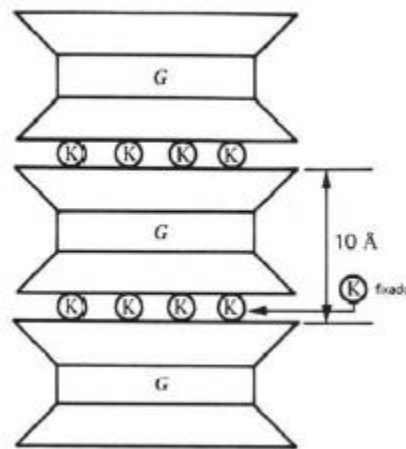


Figura 2.4 - Diagrama da estrutura das ilitas. (fonte: adaptado de Mitchel, 1969 apud Cruz, 2008).

As ilitas dificilmente encontram-se puras, estando associadas a outros argilominerais, e diferenciam-se das micas pela quantidade de silício substituída por alumínio, além da quantidade presente de íons de potássio. Além disto, apresentam tamanhos muito reduzidos e quando bem cristalizadas possuem forma externa hexagonal, assim como as caulinitas, conforme ilustra a Figura 2.5.

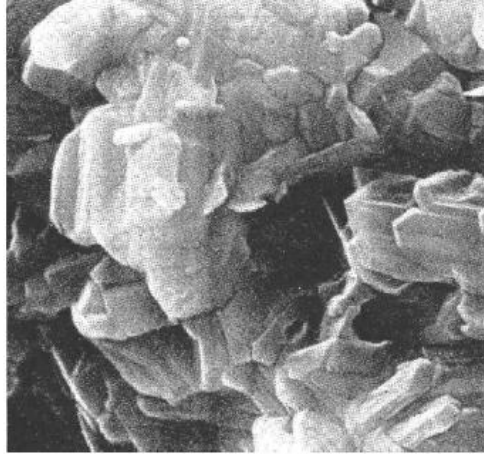


Figura 2.5 - Fotografia eletrônica de partículas de ilita. (fonte: Cruz, 2008).

A deficiência de carga das ilitas concentra-se primariamente nas folhas de siloxana, que são carregadas por cargas negativas. O cátion de potássio (K^+) entre cada camada de siloxana-gibbsita-siloxana auxilia no equilíbrio de carga nas partículas. A capacidade de troca catiônica das ilitas é na faixa de 10-40 meq/100g, com uma superfície específica na faixa de 65-100m²/g. (CRUZ, 2008, p.27)

2.1.3.3 Esmectita

As esmectitas possuem a estrutura composta por uma folha octaédrica (gibbsita ou brucita) sobreposta por duas folhas de siloxana. A estrutura das esmectitas também é 2:1, assim como as ilitas. A diferença reside na forma de ligação entre sanduíches, que é feita por um cátion fraco (Na ou Ca) que permite a entrada de água nessa interface. Por essa razão, essas argilas são expansivas.

A montmorilonita constitui um dos minerais mais comuns deste grupo, sendo composta por uma folha octaédrica de gibbsita sobreposta por duas folhas de siloxana. As ligações entre estas sucessivas camadas são constituídas de forças de Van der Waals. Os cátions presentes balanceiam a deficiência de carga da estrutura. Como as forças de Van der Waals são frágeis, podem ser facilmente rompidas quando moléculas de água são atraídas para entre as camadas.

Ao contrário das caulinitas, as esmectitas não possuem forma de lâminas hexagonais conforme ilustrado na Figura 2.6.

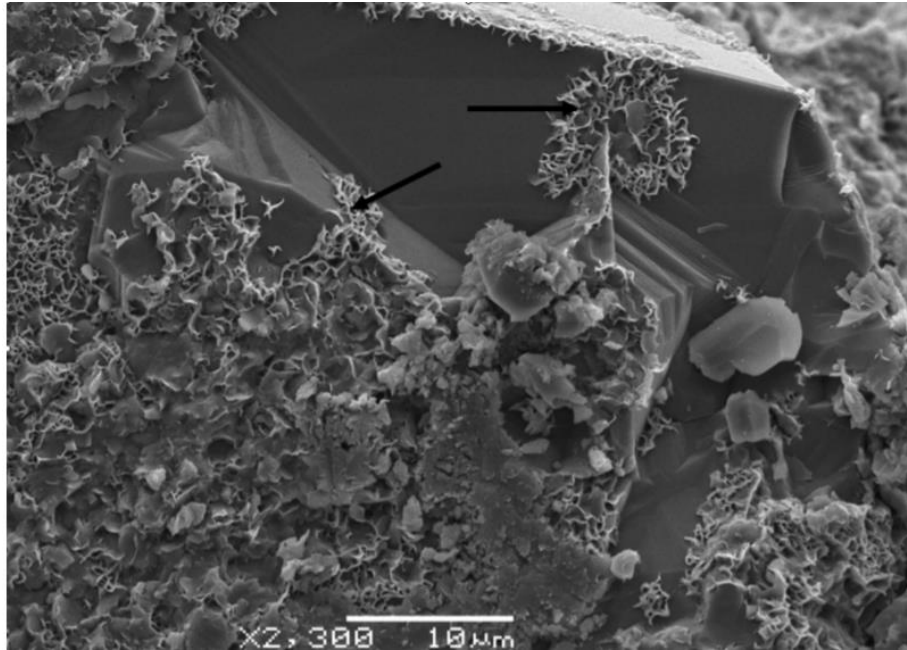


Figura 2.6 - Imagem de microscopia eletrônica de varredura: crescimento de esmectita sobre um grão de feldspato detrítico (setas). (fonte: Costa *et al.*, 2010)

2.2 SOLOS DISPERSIVOS E O FENÔMENO DA DISPERSÃO

Tradicionalmente solos argilosos eram avaliados como materiais altamente resistentes aos efeitos da erosão decorrentes da percolação de água, em função de, geralmente, apresentarem coesão. No entanto, a partir de diversos problemas detectados em obras geotécnicas sabe-se, hoje, que muitas argilas tendem a apresentar uma elevada susceptibilidade à dispersão ou deflocação em presença de água, culminando em mecanismos de erosão superficial, erosão interna e *piping* através de um maciço de solo.

Segundo Indraratna (1991), solos dispersivos caracterizam-se por serem solos argilosos altamente susceptíveis à erosão natural e por apresentarem alta porcentagem de íons de sódio permutáveis (Na^+). Estes solos erodem rapidamente, mesmo sob velocidades de percolação desprezíveis ou até mesmo dispersam sob água parada, devido à segregação das partículas individuais (dispersão em suspensão). Sherard *et al.* (1972) indica que este fato ocorre quando as forças de repulsão devido às cargas superficiais dos argilominerais sobrepõem às forças de atração de Van der Waals.

A erosão devido à dispersão do solo depende da mineralogia e da composição química da argila e dos sais dissolvidos na água intersticial, ambos os fatores decorrentes dos processos geológicos de formação desses solos.

Uma maior porcentagem de cátions de sódio em sua água dos poros é determinante do comportamento dispersivo. O sódio aumenta a espessura da camada dupla elétrica de água adsorvida que envolve as partículas de argila individuais. Isso faz com que as forças de repulsão se sobreponham às forças de atração de modo que as partículas entram em suspensão na presença de água, conforme ilustrado na Figura 2.7 a seguir.

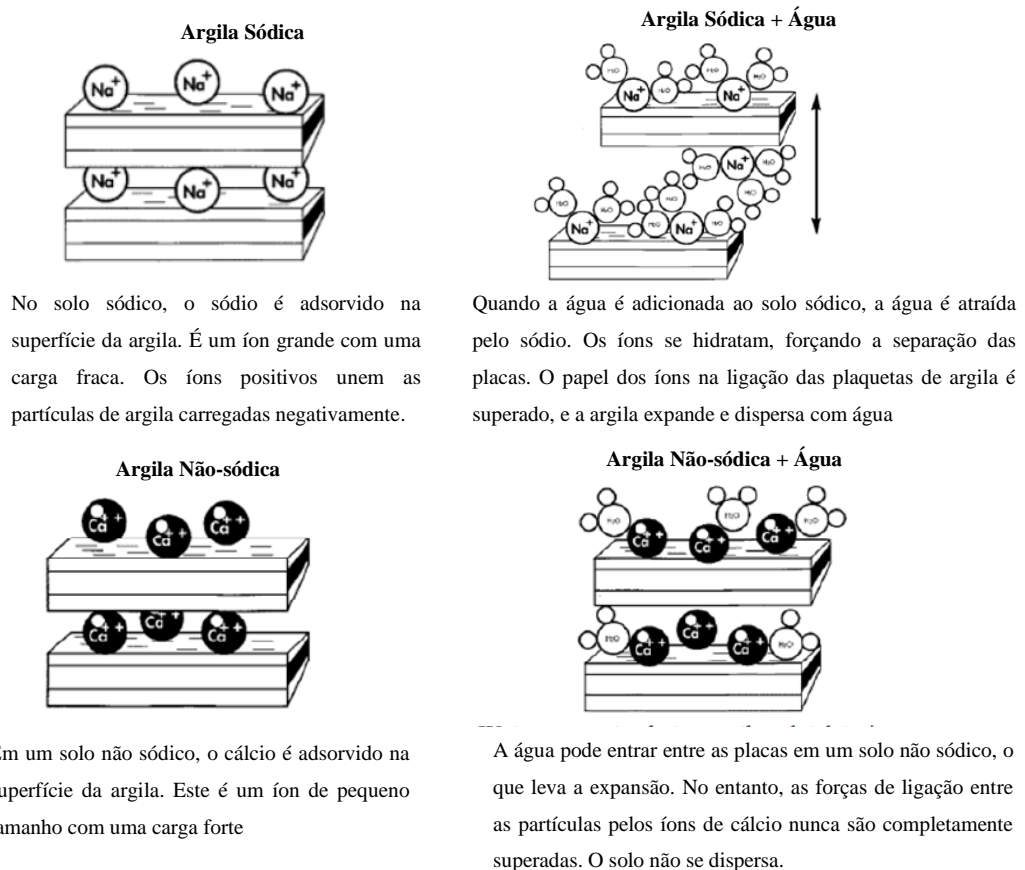


Figura 2.7 - Comportamento de argilas sódicas e não-sódicas em água. (fonte: adaptado de Belarbi et al., 2013).

Assim, a natureza do argilomineral presente influencia a magnitude dos efeitos de dispersão nos solos, sendo esta influência diretamente proporcional à sua capacidade de troca catiônica (CTC), ou seja, argilominerais com maior CTC tendem a apresentar maior potencial de dispersão. Dessa forma, a presença de montmorilonita é mais crítica para a ocorrência do fenômeno do que a ilita ou a caulinita, por exemplo. (CRUZ, 2008, p. 33)

Arunalandan *et al.*, (1975) sugerem que, de forma geral, a susceptibilidade à dispersão está associada principalmente a relação entre a quantidade de sódio e a quantidade total de cátions (sódio, potássio, cálcio e magnésio) dissolvidos na água intersticial. Argilas convencionais tendem a apresentar, predominantemente, cátions de cálcio, potássio e magnésio, ao passo que em argilas dispersivas tem-se a presença predominante de cátions de sódio. Isto se dá porque o potencial de floculação dos íons de sódio (Na^+) é menor que o de outros íons devido a sua baixa valência e ao seu elevado raio atômico. Logo, com o aumento da quantidade de sódio adsorvido nas partículas de argila, as distâncias entre as mesmas tenderão a aumentar e, conseqüentemente, as forças de repulsão passam a ser predominantes na estrutura do solo.

Logo, o colapso estrutural de um solo pode ser influenciado por líquidos de diferentes características químicas e, conforme Cruz (2008), fatores como a concentração dos íons de sódio presentes e o total de sais dissolvidos, em relação ao fluído percolante, constituem os principais fatores que influenciam no fenômeno da dispersão dos solos.

Quando uma camada superficial de argila dispersiva é sobrejacente a areias e pedregulhos permeáveis, ocorre a infiltração de água de chuva ao longo de canais de percolação iniciais formados como resultado de trincas de ressecamento, furos de animais ou furos laterais pelo apodrecimento de raízes. As paredes dos canais de percolação são rapidamente erodidas formando túneis verticais e furos profundos (*sink holes*). A Figura 2.8 mostra um esquema de formação de *piping* vertical e *sink holes* originados pelo fluxo descendente da chuva. Esta figura representa uma região ao sul do Arizona, formada por uma camada de argila dispersiva de cerca de 5m de espessura, sobrejacente a uma camada de pedregulho permeável (SHERARD *et al.*, 1972).

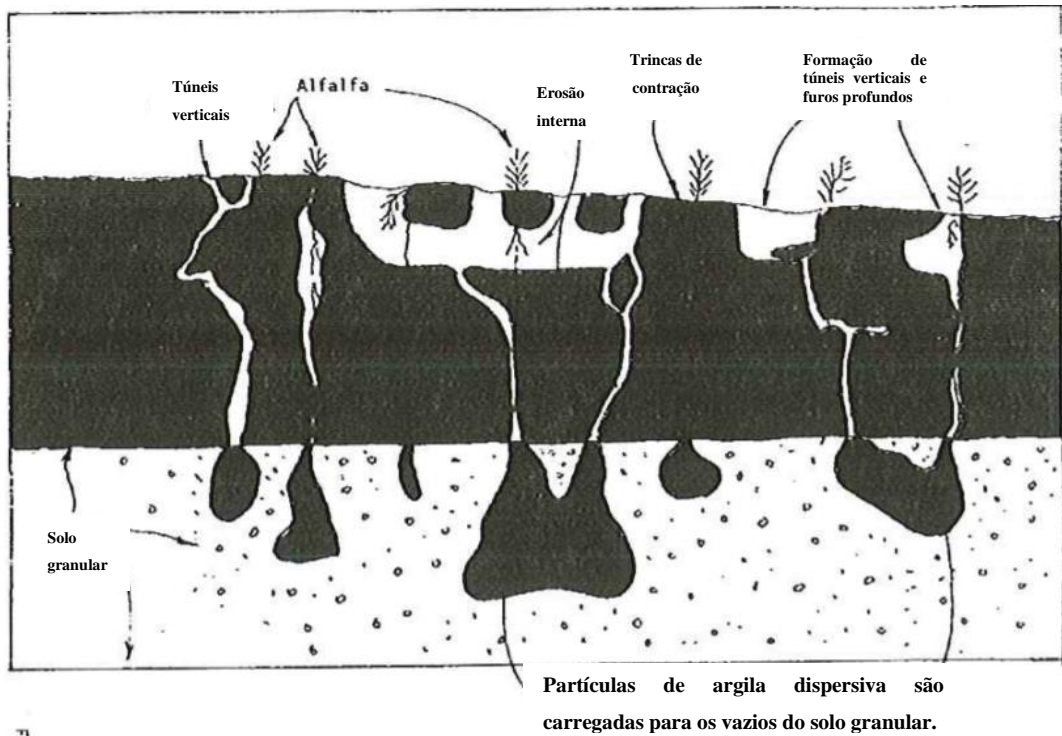


Figura 2.8 - Problemas causados em argilas dispersivas em solos do Arizona. (fonte: adaptado de Sherard *et al.*, 1972)

Portanto, em uma condição de fluxo subterrâneo, as partículas dispersas tendem a ser carregadas, principiando fenômenos hidráulicos de colapso estrutural do solo (erosão interna ou *piping* por dispersão). Do ponto de vista geotécnico, estes materiais podem ser melhorados por meios mecânicos e/ou pela inclusão de aditivos orgânicos ou inorgânicos (cimento Portland, a cal, as escórias, o sulfato de alumínio, o cloreto férrico, os fosfatos e o cloreto de cálcio).

2.3 IDENTIFICAÇÃO DE SOLOS DISPERSIVOS

Terrenos com solos dispersivos são caracterizados visualmente por: presença de um padrão repetitivo de ravinas profundas e falhas por entubamento em pequenas barragens; erosão em estradas; erosão semelhante a um túnel ao longo de riachos; presença de água permanentemente turva em barragens e poças de água após a chuva.

Embora o comportamento e as características de solos dispersivos sejam razoavelmente bem compreendidos e adequadamente explicados pela teoria da dupla camada, um método satisfatório e analítico para a identificação de solos dispersivos permanece um problema. Isso provavelmente se deve ao fato de que a dispersão é uma manifestação física de substâncias

químicas e minerais dependentes das propriedades químicas dos solos. As influências relativas desses fatores não foram consideradas no passado, especialmente a influência da mineralogia da argila. (Greenland e Hayes, 1978, apud VON e GERBER 1988, p.411).

Em geral, as argilas nos solos são misturas mineralógicas de componentes de argila relacionados. Além disso, a identificação dos minerais na fração de argila do solo requer procedimentos complexos e equipamentos caros. Não pode ser aplicado para análise de rotina de um grande número de amostras e em obras de engenharia correntes. No entanto, a capacidade de troca catiônica CTC pode ser empregada para definir categorias amplas dentre as quais se pode esperar que certos minerais no solo tenham propriedades relacionadas (Dixon e Weed, 1977 apud VON e GERBER, 1988, p.412). Essas categorias são:

1. Os tipos 2:1 de filossilicatos que incluem hidromica, vermiculita, clorita e esmectitas. A CTC ($40 - 150 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$) desses argilominerais é principalmente derivada da substituição iônica tanto no octaédrico quanto no tetraédrico de sílica, ou ambos.
2. Os tipos 1:1 de filossilicatos, tal como caulinita e aloisita, com valores intermediários-baixos de CTC ($5 - \text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$). As cargas negativas destes argilominerais são dependentes do pH e surgem principalmente como componentes dominantes da fração argilosa.

Assim, argilas dispersivas não podem ser distinguidas de argilas não-dispersivas por ensaios convencionais como granulometria, limites de consistência ou compactação. A Figura 2.9 ilustra esta impossibilidade de correlação para o caso de 195 ensaios para a determinação de limites de consistência realizados em amostras provenientes de diversas barragens e marcados em conjunto na Carta de Plasticidade de Casagrande (SHERARD *et al.*, 1975).

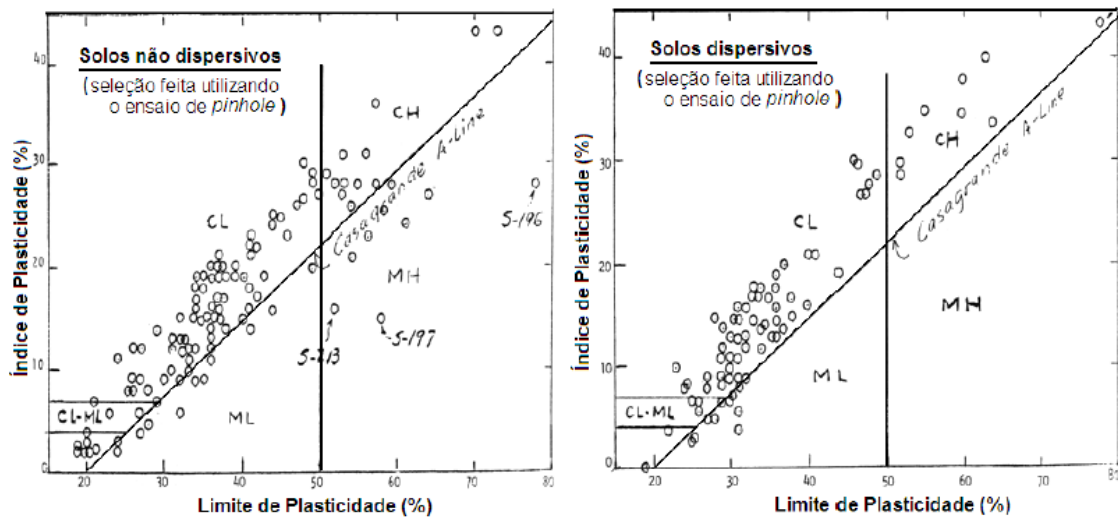


Figura 2.9 - Limites de consistência (Carta de Plasticidade de Casagrande): solos dispersivos x solos não dispersivos. (fonte: adaptado de Sherard et al., 1975).

As normas técnicas sugerem a identificação de solos dispersivos utilizando amostras representativas, por meio de quatro ensaios: NBR 13601: Crumb test (ABNT, 2020a), NBR 13602: Ensaio de sedimentometria comparativa (ABNT, 2020b), NBR 13603: Teor de sais na água intersticial (ABNT 1996) e NBR 14114: Pinhole Test (ABNT, 1998). Tanto o Crumb Test (ABNT, 2020a) quanto o Pinhole Test (ABNT, 1998) oferecem uma análise qualitativa e visual do fenômeno da dispersão.

Conforme Pessoa (2004), identificada a presença de argilas dispersivas, impõem-se outros ensaios para se conhecer a composição mineralógica dos solos (difratometria de raios-X), a caracterização da estabilidade do solo identificando-se a capacidade de troca catiônica e, por fim, o conhecimento da acidez do solo, haja vista que a carga elétrica das partículas varia com o pH, que influi consideravelmente na magnitude dos fenômenos de adsorção, troca catiônica, dispersão e floculação.

2.3.1 Crumb Test

O Crumb test é o mais simples e fácil dos ensaios físicos e indica a tendência das partículas para deflocular em solução de água destilada, retratando bem situações onde não existe fluxo de água. Neste ensaio são utilizados três béqueres, com capacidade de 200ml, preenchidos com 150ml de água destilada (ou solução de hidróxido de sódio, com concentração de 1meq/litro). Nestes recipientes são inseridos torrões aproximadamente esféricos (com diâmetros entre 6 e 10mm), preparados a partir de amostras indeformadas ou de corpos de prova compactados segundo as condições de campo. Após o repouso de 1h, devem-se

observar as reações ocorridas e atribuir o corresponde grau de dispersão à amostra, conforme os padrões estabelecidos na Tabela 2.1 e na Figura 2.10.

Tabela 2.1 - Graus e padrões de dispersão no ensaio de Crumb Test

Grau 1	Comportamento não-dispersivo	O torrão de solo pode absorver água, sofrer esboroamento e esparramar-se no fundo do béquer, formando uma pilha achatada, mas não se observa sinal de turvação no líquido, provocado por colóides em suspensão.
Grau 2	Comportamento levemente dispersivo	Há indícios de turvação na água, próximos à superfície do torrão (se a turvação for facilmente visível, registrar como grau 3).
Grau 3	Comportamento moderadamente dispersivo	Observa-se uma nuvem de colóides em suspensão, geralmente finos veios espalhando-se no fundo do béquer; em casos extremos, toda a água torna-se turva.
Grau 4	Comportamento fortemente dispersivo	Observa-se uma nuvem coloidal, geralmente uma película muito fina, cobrindo quase todo o fundo do béquer; em casos extremos, toda a água torna-se turva.

(fonte: adaptado da NBR 13601 (ABNT, 2020a))

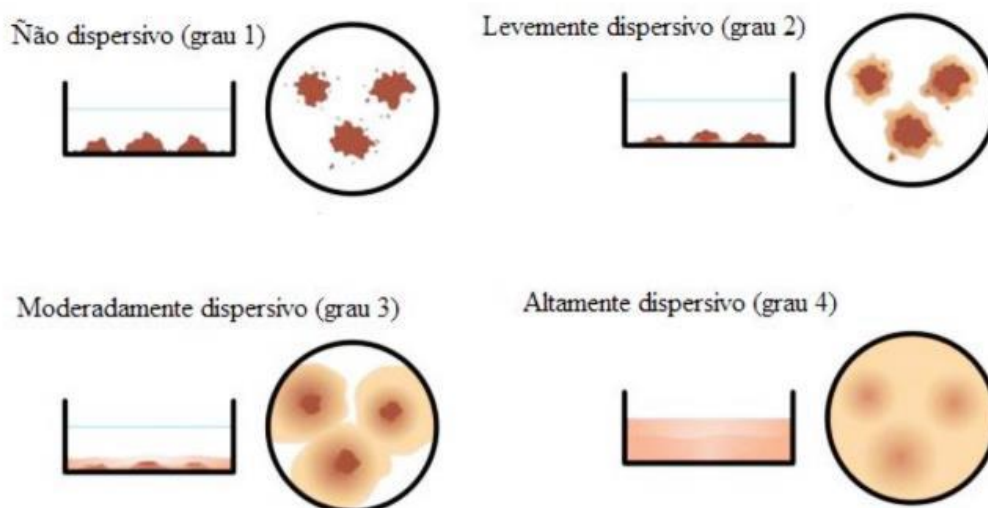


Figura 2.10 - Identificação visual dos graus de dispersão pelo Crumb Test. (fonte: adaptado de Ipswich Planning Scheme, 2016, p.3)

2.3.2 Pinhole Test

O Pinhole Test mede a erodibilidade/dispersividade de uma amostra de solo compactada onde a água pode fluir através de um pequeno orifício perfurado no centro do corpo de prova. É considerado um dos ensaios físicos mais confiáveis para determinar a dispersividade dos solos, uma vez que simula situações de fluxo de água através de uma descontinuidade na massa de solo. (MAHARAJ *et al.*, 2015)

Conforme a NBR 14114 (ABNT, 1998), utilizando o equipamento apresentado na Figura 2.11, o procedimento do ensaio envolve separar o material mais fino do que 2 mm (passante na peneira #10) e compactar em um cilindro de 100 mm de comprimento e 34 mm de diâmetro. De acordo com diretrizes e método de ensaio, o material deve ser compactado no teor de umidade ou próximo ao limite de plasticidade do solo. Após a compactação, um orifício de 1 mm é perfurado no centro da amostra, ao longo de todo seu comprimento. Depois que o corpo de prova é preparado e o aparelho montado, água é percolada através do orifício a partir de alturas de carga de 50, 180 e 380 mm em períodos de 5–10 minutos para cada altura. A quantidade de fluxo e o tempo sob diferentes cargas hidráulicas são medidos continuamente e registrados.

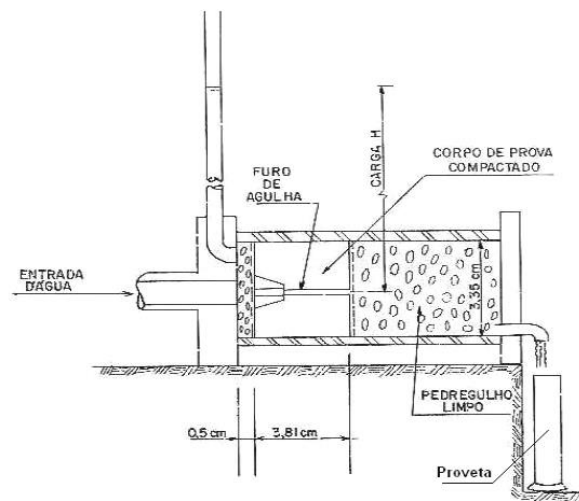


Figura 2.11 - Equipamento do Pinhole Test. (fonte: adaptado de Furtado e Machado, 1982).

A taxa de fluxo, turbidez do efluente e tamanho do furo no final de cada ensaio são os parâmetros registrados. A Figura 2.12 apresenta um diagrama que indica o processo de classificação do material conforme o resultado do ensaio. De forma geral, se o efluente é altamente turvo e o orifício está aumentado, então o solo é classificado como dispersivo. Se o

oposto for observado, ou seja, o efluente é claro e o tamanho do orifício permanece inalterado, então o solo é considerado não dispersivo.

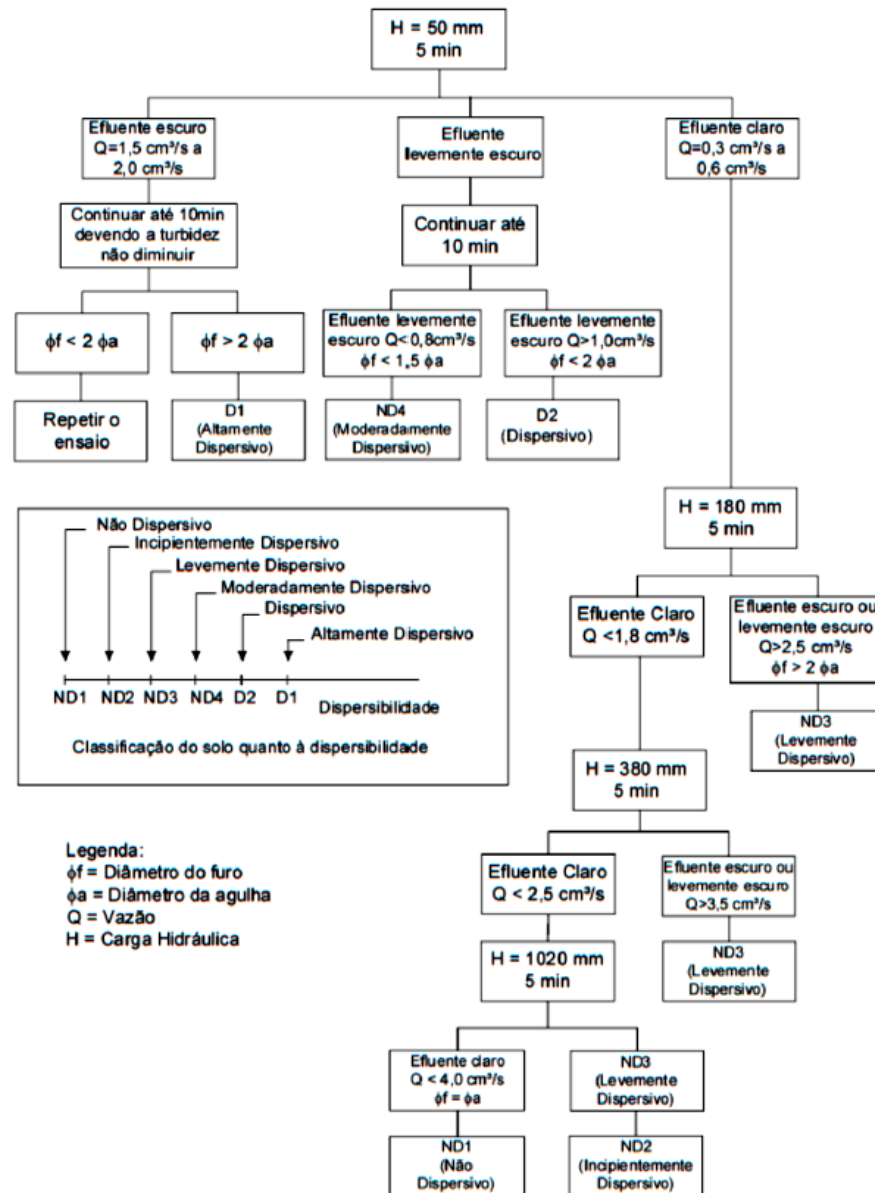


Figura 2.12 - Diagrama de classificação quanto à dispersão pelo Pinhole Test. (fonte: NBR14114 (ABNT, 1998)).

No entanto, o Pinhole test é susceptível a identificar solos altamente erodíveis, que podem ser confundidos com solos dispersivos. É importante notar que todos os solos com alto teor de sódio podem ser erodíveis, mas nem todos os solos erodíveis são necessariamente dispersivos.

De acordo com Bell e Walker (2000), o diâmetro do orifício no final do ensaio prova ser o indicador mais confiável para reconhecer a dispersividade. Isso, no entanto, não deve ser o

único fator determinante para a identificação de dispersividade, pois o diâmetro do furo de agulha de solos erodíveis aumentará mais do que para solos dispersivos. A natureza do efluente desempenha um papel vital no procedimento de ensaio, não apenas pela cor, mas também o tipo de sedimento/material presente na água. O efluente de um solo pode ser altamente turvo à medida que sai do ensaio, mas não é necessariamente dispersivo. Se o solo for dispersivo, o efluente deve ficar turvo por um período prolongado, pois as partículas de argila ficarão em suspensão, enquanto a suspensão em materiais puramente erodíveis vai se estabelecer somente numa fase inicial, sucedida pela sedimentação dos sólidos, e com isso a solução vai tornar-se clara (ou possivelmente manchado se o solo contém certos elementos como ferro ou matéria orgânica).

2.3.3 Sais Dissolvidos na Água Intersticial

Este ensaio objetiva determinar a quantidade de sais dissolvidos na água intersticial do solo. Assim, a partir de uma amostra de solo, com umidade próxima ao limite de liquidez, é retirada com auxílio do uso de vácuo e de um kitassato a água intersticial, até obter-se o volume de 100ml. A análise química é feita por espectrofotometria e possibilita determinar as quantidades presentes de cátions de sódio, cálcio, magnésio e potássio, expressas em miliequivalentes por litro (meq/litro).

A taxa de adsorção de sódio (SAR) é usada como um critério de proporção de sódio para outros cátions (negligenciando o potássio), e é obtida através da Equação 2.1 a seguir:

$$SAR = \frac{Na^+}{\frac{1}{2}(Ca^{++} + Mg^{++})^{1/2}} \quad (\text{Equação 2.1})$$

A porcentagem de sódio - Na% (SP) é obtida por meio da Equação 2.2:

$$SP = \frac{Na^+}{TDS} \times 100 \quad (\text{Equação 2.2})$$

Onde TDS é a quantidade total de sais dissolvidos e a quantidade total de cátions dissolvidos na água dos poros ($TDS = Na^+ + K^+ + Ca^{++} + Mg^{++}$).

Com os parâmetros TSD e SP caracteriza-se, através do ábaco, indicado na Figura 2.13, a condição dispersiva (zona A), questionável (zona C) ou não dispersiva (zona B) do solo ensaiado.

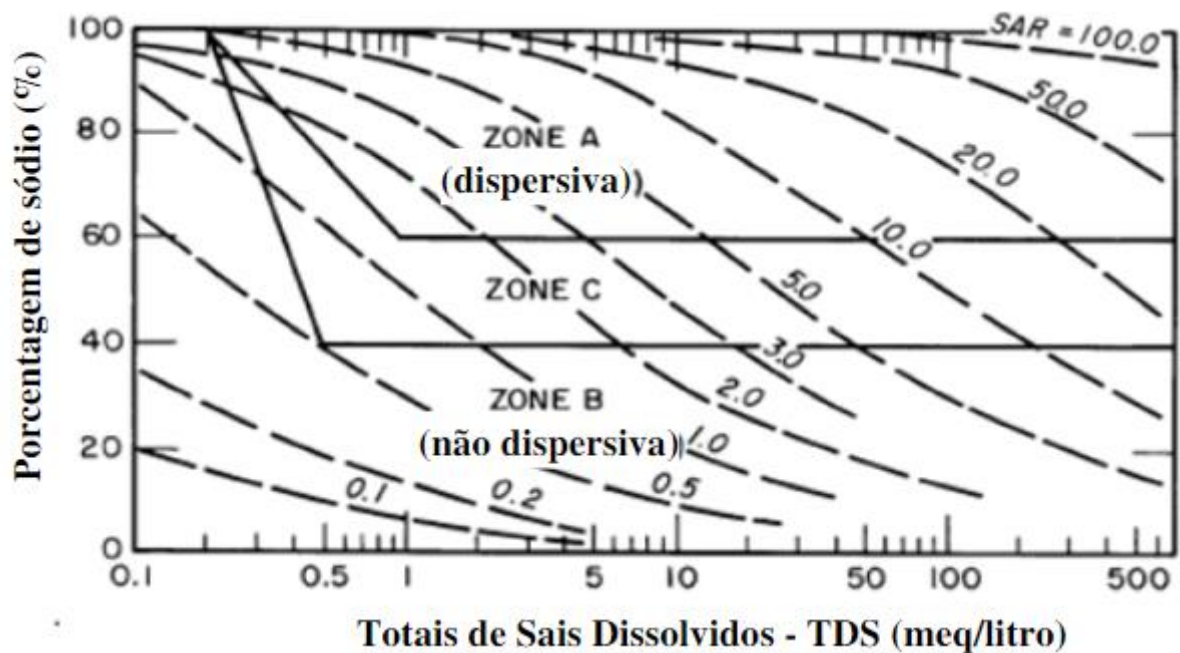


Figura 2.13 - Relação entre a dispersão e a química da água dos poros do solo com base em pinhole tests e experiência com erosão na natureza. (fonte: adaptado de Sherard et al., 1975).

2.3.4 Sedimentometria Comparativa

O Ensaio Sedimentométrico Comparativo é outro ensaio registrado na literatura como adequado na identificação de solos dispersivos. O ensaio avalia a dispersividade de um solo medindo a tendência natural da fração de argila de manter-se em suspensão. O procedimento envolve a determinação da porcentagem de partículas no solo que são menores que 0,005 mm em tamanho usando o ensaio de sedimentação tradicional conforme a NBR 7181 (ABNT, 2016). Em sequência, é realizado um ensaio de sedimentação sem a utilização de dispersante químico e de agitação mecânica. A quantidade de partículas de 0,005 mm no ensaio sem defloculante e agitação mecânica é expressa como uma porcentagem das partículas de 0,005 mm do ensaio padrão, conforme indica a Figura 2.14 e a Equação 2.3. Esta porcentagem é definida como a razão de dispersão ou de dispersividade do solo. O material é então classificado como dispersivo, moderadamente dispersivo ou não dispersivo com base na proporção obtida a partir destes ensaios.

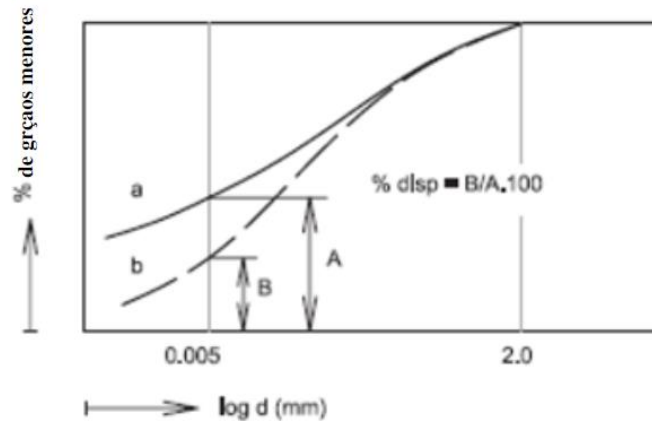


Figura 2.14 - Determinação da razão de dispersividade através da curva granulométrica do ensaio de sedimentação com dispersante (a) e sem dispersante (b). (fonte: adaptado de Belarbi *et al.*, 2013).

$$PD (\%) = \frac{< 0,005mm (sem dispersante)}{< 0,005mm (com dispersante)} \times 100 = \frac{B}{A} \times 100 \quad (\text{Equação 2.3})$$

A Tabela 2.2 apresenta a classificação de dispersão dos solos, conforme alguns autores, através da porcentagem obtida pelo ensaio de SCS.

Tabela 2.2 - Classificação conforme a razão de dispersão, segundo alguns autores

Autores	Porcentagem de Dispersão (%)	Propriedade de Dispersão
ASTM D-4221	Próximo de 100	Completamente dispersivo
	Próximo de 0	Solo não dispersivo
Decker et Dunnigan (1977)	<35	Sem problema de dispersibilidade
	35-50	Provavel dispersibilidade
	>50	Problema de dispersibilidade
Knodel (1991)	<30	Não dispersivo
	30-50	Intermediário
	>50	Dispersivo

(fonte: adaptado de Belarbi *et al.*, 2013)

Segundo Maharaj *et al.* (2015), deve-se notar que a dispersividade é uma função da mineralogia da argila e não do tamanho da fração de argila. É possível ter uma alta porcentagem de material menor ou igual a 0,005 mm que é inteiramente quartzo (p.ex.), não possuindo propriedades dispersivas. Por outro lado, se todo o material passante nessas frações consistir em argilominerais, o comportamento dispersivo seria consideravelmente diferente.

2.3.5 Capacidade de Troca Catiônica

A capacidade de troca catiônica (CTC) do solo, segundo Cruz (2008), é definida como a quantidade de cátions necessária para neutralizar as cargas negativas de uma quantidade unitária de solo em determinadas condições, ou seja, a capacidade do solo de reter e trocar cátions, para um determinado pH. As cargas negativas pertencem à fase sólida do solo, representadas pelas partículas de argila, pela fração coloidal da matéria orgânica e pelos óxidos hidratados de ferro e alumínio.

A CTC geralmente é expressa em centimol de carga por kilo ($\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$), sendo obtida pela Equação 2.4. A Tabela 2.3 apresenta a variação da CTC dos principais argilominerais.

$$\text{CTC} = \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{K}^+ + \text{Na}^+ + \text{H}^+ + \text{Al}^{3+} \quad (\text{Equação 2.4})$$

Tabela 2.3 - CTC dos principais argilominerais

Argilo-Minerais	CTC ($\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$)
Caulinita	3 - 15
Clorita	11 - 40
Ilita	10 - 40
Vermiculita	100 - 150
Montmorilonita	80 - 100

(fonte: adaptado de Guimarães, 1971).

Observa-se que parte da Equação 2.4 corresponde ao total de sais dissolvidos (TSD) somada às quantidades dos íons de H^+ e Al^{3+} , passíveis de determinação por análise química através de espectrofotometria. (GUIMARÃES, 1971).

2.3.6 Identificação dos Argilominerais Via DRX

Após a descoberta por Hendricks & Fry (1930) e Kalley *et al.* (1931) de que as argilas apresentavam material cristalino mineral que produzia padrões de raios-X, a investigação de minerais de argila por métodos de difração de raios-X (DRX) tornou-se um instrumento valioso no estudo de solos. (GRIM, 1962)

Segundo Moniz (1972), a DRX é uma das técnicas mais seguras na identificação dos minerais de argila, permitindo facilmente identificar os componentes mineralógicos de uma mistura, mesmo em pequenas proporções. Esta identificação baseia-se na ordem de grandeza do

comprimento de onda do sinal emitido e difratado que é da mesma magnitude do espaçamento atômico entre os planos cristalinos dos argilominerais ($\sim 1 \text{ \AA}$).

A difração de raios X ocorre segundo a Lei de Bragg (Eq. 3.8), a qual estabelece a relação entre o ângulo de difração e a distância entre os planos que a originaram. Ao incidir um feixe de raios X em um cristal, o mesmo interage com os átomos presentes, originando o fenômeno de difração. O feixe difratado sem mudança do comprimento de onda, resultante da dispersão dos raios X pelos elétrons do cristal, só é reproduzido se for satisfeita a Equação 2.5. Deste modo, cada substância tem um padrão de difração único e próprio.

$$n\lambda = 2d_{hkl}\text{sen}\theta \quad (\text{Equação 2.5})$$

Sendo:

n: número inteiro de ondas

λ : comprimento de onda incidente

d_{hkl} : distância interplanar

θ : ângulo de incidência

Segundo Gomes (1986), a identificação dos argilominerais por DRX nem sempre é óbvia. Muitas vezes as lâminas recebem tratamentos diferenciados para serem analisadas novamente. A distinção de alguns argilominerais nem sempre é fácil (por exemplo, as esmectitas e vermiculitas). Além disto, conforme citado por Scheuermann Filho (2019), a identificação dos argilominerais presentes em um solo também torna-se complexa em função da presença de partículas minerais maiores (quartzo, feldspato e carbonatos), que podem mascarar o sinal difratado dos argilominerais durante o ensaio. Além disto, o tamanho das partículas de argila também oferece dificuldades na interpretação do ensaio, pois essas, mesmo quando isoladas, tendem a produzir picos de fraca intensidade em amostras não orientadas. Logo, a identificação das fases minerais em uma argila deve ser precedida por um processo prévio de separação da fração de interesse, seguida pela correta preparação da porção de material escolhido para o ensaio.

Em solos naturais, a separação da fração argilosa consiste no isolamento das partículas com tamanho inferior a, geralmente, $4 \mu\text{m}$ ou $2 \mu\text{m}$, via sedimentação por centrifugação ou filtração através de sucção à vácuo com a utilização de papéis filtros especiais. (VELDE, 1992). Ainda, é importante que haja a remoção da matéria orgânica e de óxidos de ferro, pois

ambos podem prejudicar a identificação das fases minerais já que inibem a dispersão das partículas. (MOORE e REYNOLDS, 1997)

2.3.7 Microscopia Eletrônica de Varredura

A microscopia eletrônica é a técnica indicada para o estudo das formas dos cristais individuais dos argilominerais, tão importantes para a compreensão da gênese e diagênese desses mesmos minerais e também para a reologia do sistema argila-água. A técnica de varredura permite o exame de superfícies, adequada para análise da textura de argilas, solos, sedimentos, materiais cerâmicos, entre outros. (GOMES, 1986).

2.4 ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS

A estabilização de solos envolve, necessariamente, a modificação das características do geomaterial existente a fim de que certas propriedades desse satisfaçam a determinadas demandas de um projeto de Engenharia (INGLES e METCALF, 1972).

Conforme citado por Schwendler (2013), o processo de estabilização de um solo implica na aplicação de métodos que buscam ganhos nas propriedades de resistência, estabilidade volumétrica, permeabilidade e durabilidade, diante de variações climáticas e esforços aplicados ao uso desse material. Define-se um solo como estabilizado quando se tem um ganho significativo de resistência com o emprego de algum aditivo. E define-se um solo como melhorado quando a adição melhorou outras propriedades (redução da plasticidade, de expansão, de contração etc.), sem um ganho significativo de resistência.

Existem dois grandes grupos de procedimentos para a estabilização dos solos: 1) estabilização mecânica e 2) estabilização físico-química. A escolha de qual procedimento de estabilização a ser feito é função principalmente das propriedades do solo a ser estabilizado, da sua aplicação em campo e de fatores econômicos.

Dessa forma, conforme citado por Scheuermann Filho (2019), torna-se fundamental a abordagem de conceitos inerentes aos processos físico-químicos envolvidos na estabilização de solos, bem como a descrição de variáveis determinantes no comportamento de certos tipos de estabilização.

2.4.1 Estabilização Físico-Química

A estabilização química visa desenvolver uma forma de ligação química entre as partículas de solos que já apresentam natural atração por íons (fração fina). Estes materiais ao serem misturados a determinados aditivos têm uma conexão ocasionada por reações de troca iônica e de polimerização, proporcionando um aumento de atração entre as partículas finas do solo, produzindo grãos maiores, e modificando a sua estrutura. Este processo resulta em um aumento de resistência quando submetido a esforços, seja na condição úmida ou seca.

Os aditivos mais utilizados na estabilização química são: cimento Portland, cal, cinzas, produtos ou resíduos industriais. A escolha do tipo de aditivo é função do solo a ser estabilizado, da finalidade da obra e dos parâmetros de projeto a serem alcançados. Alguns aditivos são mais eficientes para estabilizar solos mais arenosos, outros para estabilizar solos mais argilosos. Dentre outros fatores, dependendo do aditivo escolhido, o teor necessário para estabilizar pode tornar a técnica mais ou menos onerosa.

2.4.2 Lignina e Derivados

A Lignina é um aglutinante natural que liga as fibras vegetais na madeira. Segundo Ingles e Metcalf (1972), é formada por uma complexa macroestrutura polimérica com muitos grupos carboxílicos e hidroxílicos com afinidade à superfície da sílica, e, portanto, adequada para formar ligações fortes com as partículas dos solos.

Canakci *et al.* (2015) citam que as ligninas devem ser consideradas intuitivamente como adesivos de boa qualidade de madeira e papel, uma vez que são as substâncias que mantêm as fibras vegetais unidas. Ligninas são as mais abundantes componentes aromáticas de plantas em ecossistemas terrestres e representam uma parte significativa da serapilheira¹ (aproximadamente 20%) nos solos. Em plantas mais altas e complexas, as ligninas são quimicamente conectadas à celulose e hemicelulose nas paredes das fibras celulósicas,

¹ Camada que reveste superficialmente o solo, formada pela deposição dos restos de plantas e acúmulo de material orgânico em diferentes estágios de decomposição.

conferindo resistência e rigidez às estruturas vegetais, bem como a resistência à biodegradação de carboidratos (isto é, hidrólise enzimática) e a estresses ambientais. A biomassa vegetal é lignocelulósica, material que consiste em celulose, hemicelulose e lignina.

Davidson e Handy (1960), explicam que durante a manufatura do papel, a lignina é produzida como subproduto. Sua composição e concentração dependem do processo empregado na produção do papel. A lignina é extraída através do tratamento com produtos sulfíticos (sais e ésteres do ácido sulfuroso), resultando num ácido liginosulfônico. Atualmente esse ácido é tratado com cal gerando o liginosulfonato de cálcio, muitas vezes incorretamente denominado sulfonato de lignina ou simplesmente lignina.

Milhares de toneladas de solução sulfítica, contendo cerca de 10% de liginosulfonato de cálcio e açúcares, são produzidas como resíduo anualmente no Canadá e nos EUA, constituindo um problema de disposição final. Por essa razão muitas pesquisas têm-se conduzido com esse material. (BRAZETTI, 1996)

Smith (1952) relata que nos anos 50, na forma de aditivos, consideráveis volumes foram aplicados para minimização da poeira de estradas de terra, em camadas de acostamentos e para estabilização de solos arenosos. Contudo, segundo Kézdi (1979), essa aplicação era apenas temporária, pois como são produzidos por evaporação, são solúveis em água, de maneira que essas soluções sulfíticas podem ser lixiviadas pela chuva, tornando-se ineficientes em condições de tempo úmido, necessitando reaplicações periódicas.

Numa tentativa de melhorar a ação da lignina, Smith (1952), desenvolveu o processo cromolignina, adicionando bicromato de sódio ou de potássio no resíduo sulfítico, o que resultou na formação de um gel. Conforme Kézdi (1979), os íons de cromo podem transformar o liginosulfonato num gel (de cor escura) absorvente de água, capaz de expandir consideravelmente preenchendo os poros do solo.

Gopalakrishnan *et al.* (2010) apontam que a lignina tem um papel positivo na estabilização do solo, atuando como um agente cimentante, pois fornece um aumento praticamente linear de coesão com o aumento do teor de lignina. O tratamento com derivados da lignina também fornece aumento na resistência à compressão simples (q_u) e nos módulos resilientes dos solos, além de fornecer controle de emissão de poeira para estradas não pavimentadas.

2.5 LIGNOSULFONATO DE CÁLCIO (LS)

O lignosulfonato de cálcio é, basicamente, um complexo de polímeros derivados de árvores (compostas principalmente de celulose, hemicelulose e lignina). No processo de extração do sulfito para fabricação do papel, as ligninas são sulfonadas (formando os lignosulfonatos) para que se tornem solúveis em água e, assim, possam ser separadas da celulose insolúvel.

Conforme Grace (1987), para dissolver a lignina da madeira utiliza-se ácido sulforoso, e a extração pode ser realizada em toda a faixa de pH e qualquer uma das quatro bases diferentes (sódio, magnésio, amônia e cálcio) podem ser usados para tamponar a solução de cozimento. Lora e Glasser (2002) indicam que o processo de extração do sulfito, e sulfonação das ligninas, produz um derivado polimérico solúvel em água em misturas com carboidratos degradados. Uma função de ácido sulfônico alifático (HSO_3) torna-se parte do esqueleto da lignina garantindo pronta solubilidade em água na presença de um adequado contra-íon (Na, Ca, Mg, NH_4 , etc.).

Segundo Bozell *et al.* (2007) não é possível precipitar lignossulfonatos alterando o pH, uma vez que a lignina sulfonada geralmente é solúvel em toda a faixa de pH. Logo, a recuperação da lignina sulfonada (lignossulfonato) é comumente feita a partir da concentração do licor de extração residual após a remoção e recuperação do enxofre. A precipitação de cálcio do lignossulfonato com excesso de cal (processo de Howard) é o método de recuperação mais simples, e até 95% do licor de lignina pode ser recuperado e este processo é o mais indicado quando um produto de lignosulfonato de cálcio é desejado.

Assim, o lignosulfonato de cálcio é um aditivo solúvel em água sob qualquer valor de pH, não dissolúvel em solventes orgânicos, que possui forte dispersão, ligação e capacidade quelante (de fixar íons metálicos). Diversos estudos foram conduzidos para avaliar os efeitos do lignosulfonato de cálcio no meio ambiente, e mostram que ele não é prejudicial às plantas, animais ou vida aquática quando adequadamente fabricado e aplicado.

O mecanismo de estabilização do LS em solos finos é baseado no processo de reação eletrostática, a qual depende da carga superficial dos argilominerais e da capacidade de carga dos aditivos. Já em solos granulares o mecanismo de estabilização é o de coesão por cimentação. Acredita-se que o tamanho da molécula de ligação pode ter um efeito direto sobre

a coesão do solo, uma vez que a molécula de lignina é única (possui vários grupos polares diferentes e sistemas aromáticos), aumentando sua afinidade e resultando na melhoria da adesão, torna-a adequada para uma vasta gama de substratos.

Dessa forma, o lignossulfonato de cálcio tem sido utilizado principalmente como tratamento para estradas de terra, para diversos tipos de solos, na Europa e nos Estados Unidos desde a década de 1920.

2.5.1 Solo-LS

Indraratna *et al.* (2008) realizaram uma pesquisa sobre o comportamento de erosão interna de solos dispersivos tratados com lignossulfonato usando um novo aparelho para Simulação do Processo de Erosão de Interna (PSAICE). Foi concluído que o tratamento com o lignossulfonato melhora a resistência à erosão do solo tratado, semelhante aos aditivos tradicionais como cal e cimento. Athukorala *et al.* (2013) obtiveram um modelo para o comportamento de erosão interna de solos tratados com lignossulfonato de cálcio, e identificaram que ocorria uma diminuição no coeficiente de erosão interna de uma areia siltosa conforme aumentava-se o teor de lignossulfonato de cálcio adicionado a mistura, conforme ilustra a Figura 2.15.

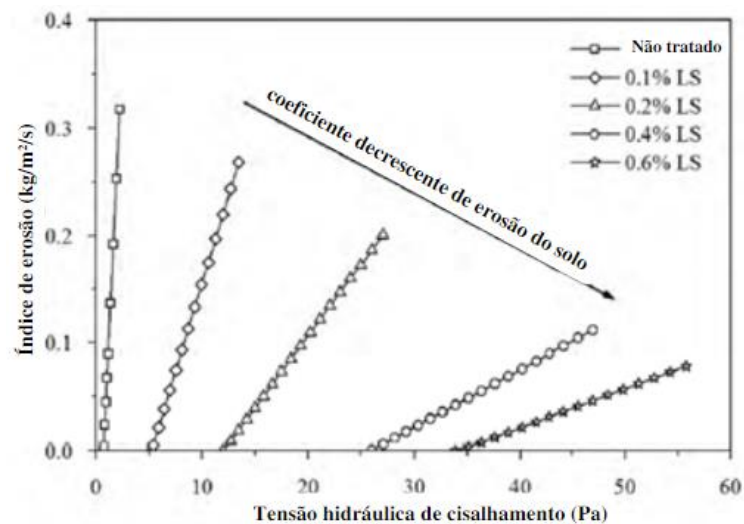


Figura 2.15 - Previsão de comportamento de erosão interna de uma areia siltosa tratada com lignossulfonato de cálcio. (fonte: adaptado de Athukorala et al.,2013)

Indraratna *et al.* (2013) desenvolveram um modelo para calcular a taxa de erosão interna de uma massa de solo tratada com LS, levando em conta a resistência à tração. Já Vinod e

Indraratna (2011) desenvolveram um modelo constitutivo elastoplástico anisotrópico para descrever o comportamento de solos estabilizados com lignosulfonato de cálcio.

Tingle e Santori (2003) investigaram o efeito do lignossulfonato em diferentes solos argilosos e descobriram que o aditivo melhorou significativamente a resistência à compressão simples de um solo argiloso de baixa plasticidade.

Além dessas investigações, pesquisadores como Chemstab (2003) e Tingle e Santori (2003) realizaram experimentos para investigar se o LS melhoraria o suporte do subleito e controlaria a emissão de poeira na construção de estradas de baixo volume. A adição do lignosulfonato modificou as propriedades índice dos solos tratados de diferentes maneiras. Foi provado que pequena quantidade de lignosulfonato de cálcio (0,5%) reduziu o limite de liquidez de um solo de baixa plasticidade.

Gow *et al.* (1961), trataram uma areia siltosa com 0,25-1,0% de LS e observaram que o limite de plasticidade foi reduzido quando a dosagem aumentou, mas nenhuma tendência consistente foi encontrada para o limite de liquidez. Uma melhora máxima nos valores de resistência à compressão simples foi observada para a adição de 5% de LS. As propriedades de compactação também foram afetadas pelo tratamento, uma vez que o teor de umidade ótimo foi reduzido e o peso específico aparente seco máximo foi aumentado, especialmente para dosagens entre 0,5 e 1,5%. Os valores de CBR medidos para cada dosagem com teor de umidade ótimo e o peso específico aparente seco máximo foram melhorados em comparação com amostras não tratadas, mas diminuiram com o aumento das dosagens.

Alazigha *et al.* (2016) obtiveram em sua pesquisa os difratogramas por DRX de um solo expansivo tratado com 2% LS, apresentados na Figura 2.16, os quais revelaram a adsorção basal e periférica de LS nos minerais expansivos, mas apenas adsorção periférica de LS nos minerais não-expansivos, resultando em redução da dupla camada e agregação de partículas de solo. O efeito de redução da dupla camada causou uma diminuição no tamanho do cristalito do mineral expansivo (alargamento do pico de 001 montmorilonita). Logo, os mecanismos de estabilização propostos de LS são de meios físicos, envolvendo mudanças nas propriedades cristalográficas do solo, em vez de significantes interações químicas.

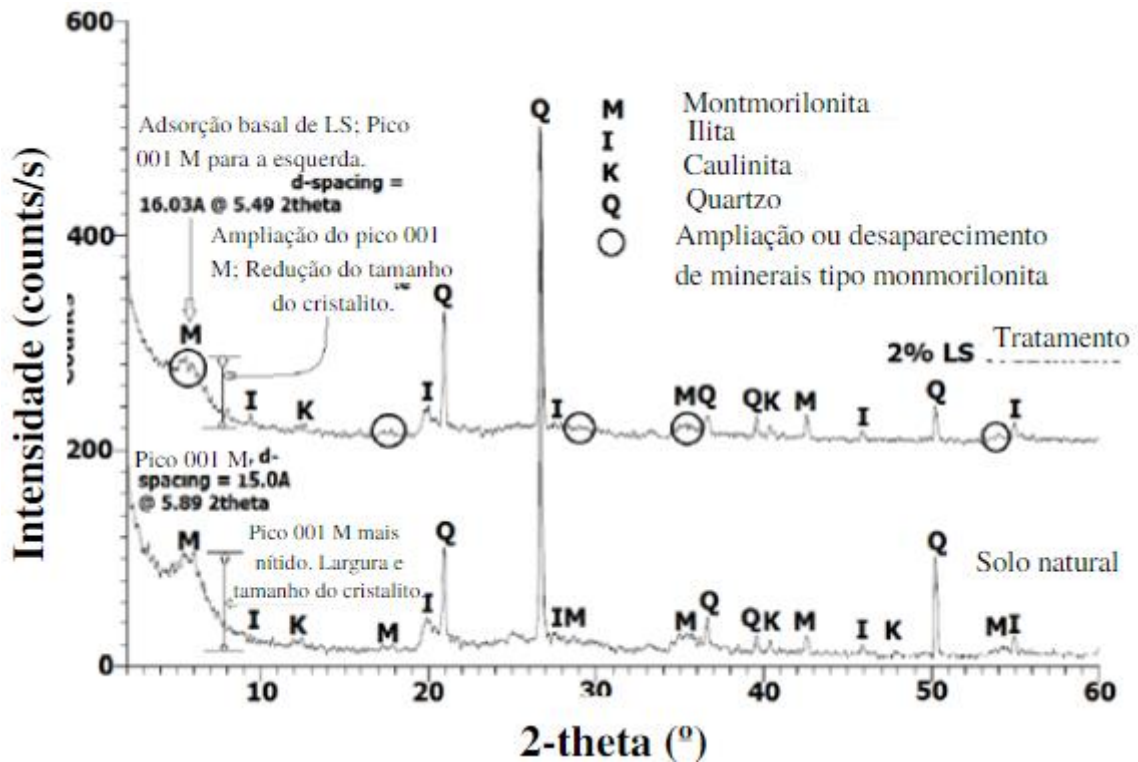


Figura 2.16 - Difratoograma de um solo expansivo natural e tratado com 2% de LS. (fonte: adaptado de Alazigha *et al.*, 2016)

2.5.2 Efeitos dos Teores de LS

A investigação de diversas pesquisas sobre estabilização físico-química com o lignosulfonato de cálcio mostrou que a quantidade necessária para estabilizar solos moles e instáveis é menor em comparação com alternativas tradicionais (cimento, cal, cinzas, etc). Ou seja, a utilização deste agente acaba proporcionando uma opção mais econômica e, também, oferece ao solo maior resistência, dentre outros benefícios. (MORAES *et al.*, 2019)

Chen *et al.* (2014) utilizaram em sua pesquisa corpos de prova de solo tratados com cinco dosagens (0,5, 1, 2, 3 e 4%) de LS por peso de solo seco, e mencionam que diversos autores descobriram experimentalmente que os resultados com LS = 6% e 8% foram muito próximos dos dados para LS = 4%, não resultando em ganhos significativos.

Tingle e Santoni (2003) relataram que um teor de 5% de lignosulfonato de cálcio resultou em um aumento de RCS para uma determinada argila mole.

Ta'negonbadi e Noorzad (2017) citaram que teores de 0,5% a 4% também forneceram acréscimo de resistência em processos de molhagem e secagem, em relação às amostras não-tratadas, além de aumento de rigidez sem levar a um comportamento frágil (quebradiço).

Alazigha *et al.* (2016) obtiveram em sua pesquisa que um solo expansivo tratado com 2% de lignosulfonato de cálcio apresentou uma redução na quantidade e no tamanho dos poros, reduzindo a expansão do solo. No entanto, indicam que a redução significativa no comportamento expansivo alcançada no laboratório pode não ser alcançada em aplicações de campo onde as condições são muito mais complexas, mas permanece o fato de que LS reduziu o teor de umidade adsorvida no solo tratado e, portanto, reduziu o potencial de expansão do solo.

Li *et al.* (2019) estudaram a estabilização de dois solos siltosos arenosos (um com pedregulhos e outro com argila) com teores de 5, 10 e 15% de lignosulfonato de cálcio. Os resultados do ensaio de RCS demonstraram que foi necessária uma baixa dosagem de lignosulfonato e água para melhorar a resistência do silte arenoso com pedregulhos. Com base nos resultados dos ensaios de durabilidade, o LS melhorou a resistência sob processos de umedecimento e secagem para ambos os tipos de solos siltosos estudados, ao mesmo tempo em que produziu melhoria na durabilidade do gelo-degelo para silte arenoso com argila.

2.5.3 Efeito do Tempo de Cura

Alazigha *et al.* (2016) investigaram o efeito do tempo de cura na porcentagem de expansão de um solo através da realização de ensaios de expansão em amostras de solo-2% LS, compactadas no teor de umidade ótimo e curadas por períodos de 7, 14, 54 e 180 dias. Para comparação, corpos de prova idênticos tratados com cimento foram preparados e ensaiados da mesma forma. A taxa de expansão dependeu do tempo de cura nas amostras tratadas com 2% de LS, embora a magnitude no final do regime de expansão do solo tratado foi independente desse tempo (Figura 2.17). A taxa de expansão diminuiu com o aumento período de cura. Após 10 minutos do ensaio de expansão, observou-se que o solo não tratado teria quase completado sua expansão primária (4%), enquanto que, para a amostra curada de 180 dias, a porcentagem de expansão foi significativamente baixa (0,4%). A dependência da taxa de expansão no tempo de cura pode significar que os processos de estabilização, de adsorção, revestimento e subsequente agregação de partículas pelo LS dependem do tempo em condições de laboratório.

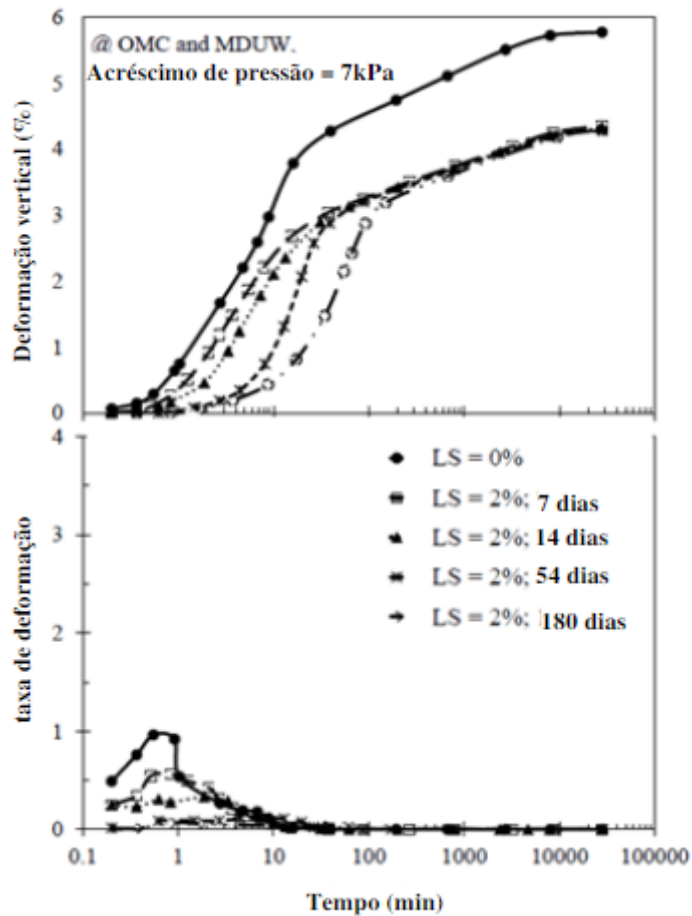


Figura 2.17 - Dependência do tempo de cura no comportamento de expansão de um solo tratado com LS. (fonte: adaptado de Alazigha *et al.*, 2016)

2.5.4 Efeito do LS na Microestrutura

Ta'negonbadi e Noorzad (2017) apresentaram em sua pesquisa fotografias obtidas por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) para entender melhor o efeito do LS, e reconhecer a microestrutura de solos não tratados e tratados com LS.

A Figura 2.18 exibe a imagem ampliada 4000x de uma argila (CH) não tratada, da cidade de Amol no Irã. Como pode ser visto nesta imagem, a estrutura da argila é descontínua e escamosa, com mais vazios visíveis.

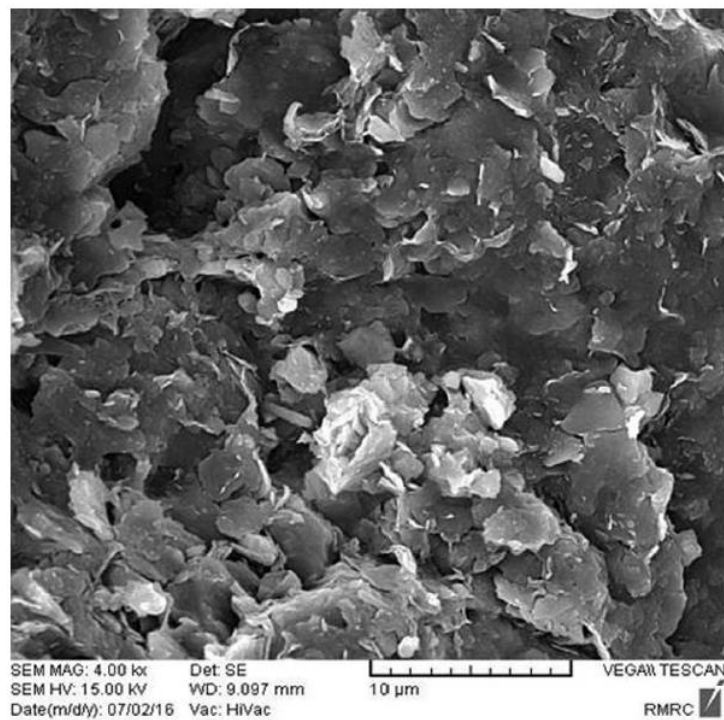


Figura 2.18 - Imagem microscópica ampliada 4000x de uma argila não tratada. (fonte: Ta'neonbadi e Noorzad, 2017)

A Figura 2.19 apresenta a imagem do MEV de uma amostra de lignosulfonato de cálcio, sendo possível identificar que as partículas do LS são laminadas e afiadas com grande tamanho.

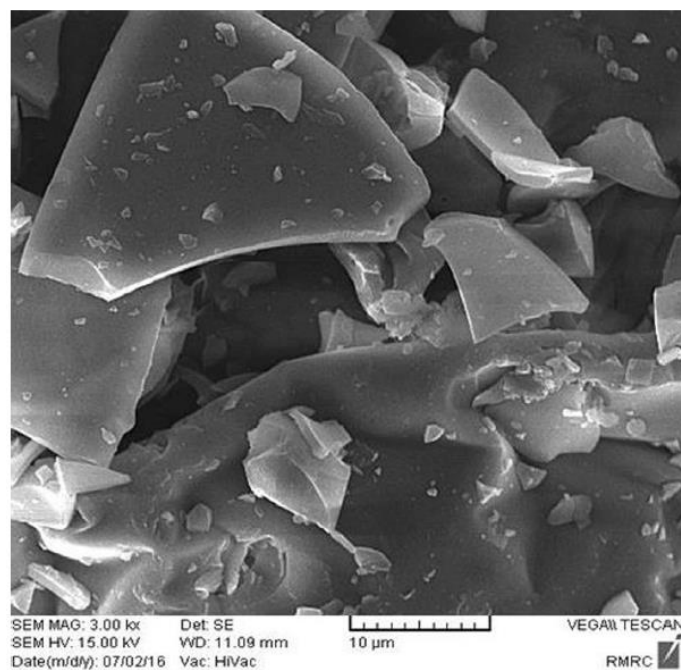


Figura 2.19 - Imagem microscópica ampliada 4000x de uma amostra de lignosulfonato de cálcio. (fonte: Ta'neonbadi e Noorzad, 2017)

A imagem de MEV apresenta na Figura 2.20 mostra um solo tratado com 0,75% de teor de LS, após cura de 28 dias. A estrutura do solo mudou por causa do desenvolvimento de reação eletrostática entre a mistura solo-água-LS.

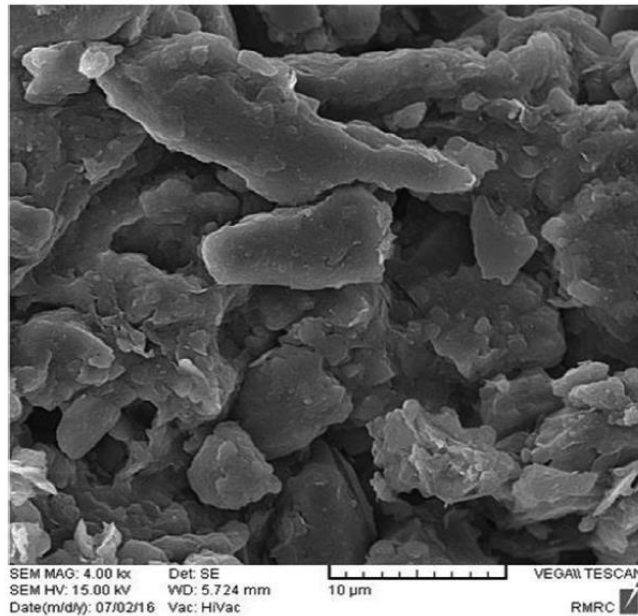


Fig. 14. Microscopic image of clay with 0.75% LS after 28 days curing with 4000 \times magnification.

Figura 2.20 - Imagem microscópica ampliada 4000x de uma amostra de argila tratada com 0,75% de lignosulfonato de cálcio. (fonte: Ta'negonbadi e Noorzad, 2017)

Assim, comparando as Figura 2.18 e Figura 2.20 pode-se perceber uma grande mudança na estrutura do solo, passando de uma mistura mais dispersa e com grãos menores para uma mistura com mais aglomerados de grãos, devido à ação eletrostática da reação.

Li *et al.* (2019) indicam em sua pesquisa que, conforme ilustrado nas imagens de MEV da Figura 2.21, as partículas de argila possuíam bordas, e sua estrutura continha uma boa quantidade de pequenos vazios. Com o tratamento, algumas partículas argila foram revestidas com lignosulfonato (parte mais clara na Figura 2.21b), e menor quantidade de vazios/poros foram observados (embora, agora, em maior tamanho). Em comparação com a microestrutura "solta" da amostra não tratada (Figura 2.21a), a microestrutura da amostra solo-LS é mais compacta e tinha mais capacidade de restringir o movimento da água e do ar, criando um ambiente mais forte e estável.

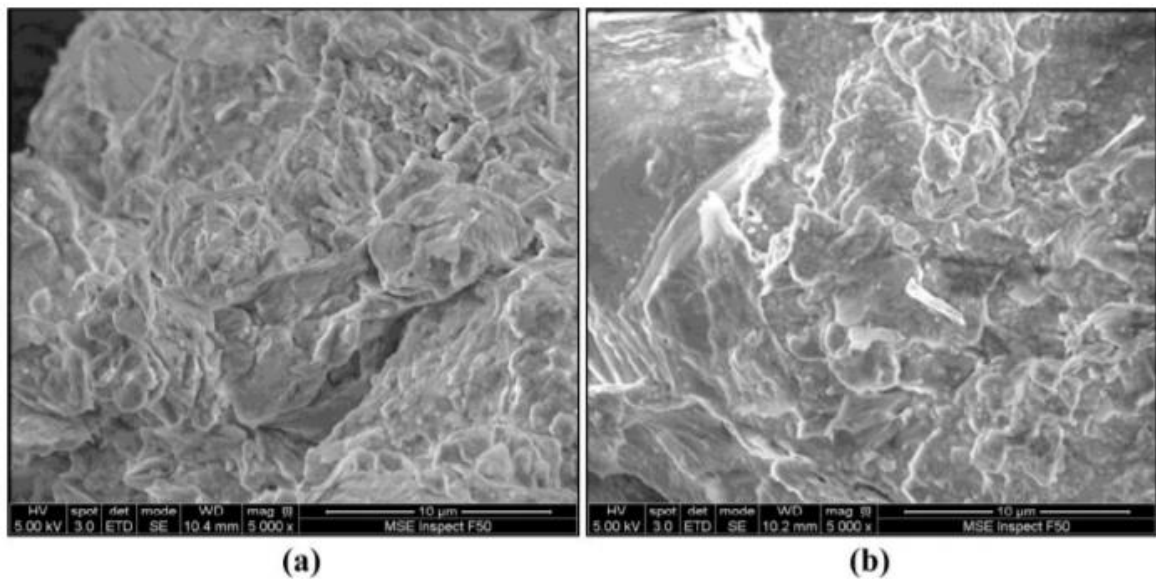


Figura 2.21 - Imagens de MEV de a) Solo não tratado b) Solo tratado com LS. (fonte: Li *et al.*, 2019)

Conforme sugerem Ta'negonbadi e Noorzad (2017), os resultados do MEV estão de acordo com o mecanismo de estabilização que Vinod *et al.* (2010) propuseram para uma argila dispersiva estabilizada com LS. Com base em sua análise microquímica, quando a mistura de água e LS é adicionada à argila, a água se decompõe em íons de hidroxila (OH) e de hidrogênio (H⁺). Então o LS é protonado por H⁺ e libera água, resultando em um composto carregado positivamente. Este composto de LS recém-criado com cargas positivas neutraliza as cargas negativas na superfície dos argilominerais.

Ta'negonbadi e Noorzad (2017) afirmam que esta neutralização promove uma redução no tamanho dos cristais de argilominerais (espessura da dupla camada) e os atrai um contra o outro para formar os aglomerados estáveis. Na verdade, por meio desses processos, o solo transforma-se de uma base particulada para uma estrutura mais agregada, e isso leva a uma melhoria nas propriedades mecânicas do solo.

No entanto, existe diferença entre o mecanismo de estabilização destes solos finos em relação aos solos granulares. Nos solos granulares a estabilização com o lignosulfonato de cálcio aumenta a coesão por cimentação, conforme indicado por Muttuvel (2008) apud Ta'negonbadi e Noorzad (2017), diferentemente dos solos argilosos em que a troca catiônica e as mudanças microestruturais são responsáveis pela estabilização. Não obstante, a Figura 2.22 ilustra, através das curvas granulométricas, a diferença no tamanho das partículas de um solo estabilizado com 2% de LS e com 2% de cimento.

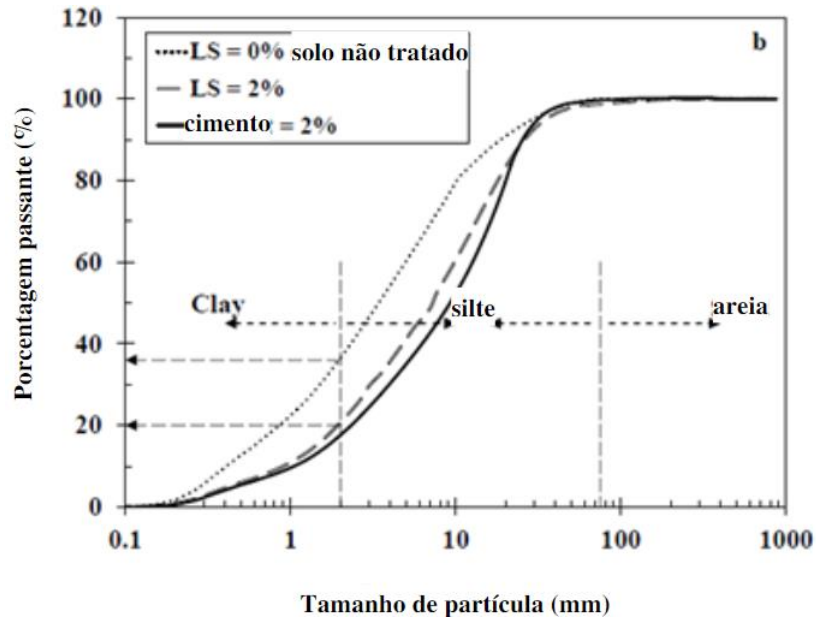


Figura 2.22 - Comparação das curvas granulométricas de um solo natural, tratado com 2% de LS e com 2% de cimento. (fonte: adaptado de Alazigha *et al.*, 2016)

Alazigha *et al.* (2017) apontaram que, devido à propriedade hidrofóbica do lignosulfonato e à flocculação induzida pela troca catiônica entre o lignosulfonato e as partículas do solo, surge um efeito impermeável à estrutura do argilomineral, levando a uma diminuição da expansão, sendo isto responsável pelo aumento de resistência de solos finos.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental pode ser dividido em quatro fases distintas e é exposto na Tabela 3.1 a seguir. Uma descrição resumida de cada uma das etapas é apresentada na sequência. Ainda, nos itens subsequentes, apresenta-se a abordagem experimental empregada, as metodologias para escolha dos fatores controláveis e descrições acerca dos ensaios realizados.

Tabela 3.1 - Resumo do programa experimental

Fases		Material	Procedimento	Tipo de ensaio
Primeira fase	Preparação e caracterização do solo	Solo Dispersivo	Caracterização	Massa específica real dos grãos
				Análise granulométrica
				Limites de Atterberg
				Compactação
				MCT
				Análise química
				Sedimentometria Comparativa
				Crumb Test
Pinhole Test				
Segunda fase	Dosagem do teor de LS e obtenção da melhor mistura	Solo-LS	Ensaio	Resistência à compressão simples (RCS)
Terceira fase	Avaliação dos efeitos da melhor dosagem sobre a rigidez, durabilidade, dispersibilidade e microestrutura da mistura	Solo-LS	Ensaio	Durabilidade por molhagem e secagem
				Sedimentometria Comparativa
				Crumb Test
				Pinhole Test
				Ensaio de Pulso Ultrassônico
				Mineralogia (DR-X)
Microscopia eletrônica (MEV)				
Quarta fase	Comparação e análise dos resultados entre as amostras tratadas e não tratadas			

A **primeira fase** compreendeu a preparação e a caracterização dos materiais utilizados na pesquisa com a determinação das características físicas, químicas e mineralógicas pertinentes ao presente estudo.

A execução dos ensaios relativos à **segunda fase** permitiu avaliar a influência das variáveis sobre a resistência e o comportamento dispersivo das amostras.

Na **terceira etapa**, foram realizados ensaios para caracterizar a microestrutura das amostras após o melhoramento com o melhor teor de lignosulfonato de cálcio, permitindo identificar as mudanças em sua estrutura, auxiliando na interpretação das respostas de desempenho obtidas na segunda fase.

A **quarta fase** compreendeu comparação entre o solo tratado e não tratado e análise dos resultados obtidos nesta pesquisa.

3.1 VARIÁVEIS INVESTIGADAS

As variáveis desta pesquisa foram classificadas como independentes e dependentes. As variáveis independentes são compostas de fatores do experimento que podem causar algum efeito sobre as variáveis dependentes, e são divididas em: fatores controláveis, fatores constantes e fatores de ruído. Já as variáveis dependentes são as de resposta do experimento.

- Fatores controláveis
 - ✓ Peso específico aparente seco máximo (γ_d) da mistura compactada, expresso em kN/m^3 ;
 - ✓ Teor de umidade (w) da mistura compactada, expresso em porcentagem;
 - ✓ Teor de lignosulfonato de cálcio (LS) em relação ao peso seco de solo, expresso em porcentagem;
 - ✓ Tempo de cura úmida dos corpos de prova da moldagem até sua ruptura: 7 e 28 dias;

- Fatores constantes
 - ✓ Tipo de solo: solo argiloso dispersivo;
 - ✓ Tipo de aditivo químico: lignosulfonato de cálcio;
 - ✓ Temperatura de moldagem e cura: $21^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$;
 - ✓ Taxa de deformação dos ensaios de resistência à compressão simples: 1% por minuto;

- Fatores de ruídos
 - ✓ Operador;

- ✓ Sensibilidade da balança;
- ✓ Precisão do paquímetro;
- ✓ Calibração das células de carga e LVDT;

As variáveis dependentes são:

- ✓ Resistência à compressão simples – RCS (q_u);
- ✓ Razão de dispersão (PD);
- ✓ Grau de dispersibilidade;
- ✓ Classificação quanto à dispersibilidade;
- ✓ Índice de durabilidade (PMA): expressa em perda de massa acumulada em relação à massa inicial após 6 ciclos de molhagem e secagem;
- ✓ Módulo de cisalhamento;
- ✓ Alterações na microestrutura das amostras.

3.2 MATERIAIS

No presente capítulo são descritos os materiais empregados (e estudados) na pesquisa. Dessa forma, expõe-se a caracterização física, química e mineralógica do solo dispersivo e do lignosulfonato de cálcio (LS) de forma detalhada em cada um dos itens a seguir.

3.2.1 Solo Dispersivo

O solo utilizado no presente trabalho provém da área urbana da cidade de Pelotas, no estado do Rio Grande do Sul, de um bairro denominado Quartier. A Figura 3.1 apresenta a localização da região no mapa do Rio Grande do Sul, a Figura 3.2 apresenta o mapa de unidades geológicas, localizando a área de estudo na unidade d1a (depósitos de leques aluviais) e Figura 3.3 apresenta o mapa de unidades pedológicas, localizando a área de estudo na unidade SX3.

Os solos da unidade SX3 são classificados como Planossolos Háplicos Eutróficos Solódicos, segundo a atualização da classificação taxonômica do Levantamento de Reconhecimento dos Solos do Rio Grande do Sul (Streck *et al.*, 2018), os quais são solos hidromórficos, com abrupta mudança textural entre os horizontes superficiais e subsuperficiais, e presença de 6 a 15% de sódio. Estes solos originam-se pelo processo de translocação de argilas, devido ao

alto grau de argila dispersa. A atividade da argila é de moderada a alta, sendo também moderadamente ou mal drenados.

Segundo Welter e Bastos (2003) esses solos desenvolvem-se sobre leques aluvionares pleistocênicos, originados dos materiais de intemperismo das rochas cristalinas na Serra do Sudeste carreados das terras altas da serra por torrentes de canal e/ou enxurradas e fortemente retrabalhados pelo mar ao longo dos eventos transgressivos que modelaram a Planície Costeira do RS.

Conforme citado anteriormente, o terreno estudado no mapa geológico apresentado por Xavier (2017), e locado na Figura 3.3, ocupa a unidade d1a (depósito de leques aluviais). Conforme Xavier (2010), esta unidade ocupa quase 50% do território da cidade de Pelotas/RS, e seus sedimentos são compostos principalmente por areia fina sítico-argilosas, pobremente selecionadas e de coloração creme, laminação plano-paralela incipiente, com concreções carbonáticas e ferro-manganíferas. Segundo Tomazelli e Villwock (2005), esses sedimentos sofreram ação, principalmente, do segundo evento transgressivo-regressivo pleistocênico, que corresponde ao primeiro estágio na evolução do complexo de barreiras múltiplas responsável pela formação da planície costeira do RS. Esta ação do mar retrabalhando os sedimentos justificam os significativos teores de sódio encontrados nos solos.

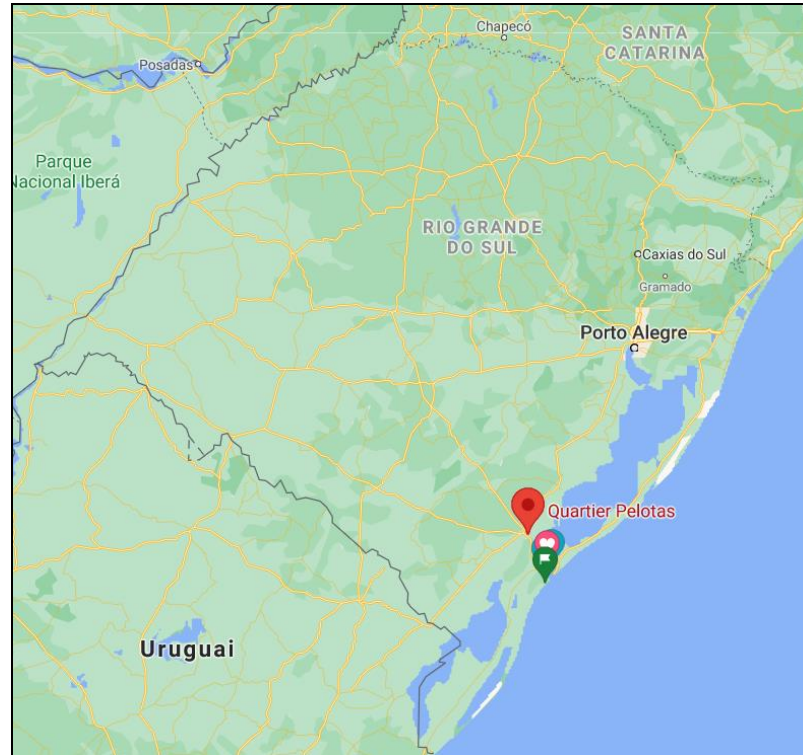


Figura 3.1 - Localização do bairro Quartier no mapa do estado do Rio Grande do Sul. (fonte: Google Maps)

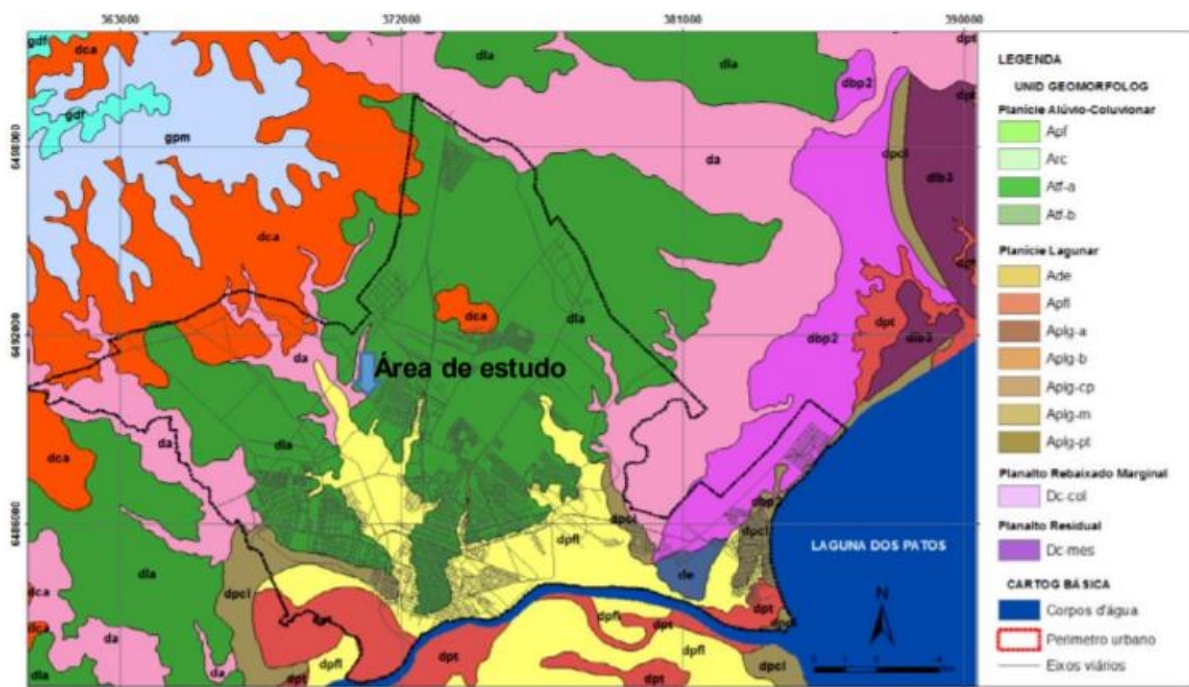


Figura 3.2 - Mapa de unidades geológicas. Área de estudo localizada na unidade dla: depósito de leques aluviais. (fonte: adaptado por Xavier, 2017)

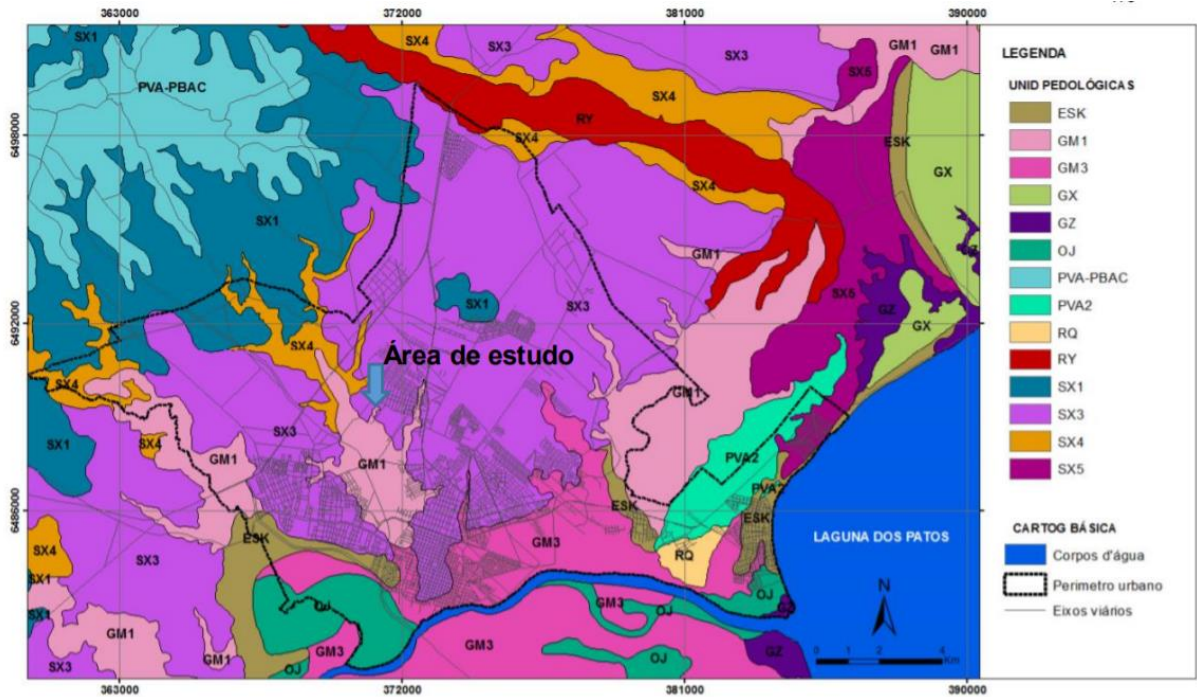


Figura 3.3 - Mapa de unidades pedológicas. Área de estudo localizada na unidade SX3: planossolo háplico.
(fonte: adaptado por Xavier, 2017)

A região do bairro planejado Quartier abriga novos empreendimentos residenciais, contando com uma área de 30 hectares e potencial construtivo para 400.000 m², conforme ilustram as Figura 3.4 e Figura 3.5 a seguir.



Figura 3.4 - Imagem aérea do bairro Quartier da cidade de Pelotas/RS. (fonte: Teitelbaum, J., 2019).



Figura 3.5 - Vista aérea do bairro Quartier da cidade de Pelotas/RS. (fonte: Teitelbaum, J., 2019).

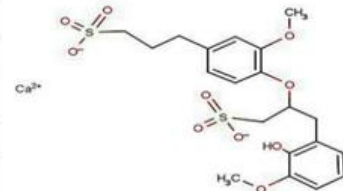
3.2.2 Lignosulfonato de Cálcio

O aditivo lignosulfonato de cálcio utilizado no presente trabalho é industrializado pela empresa Borregaard e foi doado por esta para a pesquisa. Este aditivo é um sal derivado da lignina, que é um composto obtido de madeiras reflorestadas durante a extração da celulose. Este composto polimérico a base de lignina inclui muitos grupos hidrofílicos que consistem em hidroxila fenil, bem como hidroxila alcoólica, sulfonato e grupos hidrofóbicos que existem na cadeia de carbono. Nesta pesquisa, o LS que foi utilizado, como mostrado na Figura 3.6, é um pó marrom claro que foi solúvel em água.

As especificações técnicas detalhadas sobre este aditivo estão apresentadas na Tabela 3.2 e também podem ser encontradas no site da empresa.

Tabela 3.2 - Especificações técnicas sobre o lignosulfonato de cálcio (LS)

Substância	Lignosulfonato de Cálcio (LS)
Aparência	Pó
Cor	Marrom
Odor	Não apresenta
Densidade Aparente (g/cm ³)	0,35-0,41
pH (solução a 10%)	3,5-5,1
Solubilidade em água	Totalmente solúvel
Ponto de fulgor (°C)	>150
Teor de Lignina (%)	40-60
Teor de Ca+Mg (%)	≤0,5



A Figura 3.6 apresenta a embalagem de 25 kg do produto, bem como uma amostra do mesmo.



Figura 3.6 - Embalagem do aditivo lignosulfonato de cálcio (LS) e amostra do mesmo. (fonte: Moraes *et al.*, 2019)

Nesta pesquisa, para reverter a dispersão do solo estudado serão testados os teores de 1%, 2% e 3% de lignosulfonato de cálcio.

3.3 MÉTODOS

Este item tem por objetivo descrever os equipamentos, métodos e demais procedimentos utilizados para cada um dos ensaios realizados. Todos os experimentos realizados foram baseados em normativas vigentes e citados como referência. A análise química foi realizada pelo Laboratório de Análise de Solos (LAS) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul

(UFRGS), os ensaios de DRX e MEV foram executados pelo Centro de Microscopia Eletrônica do Sul (CEME-SUL) da Universidade Federal do Rio Grande - FURG, os ensaios triaxiais CU e de pulso ultrassônico foram realizados no Laboratório de Ensaios Geotécnicos e Geoambientais (LEGG) pertencente à Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Os demais ensaios descritos foram desenvolvidos nas instalações do Laboratório de Geotecnia e Concreto (LGC) da Universidade Federal de Rio Grande - FURG.

3.3.1 Coleta das Amostras

A extração do solo foi realizada mediante escavação manual no terço inferior de um talude corte de pequena inclinação adjacente à via interna do empreendimento, atingindo aproximadamente a profundidade de 0,50 metros, uma vez que o local já estava limpo superficialmente. A Figura 3.7 apresenta fotos do local de extração das amostras, sendo possível identificar diversas feições erosivas como ravinas, formação de canais com água turva e escassez de vegetação, reforçando o comportamento dispersível e erodível do material. Essas evidências de campo, associadas à identificação da origem geológica do material justificou a escolha do bairro Quartier para ser o local de amostragem do solo utilizado nesta pesquisa. Welter e Bastos (2013) apresentam a investigação da dispersibilidade de solos desta unidade geológica, com pontos amostrais próximos ao escolhido.



Figura 3.7 - Local de amostragem do solo, apresentando visualmente comportamento dispersivo: ravinamento e água turva acumulada.

Portanto, em um dos taludes de corte da terraplanagem do empreendimento foram coletados cerca de 200kg de amostras indeformadas, as quais posteriormente foram acondicionadas em sacos plásticos e transportadas até o laboratório. O talude escolhido exibia feições de erosão por sulcos típicas de fenômenos de dispersão de solos, conforme apresentado na Figura 3.8.



Figura 3.8 - Local de extração das amostras indeformadas do solo utilizado nesta pesquisa.

3.3.2 Preparação das amostras

A preparação de amostras de solos para os ensaios de caracterização e para a moldagem dos corpos de prova envolve os seguintes procedimentos estabelecidos pela norma NBR 6457 (ABNT, 1986):

- Redução por quarteamento para representatividade e homogeneização das amostras;
- Secagem ao ar.
- Destorroamento e posterior peneiramento das amostras na peneira # 4 (4.75 mm) para ensaios de compactação, moldagem dos CPs para os ensaios de resistência à compressão simples, crumb test, durabilidade, compressão triaxial e pulso ultrassônico;
- Destorroamento e posterior peneiramento das amostras pela peneira # 10 (2.0 mm) para ensaios de caracterização granulométrica, classificação MCT, perda de massa por imersão, sedimentometria comparativa e moldagem dos CPs para os ensaios de Pinhole;

- Peneiramento pela peneira N° 40 (0.42 mm) para ensaios de limites de Atterberg;

As amostras preparadas foram identificadas e armazenadas em sacos plásticas até o dia de sua utilização.

3.3.3 Programa de Ensaios

3.3.3.1 Caracterização física do solo

Para a caracterização do solo foram realizados os ensaios de granulometria, massa específica real dos grãos, limites de liquidez e plasticidade, compactação Proctor e classificação segundo a metodologia MCT.

A determinação do teor de umidade do solo foi realizada seguindo os procedimentos descritos pela NBR 6458 (ABNT, 2016b). A umidade higroscópica da amostra de solo, além dos teores de umidade de moldagem, foram obtidos seguindo a metodologia prescrita na norma NBR 6457 (ABNT, 2016a).

Para a determinação da granulometria, realizou-se a sequência convencional de peneiramento grosso, sedimentação com o uso de defloculante e peneiramento fino conforme descrito na NBR 7181 (ABNT, 2018). Os limites de liquidez e de plasticidade do solo foram determinados a partir dos procedimentos descritos nas normas brasileiras NBR 6459 (ABNT, 2016c) e NBR 7180 (ABNT, 2016d) respectivamente. Para os ensaios de compactação, seguiu-se a metodologia apresentada na NBR 7182 (ABNT, 2016e).

3.3.3.2 Ensaio de resistência à compressão simples (RCS)

Para os ensaios de resistência à compressão simples foram seguidos os procedimentos da NBR 12025 (ABNT, 2012), sendo realizados em triplicada de corpos de prova cilíndricos com 10 cm de altura e 5 cm de diâmetro.

O procedimento de mistura e moldagem tem início com a pesagem individual dos materiais em balança com dois dígitos de precisão, com posterior acondicionamento individual desses em sacos plásticos de forma a preservar suas condições secas. Após isso, misturavam-se o solo e o lignosulfonato de cálcio até que esses atingissem uma uniformidade/homogeneidade

visual. Posteriormente, acrescentava-se água e a mistura prosseguia por cerca de 10 minutos até que uma consistência uniforme fosse alcançada. Da mistura úmida e homogênea era retirado material suficiente para o preenchimento de duas cápsulas a fim de que a umidade de moldagem fosse verificada. Subsequentemente, a mistura era dividida em três frações iguais que correspondem ao número de camadas necessárias ao tipo de corpo de prova empregado.

A moldagem era feita de forma estática com uma prensa hidráulica em moldes metálicos, conforme apresentado na Figura 3.9. Após a compactação estática de cada camada, escarificava-se o seu topo de modo a garantir a aderência com a camada subsequente. Ao término da moldagem de cada corpo de prova, eram verificadas as dimensões (altura e diâmetro) com o paquímetro, e a massa total. Em seguida, o CP era devidamente selado em três sacos plásticos e prosseguia para cura em um ambiente com fechada.



Figura 3.9 - Prensa hidráulica e moldes metálicos utilizados para moldagem dos corpos de prova.

Após a compactação e extração do corpo de prova, esse era identificado e acondicionado em embalagem plástica e em câmara úmida, de forma a evitar a perda de seu teor de umidade durante o processo de cura. A temperatura de acondicionamento foi mantida em $(23 \pm 2) \text{ C}^\circ$ e umidade relativa do ar não inferior a 95%. Os corpos de prova com diferentes teores de LS foram deixados no processo de cura de 7 e 28 dias, a fim de aferir a diferença de resistência do solo melhorado para cada período de cura. A Figura 3.10 apresenta o aspecto do corpo-de-prova moldado com os procedimentos acima descritos.



Figura 3.10 - Aspecto do corpo de prova após moldagem.

Com relação às especificações de moldagem, tolerava-se uma variação de $\pm 1,5\%$ nas dimensões médias de cada corpo de prova, de $\pm 1\%$ na sua massa e de 5% em relação a umidade média relativa (não absoluta) aferida pelas três cápsulas. Caso alguma dessas restrições não fosse satisfeita, o corpo de prova era descartado e um novo era moldado.

Posteriormente a cura e antecedendo a ruptura, os corpos de prova eram colocados em imersão durante 4 horas. Imediatamente antes do ensaio eles eram retirados da imersão e secos superficialmente com papel absorvente.

Para a ruptura dos corpos de prova foi utilizada uma prensa elétrica da marca Wille Geoteknik® com capacidade 6 tf e velocidade de ensaios de 1 mm/min. O ensaio foi instrumentado com uma célula de carga de capacidade para 50 kN, a qual realiza as leituras de força aplicada. Não foi empregado transdutor para medição de deslocamento interno, apenas um transdutor de deslocamento do tipo LVDT externo. Para aquisição de dados da célula de carga e do transdutor de deslocamento foi utilizado a unidade de aquisição de dados Spider® (da HBM) e os resultados processados pelo software CatMan®.

A Figura 3.11 mostra a aquisição de dados durante a ruptura de um dos corpos de prova, a qual estava sendo realizada na prensa elétrica.

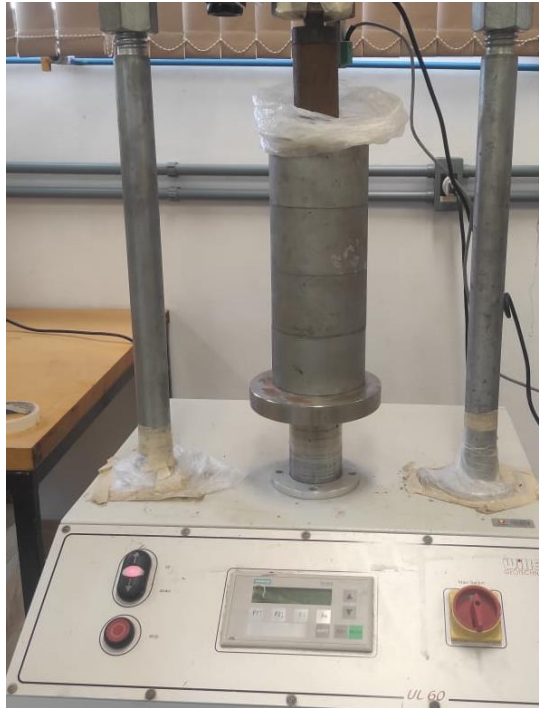


Figura 3.11 - Ruptura dos corpos de prova em compressão simples.

A resistência à compressão simples (q_u) de cada amostra foi determinada segundo a relação:

(Equação 3.1)

$$q_u = \frac{Q}{A_c}$$

Sendo:

Q = carregamento aplicado ao corpo de prova e medido pela célula de carga;

A_c = área corrigida do corpo de prova, calculada levando em conta as deformações axiais medidas no ensaio.

3.3.3.3 Caracterização da dispersão do solo

No presente trabalho, a susceptibilidade à dispersão do solo será avaliada inicialmente pelo Crumb Test conforme descrito no item 2.4.1, seguindo as normativas da NBR 13601 (ABNT, 2020a) e pelo Pinhole Test conforme descrito no item 2.4.2, seguindo os procedimentos da NBR 14114 (ABNT, 1998).

A moldagem dos CPs para os ensaios de Pinhole Test foi executada em um molde cilíndrico de aço com dimensões suficientes para confecção de amostras com 33 mm de diâmetro e 38 mm de altura. A confecção dos mesmos foi realizada através dos procedimentos de pesagem, mistura, compactação, desmoldagem, acondicionamento, armazenagem e cura. Para as

especificações de moldagem, tolerava-se uma variação de $\pm 1,50$ % nas dimensões médias de cada corpo de prova, de ± 1 % na sua massa e de 5% na sua umidade média relativa (não absoluta) aferida pela média de duas cápsulas. Caso alguma dessas restrições não fosse satisfeita, o corpo de prova era descartado e um novo era moldado.

Após a pesagem dos materiais com uma precisão de 0,01g, o solo e o aditivo foram misturados com o auxílio de uma espátula metálica, até chegar a uma mistura uniforme. Posteriormente foi adicionada a água, continuando o processo de mistura até uma adequada homogeneização. A quantidade total de mistura foi utilizada para a moldagem de um corpo de prova e para a aferição do teor de umidade.

A quantidade de estabilizante necessária para cada mistura foi calculada em relação à massa de solo seco utilizada e a quantidade de água determinada em relação à soma das massas de solo seco e de aditivo.

Após a mistura dos materiais, esta foi dividida em 5 partes iguais e armazenadas em recipientes fechados para evitar a perda de umidade. A compactação manual foi realizada por camadas, escarificando levemente os topos entre camadas para aumentar sua interação. Após a compactação foi realizado o furo padronizado no corpo de prova, esse foi pesado no molde, desmoldado, acondicionado em um saco plástico vedado e levado para câmara úmida para cura.

A avaliação da dispersão do solo desta pesquisa também foi realizada pela Sedimentometria Comparativa conforme a NBR 13602 (ABNT, 2020b).

A análise da microestrutura do solo dispersivo antes e após o melhoramento foi feita através de ensaio de Difração de Raios X e por Microscopia Eletrônica de Varredura.

3.3.3.4 Ensaio de durabilidade por molhagem e secagem

Durabilidade é a capacidade de um material em se manter íntegro e estável quando exposto às condições ambientais e às intempéries por longos períodos de tempo (DEMPSEY E THOMPSON, 1968). A durabilidade dos solos é um fator muito importante para locais com aplicações de cargas repetidas. Visando simular em laboratório os efeitos do intemperismo,

utilizam-se ciclos de molhagem-secagem ou gelo-degelo. Algumas metodologias avaliam a durabilidade em termos de perda de massa ou porcentagem de variação da resistência à compressão.

Atualmente no Brasil somente existe a normativa NBR 13554 (ABNT, 2012b) para a avaliação de durabilidade em solos estabilizados com cimento. Dessa forma, esta pesquisa utilizou como base as indicações desta norma. Esta estabelece a moldagem de três corpos de prova e a cura destes em câmara úmida por 7 dias. Posteriormente, procede-se aos ciclos de molhagem e secagem, imergindo os corpos de prova em água por 5 horas a temperatura ambiente e após colocando-os para secar em estufa por 42 horas a uma temperatura de $71 \pm 3^\circ\text{C}$. Ao final de cada ciclo realizam-se escovamentos nas faces laterais, no topo e na base. Este processo deve ser repetido até que 12 ciclos sejam completados.

A moldagem dos corpos de prova seguiu a NBR 12024 (ABNT, 2012c). Foram moldados corpos de prova cilíndricos com as seguintes dimensões de 99 mm de diâmetro e 127 mm de altura. A quantidade de estabilizante necessária para mistura foi calculada em relação à massa de solo seco, a quantidade de água em relação à soma das massas de solo seco e de aditivo. A quantidade total de mistura foi utilizada para a moldagem de um corpo de prova e para a determinação do teor de umidade.

Após a pesagem dos materiais com uma precisão de 0,01g, o solo e o estabilizante foram misturados com o auxílio de uma espátula metálica, até chegar a uma mistura uniforme. Posteriormente foi adicionada a água, continuando o processo de mistura até uma adequada homogeneização.

Sequencialmente a mistura dos materiais, a quantidade de solo-LS necessária foi dividida em três partes iguais, armazenadas em recipientes fechados para evitar a perda de umidade. Foram retiradas três porções da mistura e colocadas em capsulas para a determinação do teor de umidade através da média de três resultados obtidos.

A compactação manual foi realizada estaticamente em três camadas no interior de um cilindro pequeno de aço, devidamente lubrificado, de maneira que cada camada atingisse as especificações de teor de umidade e peso específico aparente seco, escarificando levemente entre camadas para aumentar a interação destas. Concluído o processo de moldagem, os CPs desmoldados, e suas massas e dimensões aferidas. Posteriormente, foram acondicionados em

sacos plásticos vedados e levados para cura em câmara úmida com temperatura controlada ($20^{\circ} \pm 2^{\circ}\text{C}$ ou $40^{\circ} \pm 2^{\circ}\text{C}$).

Com relação às especificações de moldagem, tolerava-se uma variação de $\pm 1,5\%$ nas dimensões médias de cada corpo de prova, de $\pm 1\%$ na sua massa e de 5% em relação a sua umidade média aferida por três cápsulas. Caso alguma dessas restrições não fosse satisfeita, o corpo de prova era descartado e um novo era moldado.

3.3.3.5 Ensaio de pulso ultrassônico

A fim de obter o módulo de rigidez inicial (G_0) da amostra a pequeníssimas deformações, utilizou-se o ensaio de pulso ultrassônico, o qual se trata de um método simples e não destrutivo. O módulo cisalhante (G_0) é definido como a relação entre tensão cisalhante aplicada e a deformação cisalhante resultante. Em meios elásticos, infinitos e contínuos há uma relação intrínseca entre ele, a massa específica desse meio ($\gamma \times g$) e a velocidade de propagação de uma onda cisalhante (V_s), conforme ilustra a Equação 3.2.

$$G_0 = V_s^2 \times \rho \quad (\text{Equação 3.2})$$

Onde:

V_s = velocidade de propagação da onda transversal (m/s)

ρ = massa específica do material

G_0 = módulo cisalhante a pequenas deformações (MPa)

As ondas cisalhantes são caracterizadas pela propagação em uma direção, indução do movimento das partículas do meio em uma direção perpendicular à dessa propagação e por necessitarem de meios com certa rigidez ($G > 0$) para se propagarem. Segundo Rocha e Giacheti (2016), os módulos cisalhantes máximos (G_0) são importantes para estudos dinâmicos e também nos casos de obras em que o nível de deformação é pequeno. A rigidez do solo é altamente não-linear e afetada por vários fatores, dentre eles: o intervalo de deformações, o estado de tensões, a estrutura, a cimentação e o histórico de tensões. O comportamento elástico do solo ocorre apenas em pequenos níveis de deformação, nos ensaios não-destrutivos ($\gamma_s < 10^{-6}\%$). Para níveis de deformações acima deste limiar, a rigidez do solo diminui com o aumento das deformações.

4 RESULTADOS

No presente capítulo são apresentados todos os resultados obtidos nos ensaios de laboratório empregados na avaliação das características físicas, químicas, mecânicas e micromorfológicas do solo dispersivo in natura e melhorado com lignosulfonato de cálcio.

Apresentam-se, também, os procedimentos empregados nas análises estatísticas dos resultados feitas e conclusões preliminares sobre as mesmas.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO DISPERSIVO

A distribuição granulométrica do solo dispersivo é apresentada a seguir na Figura 4.1. Realizou-se o peneiramento grosso e o ensaio convencional de sedimentação, seguido do peneiramento fino, segundo a NBR 7181 (ABNT, 2018), com o uso de defloculante. Também foi realizado o ensaio de sedimentometria comparativa segundo a NBR 13602 (ABNT, 2020b), onde o procedimento de sedimentação é feito somente com o uso de água destilada, com o propósito de verificar uma vez que a tendência de que solos de natureza dispersiva se comportem de maneira semelhante na presença de água destilada pura ou água com solução defloculante. Dessa forma, foi possível avaliar a porcentagem de dispersão do solo (PD), a qual é definida como a razão entre a porcentagem das partículas com diâmetro inferior a 0,005 mm determinada segundo a NBR 13602 (ABNT, 2020b) pela mesma porcentagem aferida de acordo com a NBR 7181 (ABNT, 2018). O valor obtido para a PD foi de 96,30%, confirmando o comportamento dispersivo do material, enquadrando-se também nas porcentagens obtidas para solos apresentadas anteriormente na Tabela 2.2.

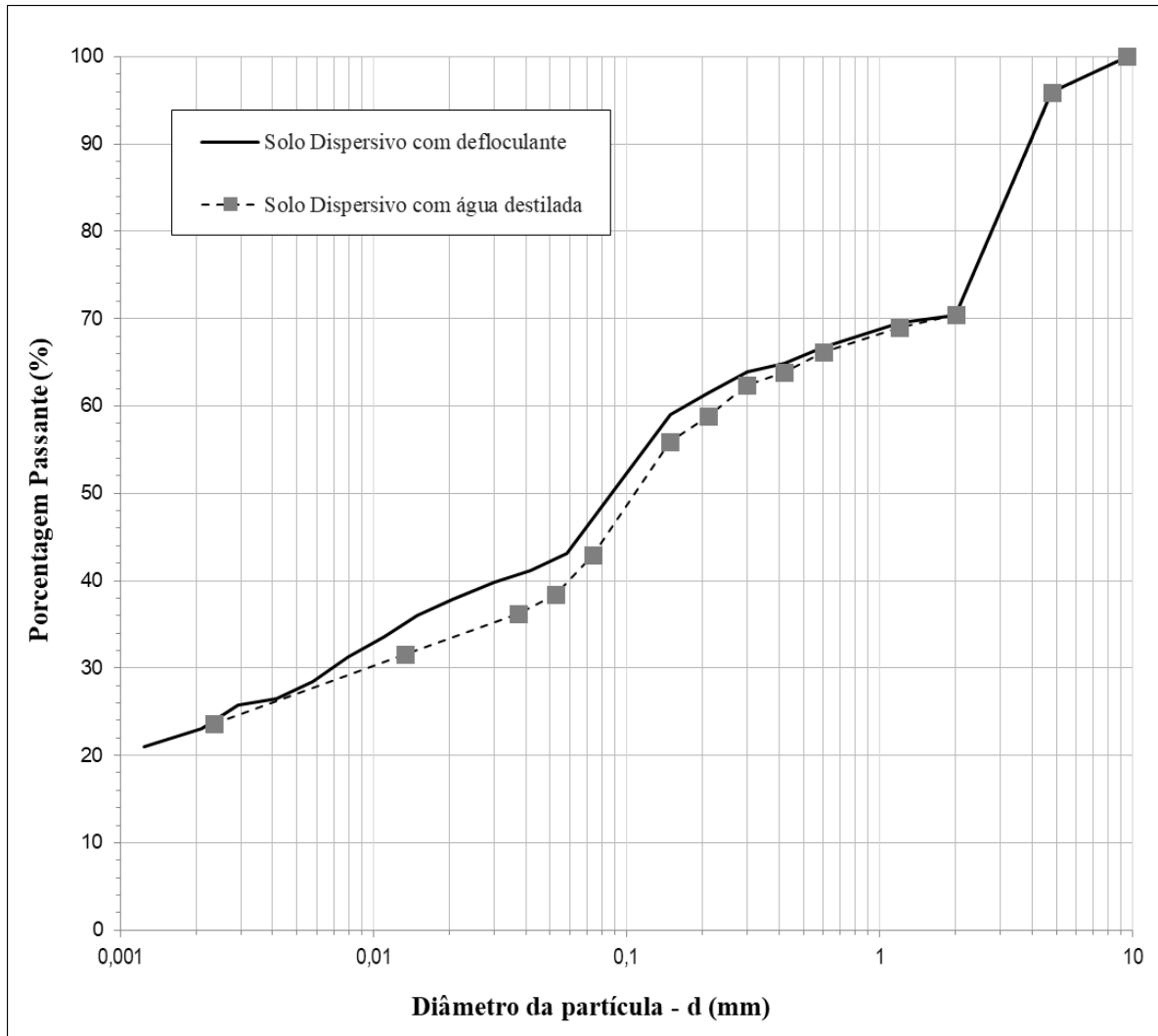


Figura 4.1 - Distribuição granulométrica do solo dispersivo.

A Tabela 4.1, a seguir, apresenta um resumo das demais características físicas do solo estudado.

Tabela 4.1 - Características físicas do solo dispersivo

Característica	Resultado		Norma
% Pedregulho (> 2,00mm)	30	Pedregulho argilo-arenoso	NBR 7181
% Areia (0,06mm < a < 2,00mm)	24		
% Silte (0,002mm < a < 0,06mm)	22		
% Argila (< 0,002mm)	24		
Peso específico real dos grãos γ_s (kN/m ³)	26,2	-	NBR 6508
Lmite de Liquidez (%)	40	-	NBR 6454
Limite de Plasticidade (%)	19	-	NBR 7180
Índice de Plasticidade (%)	21	Altamente Plástico	-
Atividade Coloidal	0,88	Atividade Normal	-
Porcentagem de Dispersão (%)	96,3		NBR 13602

As características químicas do solo no que diz respeito aos sais dissolvidos (e suas quantidades) e ao pH são apresentadas a seguir na Tabela 4.2. A CTC foi avaliada a pH 7,0 e considerou, apenas, a presença dos íons trocáveis: Al, Ca, Mg e Mn.

Tabela 4.2 - Características químicas do solo dispersivo

Cátion	Resultado
Sódio - Na ⁺ (cmolc kg ⁻¹)	0,47
Potássio - K ⁺ (cmolc kg ⁻¹)	0,0133
Cálcio - Ca ⁺² (cmolc kg ⁻¹)	0,77
Magnésio - Mg ⁺² (cmolc kg ⁻¹)	0,79
Característica	Resultado
Total de sais dissolvidos - TSD (cmolc kg ⁻¹)	2,04
Porcentagem de sódio - PS (%)	23%
Razão de absorção de sódio (RAS)	0,53
Matéria orgânica (%)	0,10
Capacidade de troca catiônica - CTC (cmolc kg ⁻¹)	17,4
pH	6,9

Embora tenha apresentado porcentagem significativa de sódio, o solo não se classifica como dispersivo, conforme o critério químico apresentado anteriormente no capítulo 2 na Figura 2.11. Welter e Bastos (2003) estudaram solos de mesma natureza e já haviam sinalizado que os ensaios químicos não apresentaram a mesma resposta apontada pelo Crumb Test e pela Sedimentometria Comparativa.

As curvas de compactação do solo natural e do solo com 3% de lignosulfonato de cálcio estão apresentadas na Figura 4.2. Optou-se pela não realização do ensaio com as porcentagens de 1 e 2% de LS por se considerar irrisória essa quantidade na mudança granulométrica do solo original e, portanto, o efeito na curva de compactação seria mínimo. Utilizaram-se as energias normal e modificada, no cilindro pequeno, com reaproveitamento de material.

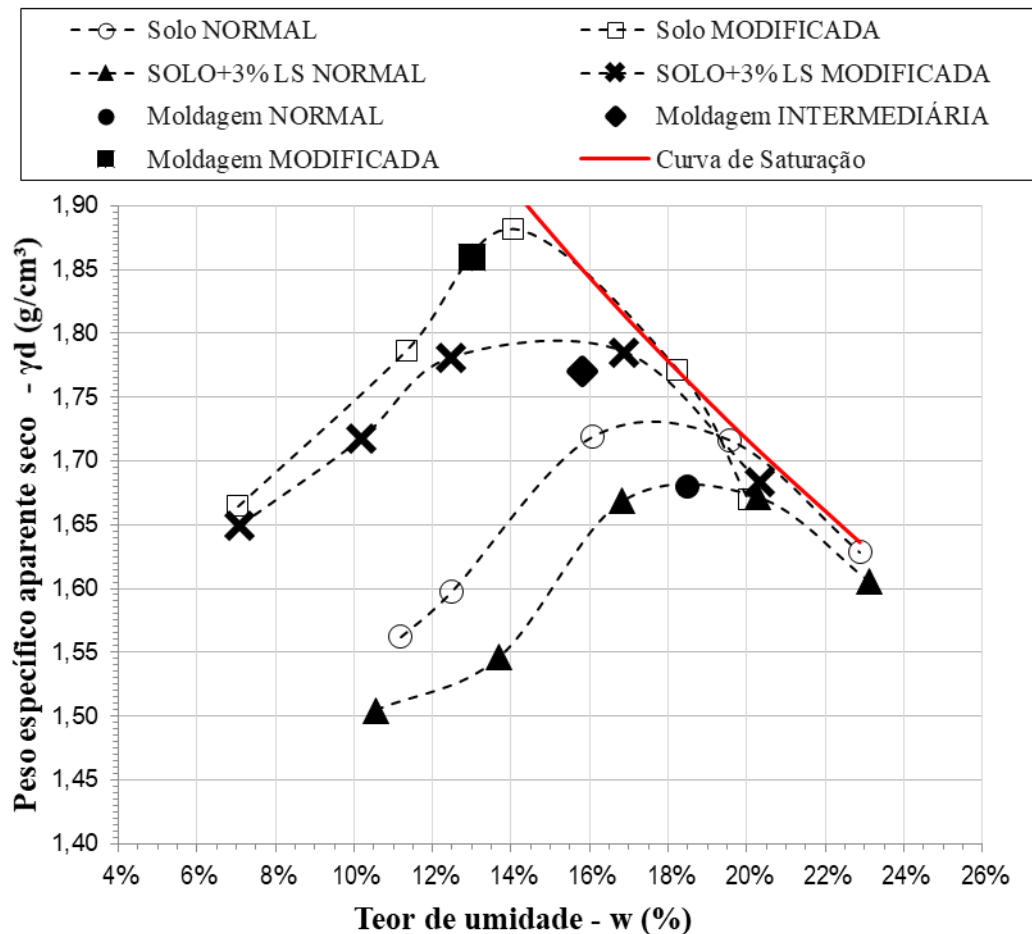


Figura 4.2 - Curvas de compactação com solo dispersivo.

Observa-se que a adição do lignosulfonato de cálcio implica em uma queda acentuada no máximo peso específico aparente seco atingido e em um pequeno acréscimo na umidade ótima. Isso está em consonância com o afirmado pelos autores Puppala e Hanchanloet (1999), Muttuvel (2008) e Ta'negonbadi e Noorzad (2017). Isto ocorre devido a mudanças na granulometria do solo decorrente dos processos de floculação e aglomeração das partículas causada pelo aditivo.

Dessa forma foram definidas as variáveis para moldagem dos corpos de prova para análise nesta pesquisa, sendo estas: peso específico aparente seco máximo na energia normal (16,8kN/m³), peso específico aparente seco máximo na energia intermediária (17,7kN/m³) e peso específico aparente seco máximo na energia modificada (18,6kN/m³).

O grau de dispersibilidade do solo também foi analisado através do Crumb Test, conforme a norma NBR 13601 (ABNT, 2020a). As Figura 4.3, Figura 4.4 e Figura 4.5 apresentam, no

início do ensaio, torrões de solo compactado em três pesos específicos secos definidos anteriormente ($16,8\text{kN/m}^3$, $17,7\text{kN/m}^3$ e $18,6\text{kN/m}^3$) submersos em água destilada.

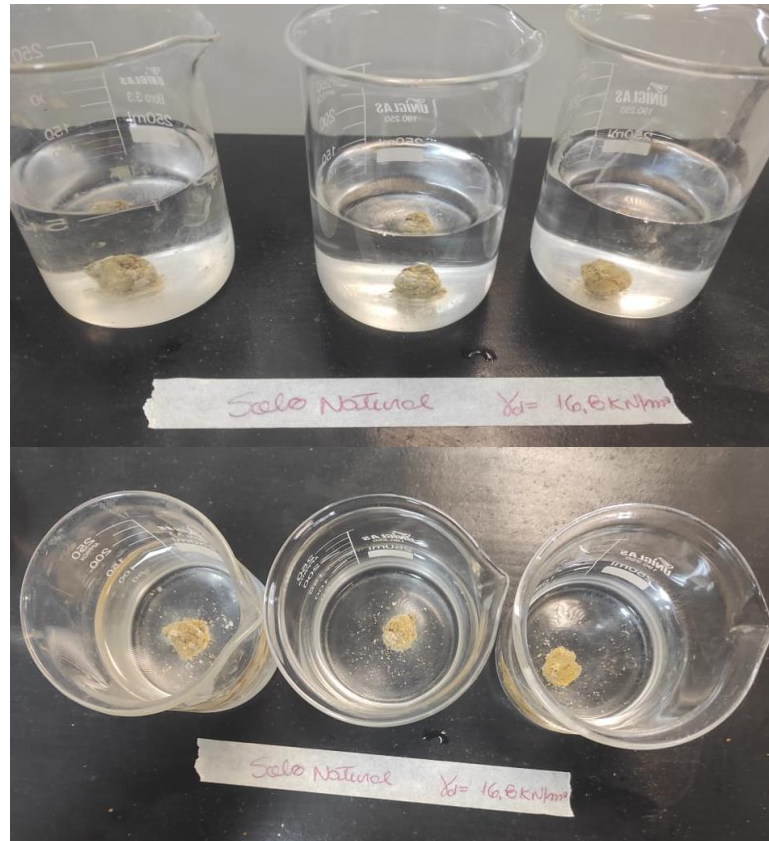


Figura 4.3 - Início do Crumb Test para o solo natural com peso específico seco de $16,8\text{kN/m}^3$.

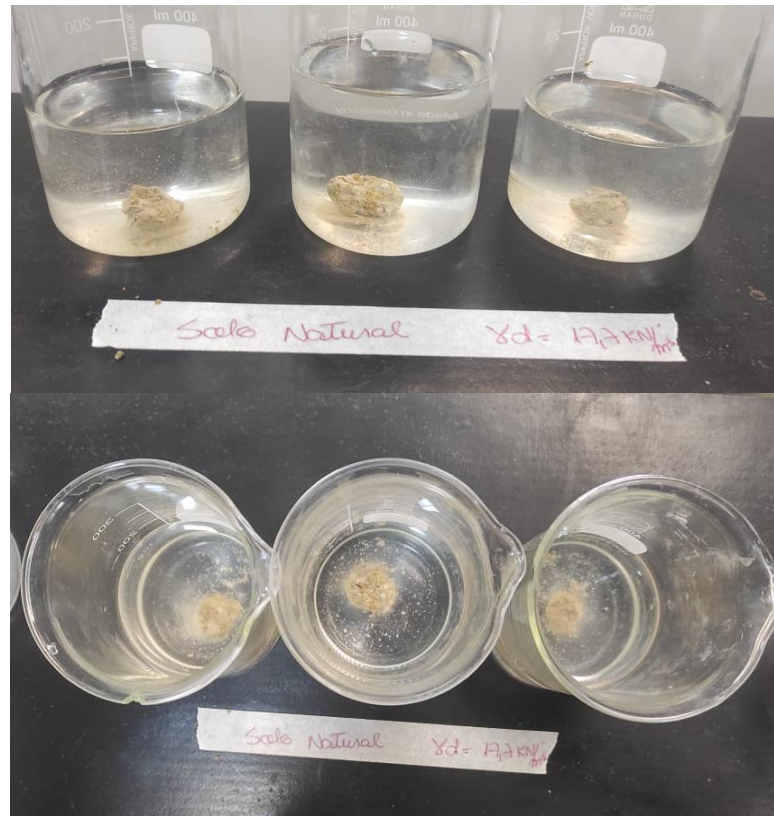


Figura 4.4 - Início do Crumb Test para o solo natural com peso específico seco de 17,7kN/m³.

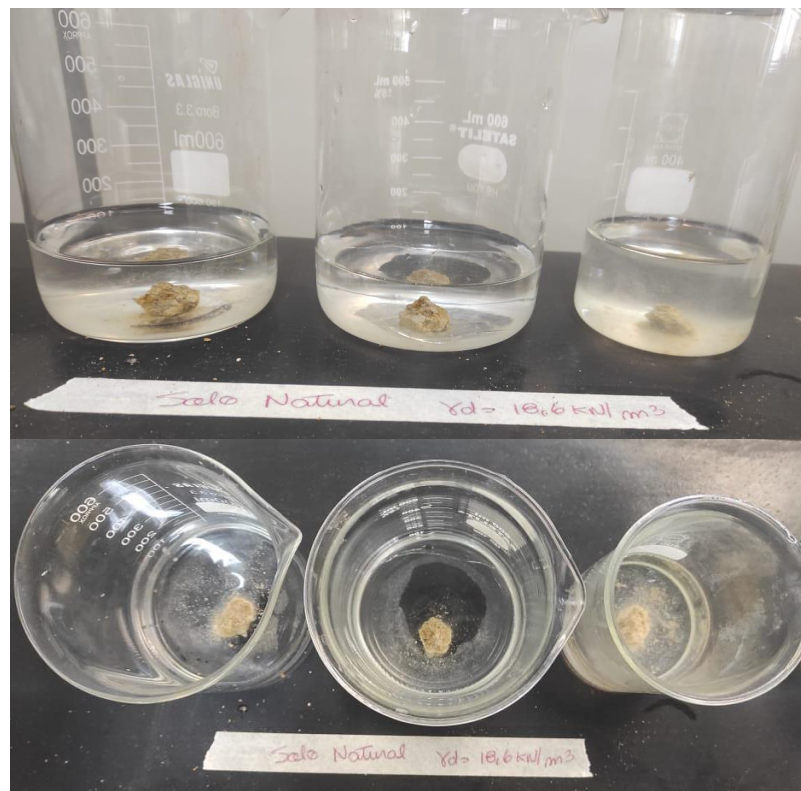


Figura 4.5 - Início do Crumb Test para o solo natural com peso específico seco de 18,6kN/m³.

Após o período de 1h analisou-se o estado dos torrões, exibidos nas Figuras 4.6, 4.7 e 4.8, e caracterizou-se o grau de dispersão do material conforme a Tabela 2.1 e Figura 2.10 apresentadas anteriormente.

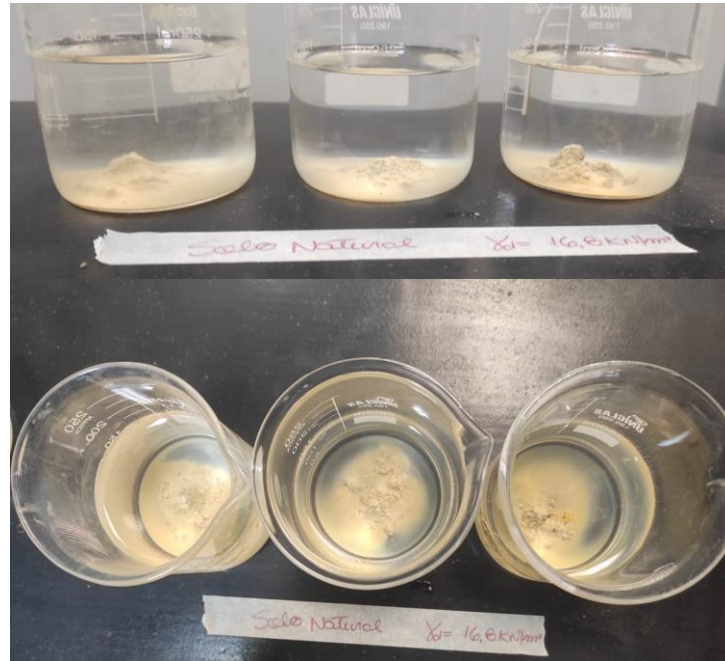


Figura 4.6 - Fim do Crumb Test para o solo natural com peso específico seco de 16,8kN/m³.

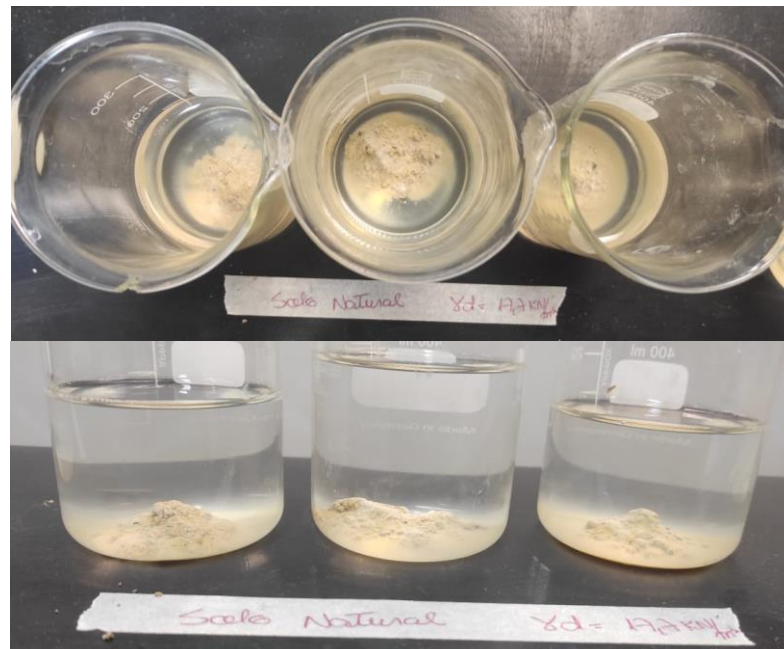


Figura 4.7 - Fim do Crumb Test para o solo natural com peso específico seco de 17,7kN/m³.

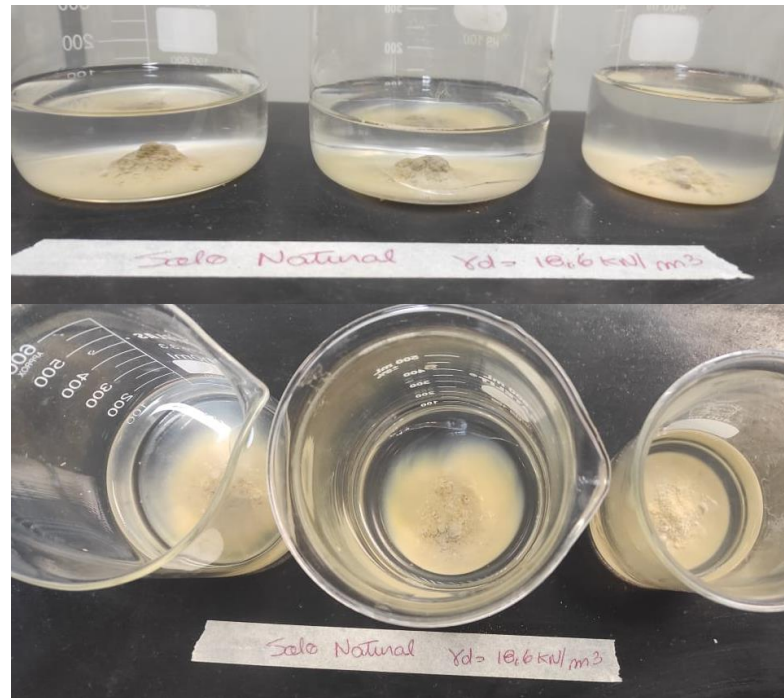


Figura 4.8 - Fim do Crumb Test para o solo natural com peso específico seco de $18,6 \text{ kN/m}^3$.

Pode-se identificar que os torrões de solo natural, independentemente do peso específico aparente seco, obtiveram o mesmo comportamento ao serem inseridos em água destilada e permanecerem em repouso durante 1h. A análise visual caracterizou o material como grau de dispersão 4 – altamente dispersivo, onde se observa uma nuvem de coloides em suspensão espalhando-se no fundo do béquer.

O solo dispersivo também foi ensaiado e classificado (tratado e não tratado com 3% de LS) segundo a metodologia MCT (Miniatura, Compactado, Tropical) proposta por Nogami e Villibor (1981). A classificação MCT cobre lacunas deixadas pelas classificações geotécnicas tradicionais e pela isolada associação de pedologia e geologia na previsão do comportamento dos solos tropicais frente à erosão (NOGAMI e VILLIBOR, 1979). Para a classificação, foram realizados ensaios segundo normas rodoviárias do DNER (Departamento Nacional de Estradas de Rodagem), sendo estas:

- Ensaio de compactação dinâmica Mini-MCV (DNER-ME 258/94 – Solos Compactados em equipamento miniatura – Mini-MCV);
- Ensaio de perda de massa por imersão (DNER-ME 256/94 – Solos compactados por equipamento miniatura – Determinação da perda de massa por imersão).

Como resultado, o solo dispersivo foi classificado como NG' (solo argiloso de comportamento não laterítico), propenso a apresentar propriedades típicas desse grupo, segundo Anexo – A, como:

- Expansão: média a alta;
- Contração: média a alta;
- Plasticidade: média a alta;
- Permeabilidade: média a baixa;
- Perda de suporte por embebição (inundação): alta.

O solo tratado com 3% de LS também apresentou a mesma classificação. No entanto, a principal diferença deu-se em relação ao resultado isolado do ensaio de perda de massa por imersão. A Figura 4.9 apresenta os corpos de prova do ensaio no início da imersão com 1cm dos corpos de prova de solo natural expostos. A Figura 4.10 apresenta o final das 24h do ensaio de perda de massa por imersão, onde os corpos de prova não resistiram, e a perda de massa por imersão atingiu 286%.



Figura 4.9 - Início do ensaio de perda de massa por imersão da Metodologia MCT, solo dispersivo.



Figura 4.10 - Final do ensaio de perda de massa por imersão da Metodologia MCT, solo dispersivo.

A Figura 4.11a apresenta o início do ensaio de perda de massa por imersão para o solo dispersivo tratado com 3% de lignosulfonato de cálcio. A Figura 4.11b mostra o final do ensaio das amostras de solo + 3%LS, indicando uma grande diminuição da perda de massa (de 286% de perda de massa do solo não tratado para 2% de perda de massa do solo tratado) e um aspecto mais agregado do material desprendido por efeito da imersão.

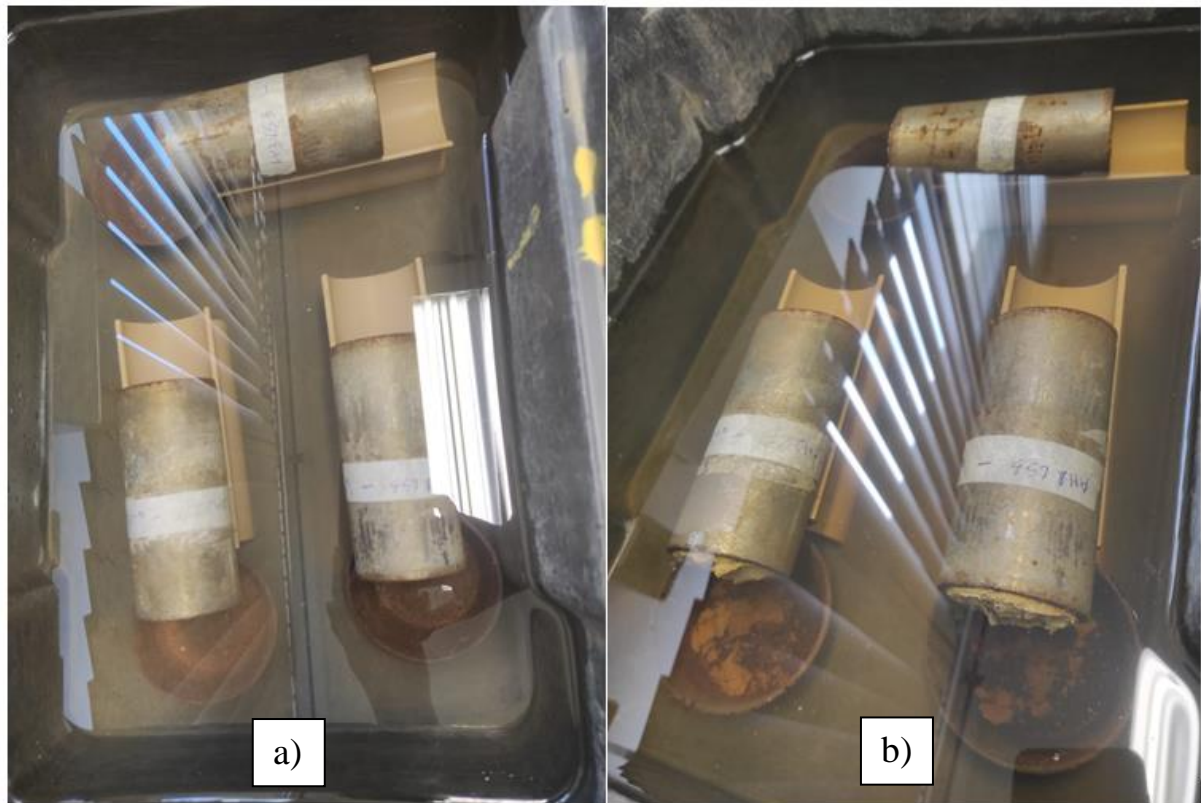


Figura 4.11 - Ensaio de perda de massa da Metodologia MCT do solo dispersivo tratado com 3% de LS. a) início do ensaio b) final do ensaio.

4.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

Para o ensaio de RCS foram moldadas triplicatas de corpos de prova compactados do solo dispersivo conforme as seguintes variáveis: pesos específicos secos máximos ($16,8\text{kN/m}^3$, $17,7\text{kN/m}^3$ e $18,6\text{kN/m}^3$), teores de lignosulfonato de cálcio (1%, 2% e 3%) e tempo de cura (7 e 28 dias), conforme ilustra a Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Resumo das variáveis utilizadas na elaboração dos corpos de prova para o ensaio de RCS.

Peso específico aparente seco (kN/m^3)	16,8						17,7						18,6								
	1	2	3	1	2	3	Solo Natural	1	2	3	1	2	3	Solo Natural	1	2	3	1	2	3	Solo Natural
Teor de LS (%)																					
Tempo de cura (dias)	7			28				7			28				7			28			
Total de CPs moldados	63																				

Os corpos de prova de solo natural, compactado em três pesos específicos aparentes secos diferentes, não resistiram ao processo de imersão que antecede o ensaio de RCS, conforme ilustra a Figura 4.12. Na mesma figura torna-se notória a dispersão do solo provocando elevada turbidez na água de imersão. O desempenho dos corpos de prova de não resistirem ao processo de imersão em água em repouso é mais um indício do comportamento dispersivo do solo. Observa-se que o processo de ruína dos corpos de prova sob imersão acentua-se quanto menor o peso específico em que foi compactado. O fato é um indicativo que a porosidade do material pode ter importância na severidade dos efeitos físicos da dispersão. Entretanto, veremos logo adiante que para o solo melhorado, sujeito a agregação pelo aditivo, o mesmo comportamento não se confirma.

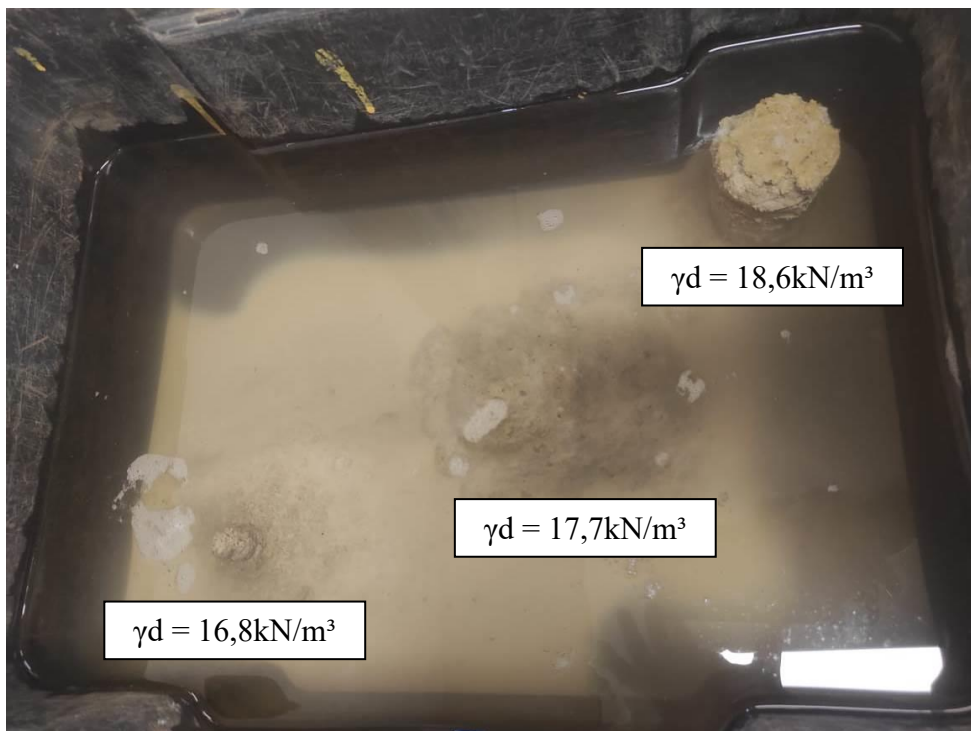


Figura 4.12 - Imersão dos CPs de solo natural antes do ensaio de RCS.

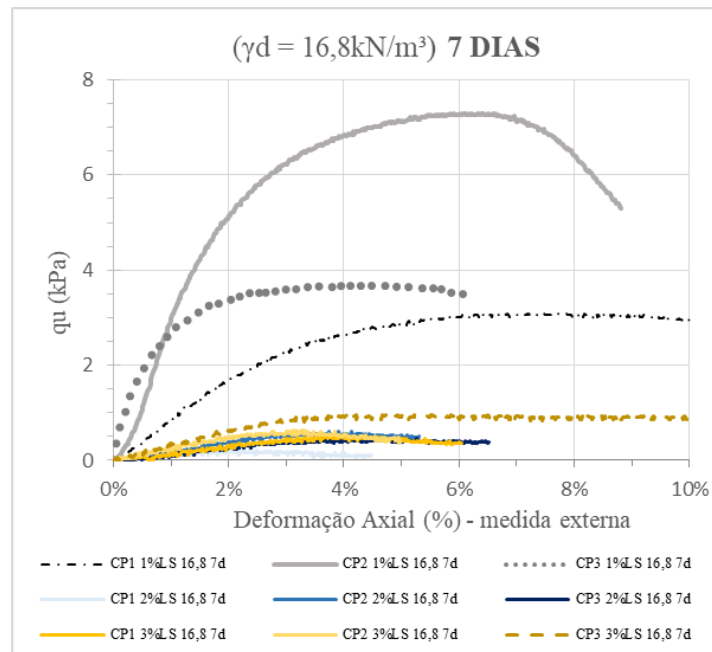
Uma vez que os corpos de prova de solo natural não resistiram ao processo de imersão de 4h que antecede o ensaio (conforme recomendações da NBR 12025), pode-se considerar que a resistência é zero para este ensaio.

As Figura 4.13 a Figura 4.15 apresentam as curvas de tensão (kPa) dos ensaios de RCS em corpos de prova moldados com teores de 1%, 2% e 3% de LS, para os três pesos específicos aparentes secos (16,8; 17,7 e 18,6kN/m³) e para dois períodos de cura (7 e 28 dias).

O processo de imersão que antecedeu a ruptura dos CPs foi realizado considerando 4h de imersão, conforme a NBR 12025 (ABNT, 2012). No entanto, este pode não ter sido um período suficiente para suprimir totalmente os efeitos da sucção sobre os resultados de resistência deste ensaio. Além disto, as medidas de deformação axial durante a execução do ensaio foram obtidas somente externamente, na prensa, através de um transdutor de deslocamento tipo LVDT.

Os corpos de prova moldados com os teores de 1% 2% e 3% LS para o $\gamma_d = 18,6\text{kN/m}^3$, e curados por 7 dias não resistiram ao processo de imersão. Dessa forma, a Figura 4.15 apresenta apenas as curvas relativas aos CPs curados por 28 dias.

Por fim, no Anexo B encontram-se as tabelas com todos os resultados de γ_d e RCS, e a análise de aceitação por variância e desvio padrão, para todos os corpos de prova ensaiados.



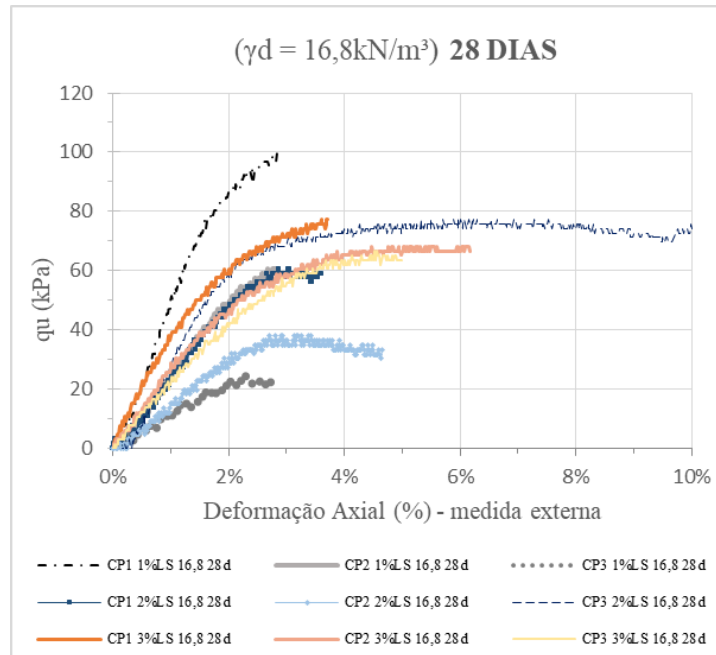
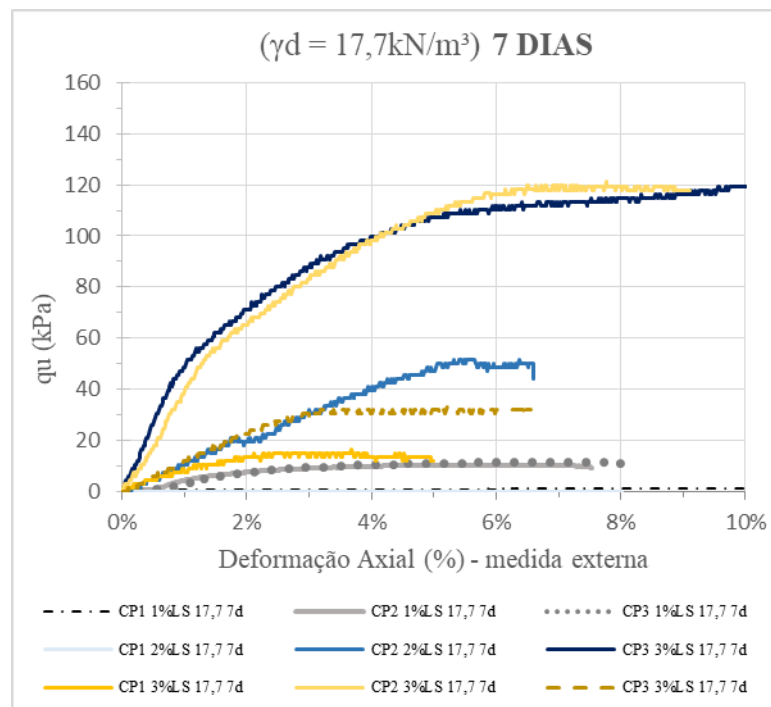


Figura 4.13 - Curvas de Tensão para os CPs moldados com o $\gamma_d = 16,8 \text{ kN/m}^3$ e curados por 7 e 28 dias, respectivamente.



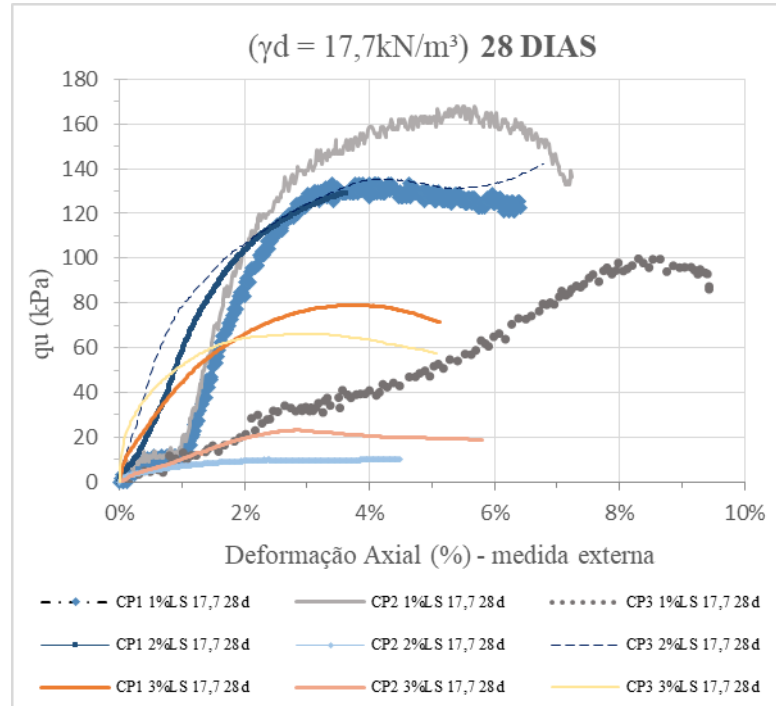


Figura 4.14 - Curvas de Tensão para os CPs moldados com o $\gamma_d = 17,7 \text{ kN/m}^3$ e curados por 7 e 28 dias, respectivamente.

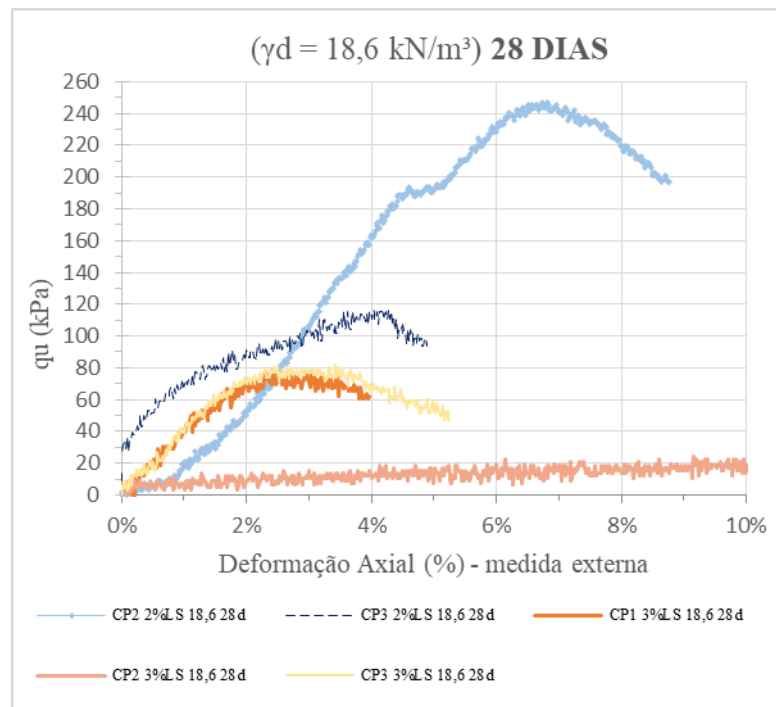


Figura 4.15 - Curvas de Tensão para os CPs moldados com o $\gamma_d = 18,6 \text{ kN/m}^3$ e curados por 28 dias.

Embora os corpos de prova utilizados no ensaio de RCS terem passado nos critérios de aprovação da moldagem, indicados anteriormente, os resultados do ensaio apresentaram dispersão. Esta possivelmente foi provocada devido ao processo de preparação e moldagem

individual dos corpos de prova, conforme anteriormente citado no item 3.1 sobre fatores de ruído, o qual pode não ter possibilitado total uniformização de todas as misturas de solo + LS ocasionando esta variabilidade nos resultados de resistência. Ainda assim, os resultados passaram por critério de aprovação com base no método estatístico do desvio padrão, que consiste no cálculo da média, desvio médio, variância, desvio padrão e o teste de aceitação, onde são aceitos os resultados que possuem desvio médio menor ou igual ao desvio padrão.

Apesar disto, os resultados de RCS indicaram um ganho de resistência proporcionado pelo melhoramento do solo através da inserção do LS. Autores como Vinod *et al.* (2010), Chen *et al.* (2015), Ta'negonbadi *et al.* (2017), Panditharadhya *et al.* (2017), Li *et al.* (2019) dentre outros, mostraram em suas pesquisas que a adição do lignosulfonato de cálcio promove ganho de resistência, em média de 25%, e este ganho deve-se principalmente através do aumento da coesão aparente – não necessariamente através de mudanças no ângulo de atrito da mistura.

Pode-se identificar, portanto, que os corpos de prova curados em 7 dias apresentaram valores médios de resistência inferiores aos dos corpos de prova curados por 28 dias.

Além disto, percebeu-se que os CPs curados por 7 dias não resistiram muito bem ao processo de imersão, principalmente quando compactados com o peso específico aparente seco maior (18,6kN/m³). O mesmo também foi notado para os corpos de prova com teores de 1% e 2% de lignosulfonato de cálcio, para os três pesos específicos secos (16,8; 17,7 e 18,6kN/m³).

4.2.1 Efeito do Peso Específico Seco Máximo, do Teor de LS e do Tempo de Cura

A fim de identificar a influência das três variáveis (γ_d , %LS e tempo de cura) sobre os resultados de resistência à compressão simples e também sobre o melhoramento do comportamento dispersivo do material (analisado neste ensaio através da integridade do corpo de prova após o processo de imersão), analisaram-se os efeitos das variáveis em três formas: peso específico seco + tempo de cura; peso específico seco + teor de LS; teor de LS + tempo de cura.

O efeito do peso específico aparente seco (γ_d) e do tempo de cura sobre a resistência à compressão simples (RCS) dos corpos de prova pode ser analisado através da Figura 4.16. A influência do γ_d e do teor de lignosulfonato de cálcio (LS) sobre a RCS dos corpos de prova

está apresentada na Figura 4.17, e o efeito do teor de LS e do tempo de cura sobre a RCS está na Figura 4.18.

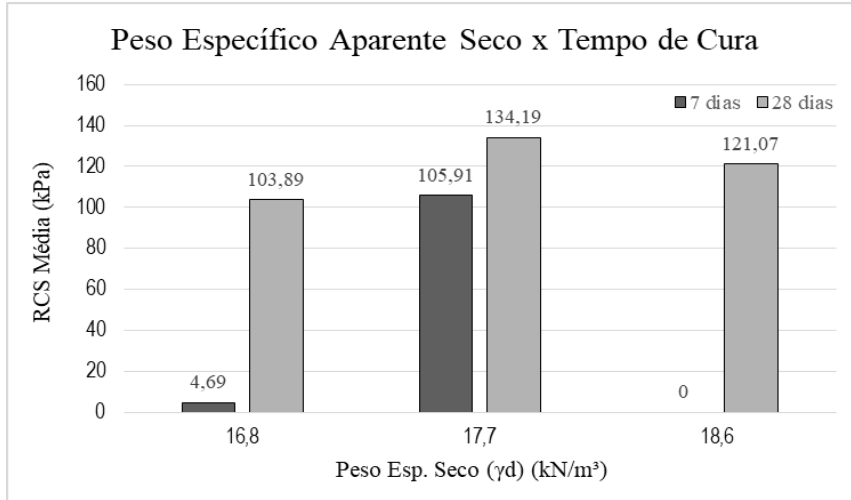


Figura 4.16 - Efeito do γ_d e do tempo de cura sobre a RCS.

Através da Figura 4.16 pode-se perceber que, conforme citado no item 4.2, no geral, o tempo de cura de 7 dias não apresentou bons resultados de resistência, e o peso específico seco intermediário (17,7kN/m³) resultou em ganhos consideráveis de resistência com a adição do lignosulfonato.

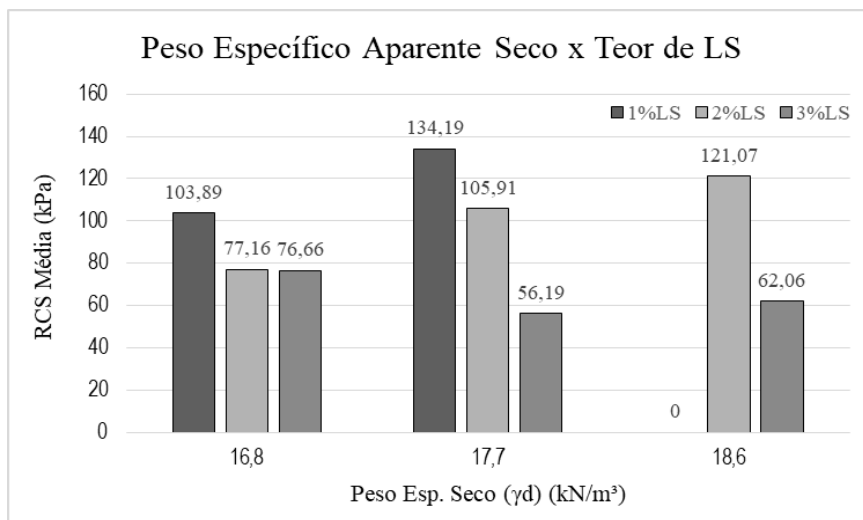


Figura 4.17 - Efeito do γ_d e do teor de LS sobre a RCS.

Na Figura 4.17 fica evidente que o melhor ganho de resistência (134,19kPa) foi encontrado para o teor de 1% de LS com $\gamma_d = 17,7$ kN/m³. Além disto, o peso específico seco menor

(16,8kN/m³) resultou em valores de RCS bem próximos para os três teores de LS e o peso específico seco maior (18,6kN/m³) não obteve resultados de RCS para o teor de 1% de LS.

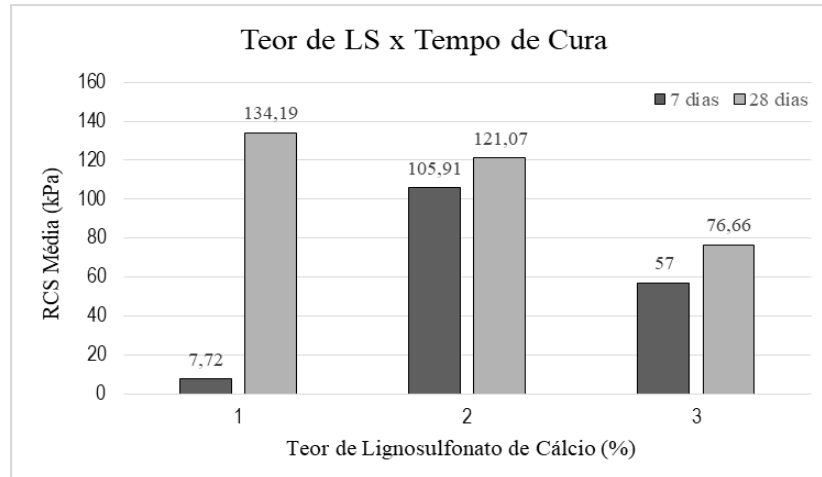


Figura 4.18 - Efeito do teor de LS e do tempo de cura sobre a RCS.

Conforme ilustrado na Figura 4.18 o tempo de cura de 28 dias foi o que apresentou melhores e mais estáveis resultados de RCS, sendo o teor de 2% de LS o que obteve resistência similar para 7 e 28 dias de cura.

A Figura 4.19 apresenta o gráfico de Pareto dos efeitos padronizados, realizado com o auxílio do software Minitab, indicando que a variável tempo de cura é a que causa maior influência nos resultados de resistência à compressão simples, seguida do peso específico aparente seco das misturas. A tabela de análise de variância encontra-se no Anexo C.

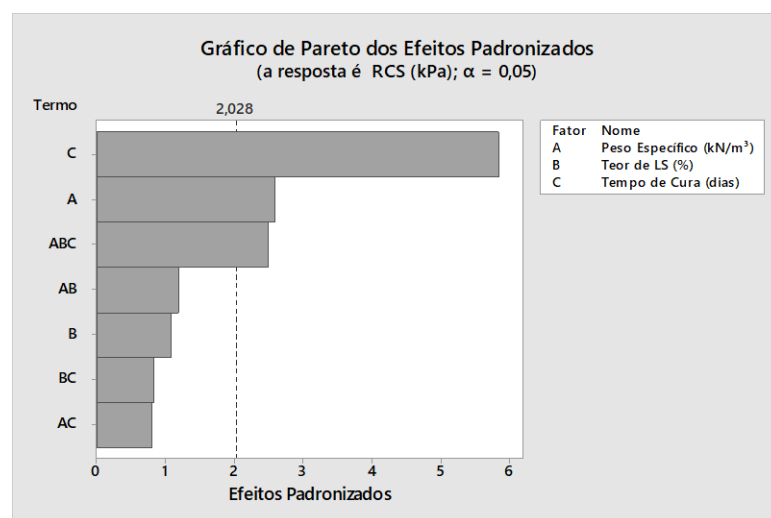


Figura 4.19 - Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados das variáveis sobre a RCS.

Além da análise dos efeitos das variáveis sobre a RCS, também se levou em consideração a integridade dos corpos de prova após o período de imersão de 4h que antecedia o ensaio. Neste caso, os corpos de prova que se mantiveram 100% íntegros foram os que continham 3% de lignosulfonato de cálcio. Apesar de não ter sido o teor de LS que apresentou os melhores valores no ensaio de RCS, os corpos de prova tratados com 3% obtiveram o comportamento mais estável tanto em termos de resistência quanto em integridade pós imersão, para ambos os tempos de cura de 7 e 28 dias.

Ainda com base nesta análise preliminar, pode-se identificar que tanto para ganhos de resistência quanto para melhoramento da dispersão, a variável mais influente é o tempo de cura. CPs curados por 28 dias apresentavam maiores ganhos de RCS e de resistência à dispersar quando imersos.

O peso específico aparente seco fica em segundo lugar, uma vez que pesos específicos mais baixos resultam em menores ganhos de RCS, porém fornecem maior teor de umidade, possibilitando maior troca catiônica entre o LS e os argilominerais, maior coesão e consequente melhora no comportamento dispersivo.

Dessa forma, definiram-se os parâmetros deste solo para melhoramento da dispersibilidade como: 3% de lignosulfonato de cálcio, $\gamma_d = 16,8\text{kN/m}^3$, umidade ótima de 18,5% e tempo de cura de 28 dias.

4.3 CARACTERIZAÇÃO DA DISPERSIBILIDADE DO SOLO MELHORADO

4.3.1 Crumb Test

O ensaio de torrão foi novamente realizado, agora com o solo melhorado com a mistura que apresentou melhores resultados em termos de resistência, a fim identificar se houve reversão do comportamento dispersivo do material. As amostras foram tratadas com 3% de lignosulfonato de cálcio, compactadas na umidade ótima de 18,5% atingindo o peso específico aparente seco de $16,8\text{kN/m}^3$ e curadas por 28 dias.

Assim como no item 4.1, o ensaio foi executado conforme as recomendações da NBR 13601 (ABNT, 2020a), inserindo torrões de 6 a 10mm de solo em béquers com 150ml de água destilada, e verificando alterações ao longo de 1h. A Figura 4.20 apresenta o início do ensaio e a Figura 4.21 o final do ensaio.

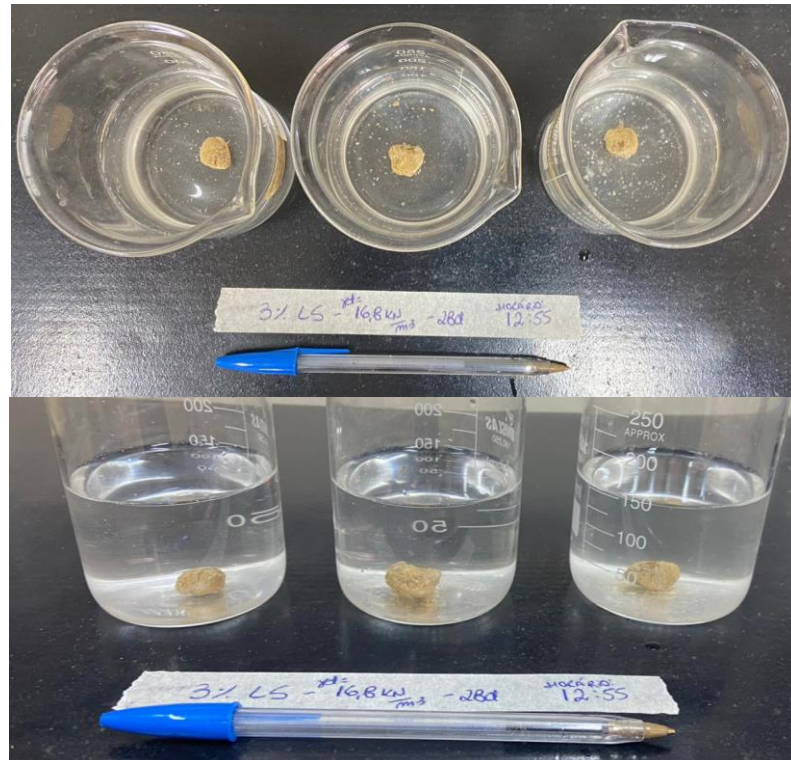


Figura 4.20 - Início do Crumb Test para Solo + 3%LS, $\gamma_d = 16,8\text{kN/m}^3$ curado por 28 dias.

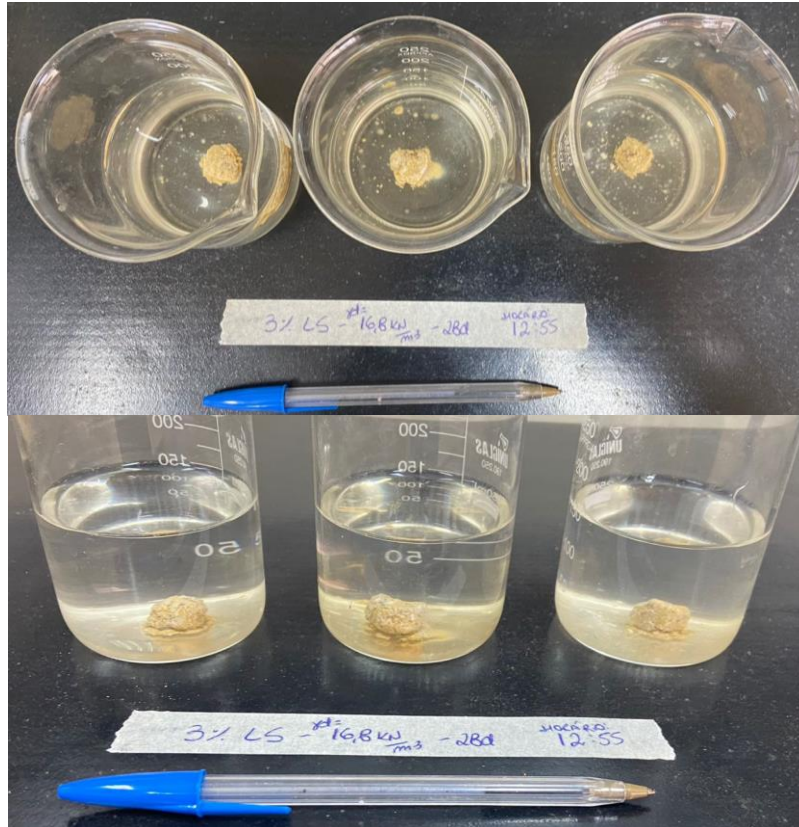


Figura 4.21 - Final do Crumb Test (após 1h de ensaio) para Solo + 3%LS, $\gamma_d = 16,8\text{kN/m}^3$ curado por 28 dias. A análise visual caracterizou o material como grau de dispersão 1 – não dispersivo, onde o torrão pode absorver água porém não se observa sinal de turvação no líquido devido à presença de coloides em suspensão.

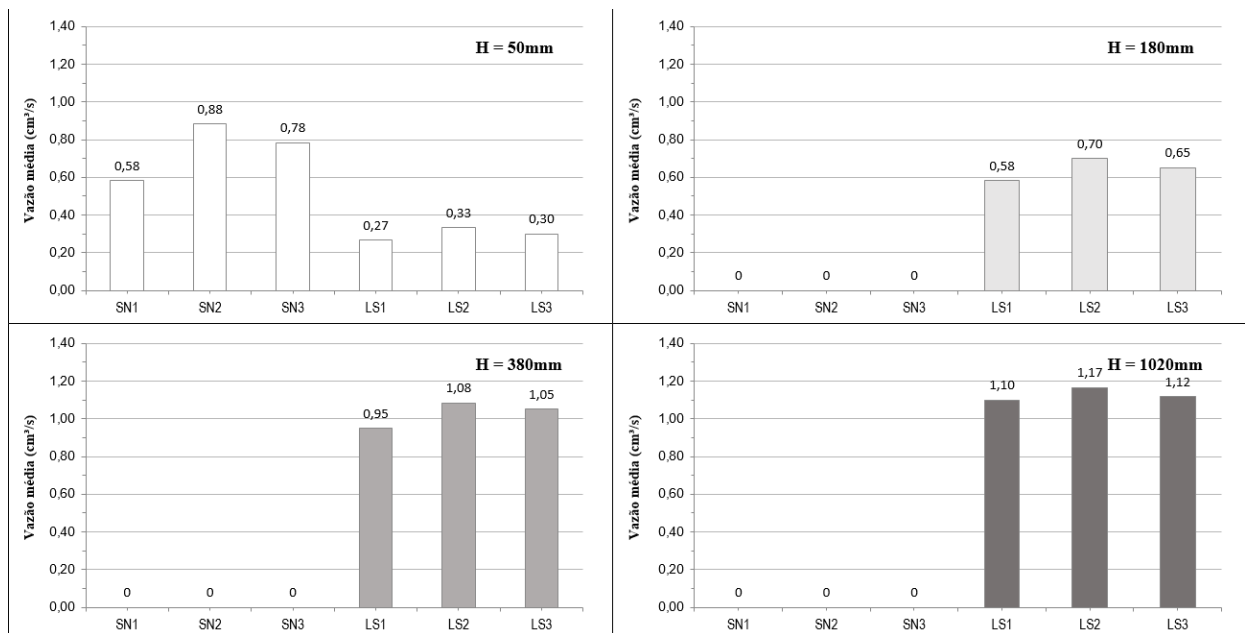
4.3.2 Pinhole Test

A fim de classificar o solo natural e o solo melhorado com o lignosulfonato de cálcio quanto a sua dispersibilidade, e identificar se houve reversão deste comportamento para a melhor mistura, triplicatas de amostras de solo natural e de solo+3%LS curada por 28 dias, foram submetidas ao Pinhole Test (compactadas no menor peso específico aparente seco de $16,8\text{ kN/m}^3$ e moldadas com teor de umidade de 18,5%). Desse modo, os resultados do ensaio são expostos na Tabela 4.4 e na Figura 4.22. Sendo que o primeiro apresenta a classificação final do ensaio (segundo o diagrama da Figura 2.12) e a turbidez do efluente ao final de cada uma das cargas hidráulicas e a segunda expõe as vazões médias registradas nas amostras ensaiadas para cada carga hidráulica (H) diferente. A vazão média foi determinada pelo quociente entre o volume de água contido no béquer, após o fluxo induzido por cada carga hidráulica, pelo tempo correspondente a esse fluxo (5 minutos).

Tabela 4.4 - Resultados do Pinhole Test

Amostra	Cor do Efluente (turbidez)				Classificação
	H = 50mm	H = 180mm	H = 380 mm	H = 1020 mm	
SN1	levemente escuro	-	-	-	D2 a ND4
SN2	levemente escuro	-	-	-	D2 a ND4
SN3	levemente escuro	-	-	-	D2 a ND4
LS1	claro	claro	claro	claro	ND1 - Não dispersivo
LS2	claro	claro	claro	claro	ND1 - Não dispersivo
LS3	claro	claro	claro	claro	ND1 - Não dispersivo

Amostra	Vazão média (5min) (cm ³ /s)				Classificação
	H = 50mm	H = 180mm	H = 380 mm	H = 1020 mm	
SN1	0,58	-	-	-	D2 a ND4
SN2	0,88	-	-	-	D2 a ND4
SN3	0,78	-	-	-	D2 a ND4
LS1	0,27	0,58	0,95	1,10	ND1 - Não dispersivo
LS2	0,33	0,70	1,08	1,17	ND1 - Não dispersivo
LS3	0,30	0,65	1,05	1,12	ND1 - Não dispersivo

Figura 4.22 - Resultados de vazão média (cm³/s) no Pinhole Test.

A Figura 4.23 apresenta algumas imagens dos corpos de prova de solo natural após o Pinhole Test, identificando que houve alargamento no furo realizado no início do ensaio com a agulha hipodérmica de 1mm. Em comparativo observa-se na Figura 4.24 um CP de solo tratado com 3% de LS (compactado com peso específico mínimo de 16,8kN/m³ umidade ótima de 18,5% e curado por 28 dias) após a execução do mesmo ensaio, sob carga hidráulica de 1020mm e não apresentando carreamento de partículas nem alterações no furo inicial.



Figura 4.23 - Corpos de prova de solo natural $\gamma = 16,8\text{kN/m}^3$, após Pinhole Test.



Figura 4.24 - CP tratado com 3%LS $\gamma = 16,8\text{kN/m}^3$ e curado por 28 dias, após Pinhole Test.

A Figura 4.25 contém imagens da coloração dos efluentes provenientes do Pinhole Test, sendo o a) obtido para os corpos de prova de solo natural e o b) para os corpos de prova melhorados com 3% de lignosulfonato de cálcio.

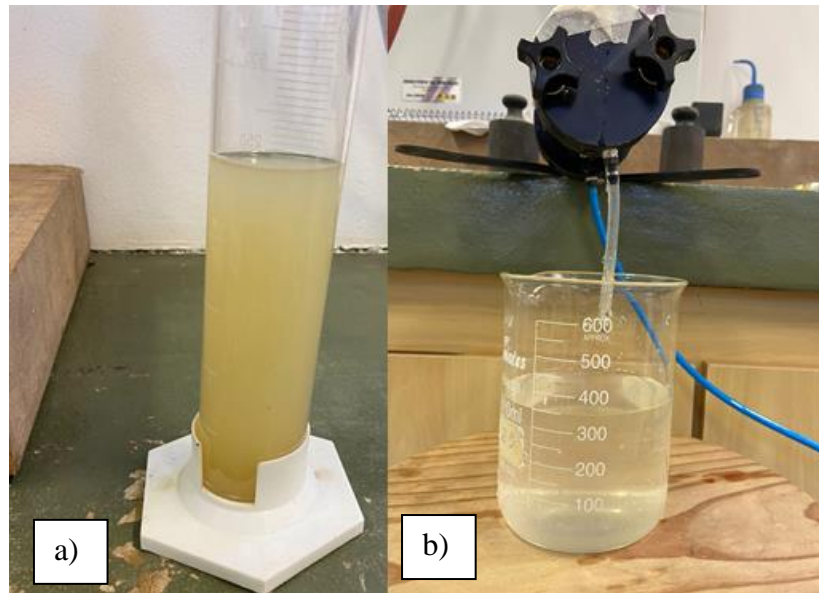


Figura 4.25 - Coloração do efluente durante o Pinhole Test. a) solo natural b) solo tratado com 3%LS.

A partir dos resultados apresentados nas Figura 4.23 a Figura 4.25, em conjunto com o diagrama contido na norma NBR 14114 (ABNT, 1998, p. 8), foi possível classificar as amostras ensaiadas quanto à dispersibilidade e expor o resultado final na Tabela 4.4. Nota-se que, para as amostras melhoradas com lignosulfonato de cálcio, independente da carga hidráulica aplicada, a cor do efluente era clara. Isso indica que não houve desprendimento suficiente, com conseqüente carreamento, de partículas finas do solo com potencial para influenciar na turbidez do efluente. Portanto, o tamanho do furo mantinha-se praticamente inalterado ao longo do ensaio, resultando em vazões médias relativamente baixas para todas as cargas hidráulicas impostas. Logo, também sob essa perspectiva, pode-se considerar que o teor de 3% de LS foi efetivo para reverter a dispersibilidade, uma vez que modificou o comportamento do solo de dispersivo (D2) a moderadamente dispersivo (ND4) para não dispersivo (ND1).

4.3.3 Sedimentometria Comparativa

Foram realizados ensaios de sedimentometria comparativa, conforme a NBR 13602 (ABNT, 2020b) nas amostras tratadas com 3% de LS e curadas por 28 dias. A Figura 4.26 a seguir

apresenta as curvas granulométricas obtidas no ensaio considerando uma amostra de 120g ensaiada com o uso de defloculante, conforme a NBR 7181 (ABNT, 2018), e uma amostra de 25g ensaiada com o uso de água destilada. O valor obtido para a PD do solo tratado foi de 22,22%, e conforme a Tabela 2.2 enquadrando o solo tratado com 3% de LS como não dispersivo.

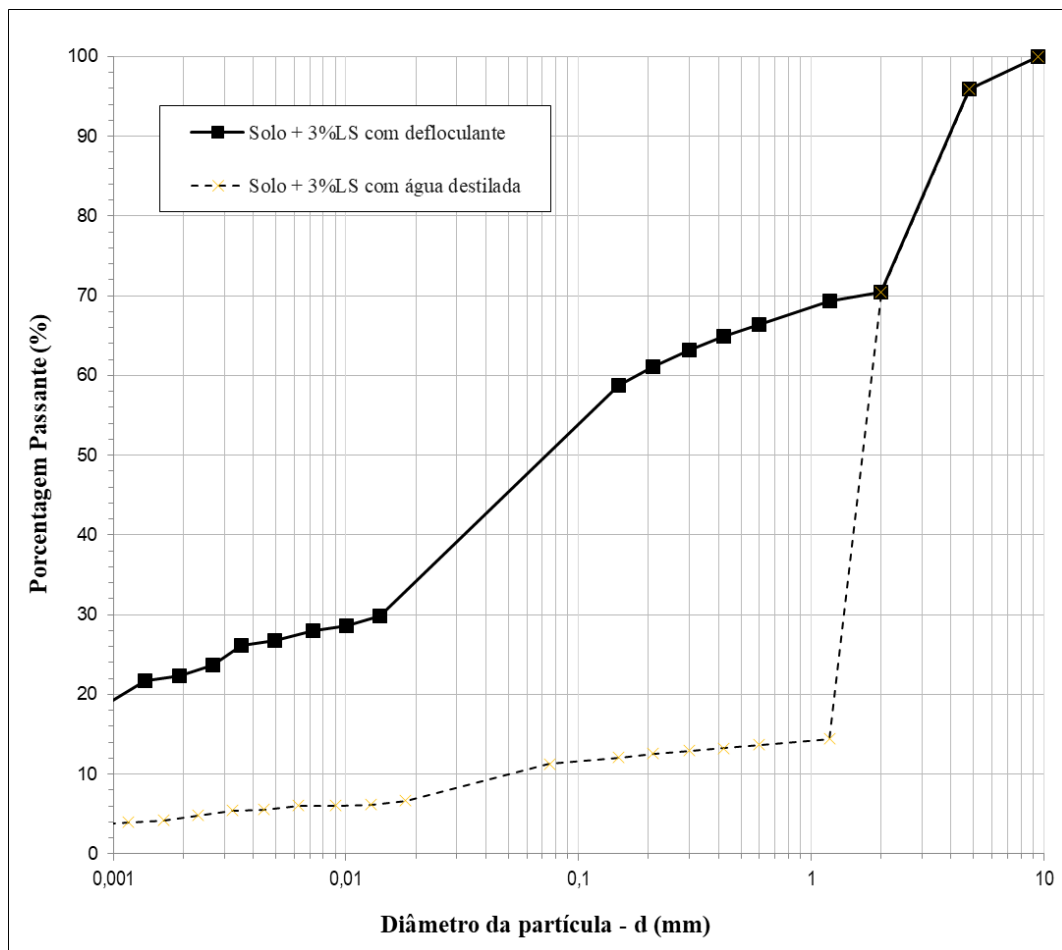


Figura 4.26 - Curvas granulométricas do ensaio de SCS das amostras de Solo + 3%LS.

4.4 ENSAIOS DE DURABILIDADE POR MOLHAGEM E SECAGEM

Inicialmente o ensaio foi realizado segundo as recomendações da NBR 13554 (ABNT, 2012b). A Figura 4.27 apresenta o CP logo após a cura de 28 dias, os quais exibiam alguns fungos superficiais (já relatados por outros autores devido às condições de umidade e temperatura de cura, uma vez que o lignosulfonato de cálcio é considerado um aditivo biodegradável), já a Figura 4.28 mostra os CPs após o processo de imersão de 5h.



Figura 4.27 - Corpo de prova de solo tratado com 3% de LS, compactado com $\gamma_d = 16,8\text{kN/m}^3$ e curado por 28 dias.



Figura 4.28 - Corpos de prova de solo tratado com 3% de LS, após imersão de 5h no primeiro ciclo do ensaio de durabilidade.

A Figura 4.29 exibe os CPs com bastante retração após o processo de secagem durante 42h em estufa a 71°C. Seguente à secagem, os corpos de prova foram escovados e posteriormente prosseguiriam para mais uma etapa de 5h de imersão. No entanto, não resistiram, conforme apresentado na Figura 4.30.



Figura 4.29 - Corpos de prova após secagem de 42h em estufa a 71°C, no primeiro ciclo do ensaio de durabilidade.



Figura 4.30 - Corpos de prova durante a imersão, no segundo ciclo do ensaio de durabilidade.

Este comportamento já era esperado, uma vez que o processo de secagem em estufa naturalmente é agressivo para materiais argilosos que tendem a apresentar trincas de contração com a secagem e acabam não resistindo à posterior imersão, desagregando devido à expulsão de ar. Já para o caso de solos sódicos, a etapa de imersão em água é ainda mais

agressiva, pois há, além de uma tendência dispersiva entre os íons monovalentes, há hidratação dos cátions livres como o Na^+ , o Mg^+ e o Ca^{++} .

Assim, a fim de simular uma condição mais próxima da realidade de variações de secagem e imersão, optou-se substituir a etapa de secagem em estufa a 71° por secagem ao ar (em um local com iluminação e ventilação diretas) pelo mesmo período de 42h. Neste processo os corpos de prova ainda retraíram consideravelmente no primeiro ciclo de secagem, conforme ilustrado na Figura 4.31, porém nos demais ciclos a retração foi reduzida e os espécies resistiram até 5 ciclos dos 6 recomendados pela norma.



Figura 4.31 - Corpos de prova após secagem de 42h ao ar, no primeiro ciclo do ensaio de durabilidade.

Ta'negonbadi e Noorzad (2017) também haviam observado em seu estudo uma diminuição de resistência à compressão simples em corpos de prova tratados com LS após ciclos de molhagem e secagem. Os autores atribuíram o fato à redução do entrelaçamento das partículas do solo, uma vez que trincas desenvolviam-se progressivamente na superfície dos corpos de prova durante o processo de secagem, e aumentavam a expansão do mesmo durante o umedecimento, resultando em uma alteração de estrutura do material.

Os resultados relativos ao ensaio de durabilidade são apresentados em termos da perda de massa acumulada por ciclo (PMA) e perda de massa individual por ciclo (PMI) nas Figura 4.32 e Figura 4.33, respectivamente. O ensaio foi executado com amostras de solo tratadas com 3% LS, compactadas no menor peso específico de $16,8\text{kN/m}^3$ e na umidade ótima de 18,5%, pois considerou-se esta a melhor mistura em termos de resistência e melhoramento do comportamento dispersivo.

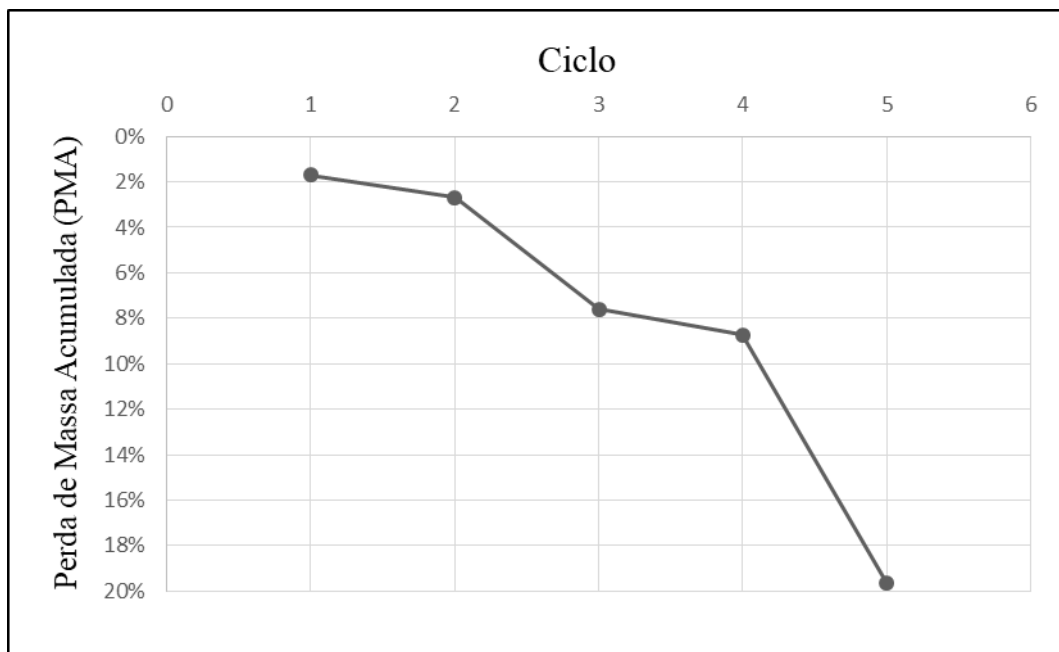


Figura 4.32 - Perda de Massa Acumulada (PMA) por ciclo no ensaio de durabilidade.

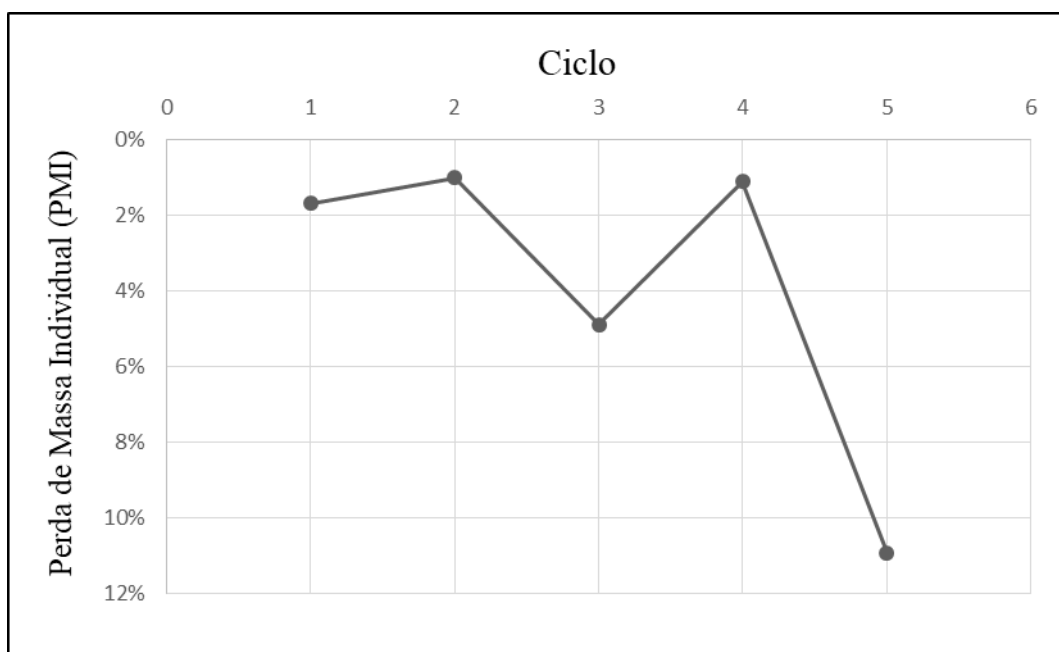


Figura 4.33 - Perda de Massa Individual (PMI) por ciclo no ensaio de durabilidade.

4.5 ENSAIO DE PULSO ULTRASSÔNICO

A fim de obter uma estimativa do módulo cisalhante a pequeníssimas deformações (G0) foram realizados ensaios de pulso ultrassônico com o instrumento PundiLab(+), os quais envolviam a medição dos tempos de propagação de ondas de compressão e de cisalhamento pelos corpos de prova cilíndricos de 5cm de diâmetro por 10cm de altura de solo natural e de

solo+3%LS curado por 28 dias, ambos compactados no menor peso específico aparente seco ($16\text{k},8\text{N/m}^3$) e umidade ótima (18,5%), de acordo com os parâmetros da melhor mistura em termos de resistência e melhoramento da dispersibilidade.

O procedimento de ensaio tem início após o término do período de cura dos corpos de prova, e após a imersão destes durante 4h a fim de reduzir efeitos de sucção. Primeiramente lia-se o tempo do deslocamento da onda de compressão através corpo de prova (t_p) apresentado nas Figura 4.34 e Figura 4.36 e, em seguida, o tempo de deslocamento da onda cisalhante (t_s) indicado na Figura 4.35 e Figura 4.37. Para a realização de cada leitura, a interface entre o corpo de prova e o transdutor era preenchida com um gel específico que auxiliava a transmissão e leitura do sinal. As respectivas velocidades (V_p e V_s) eram determinadas a partir da relação entre a altura média de cada corpo de prova e o tempo aferido. Eram feitas, ao menos, três medições correspondentes ao tempo t_p , sendo esse tido como a média das três, e mais de dez relativas ao tempo t_s . A leitura do t_p dava-se diretamente no instrumento enquanto que a leitura do t_s era realizada na interface computacional do PundiLab(+), já que devia ser devidamente interpretada. De maneira geral, o t_s é superior ao t_p .



Figura 4.34 - Leitura do tempo t_p correspondente à amostra de solo natural.

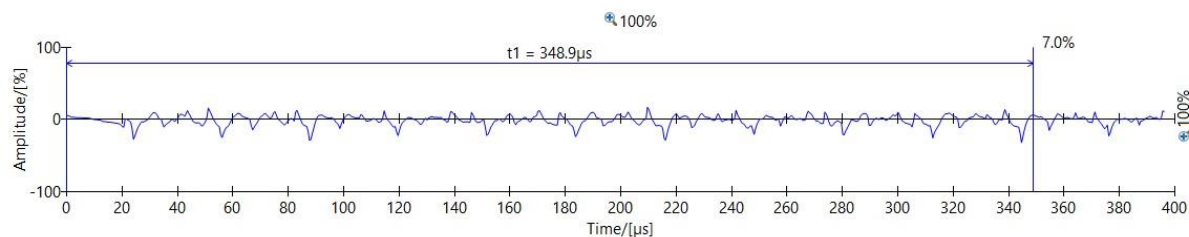


Figura 4.35 - Leitura do tempo t_s correspondente à amostra de solo natural.



Figura 4.36 - Leitura do tempo t_p correspondente à amostra de solo tratada com 3% de LS.

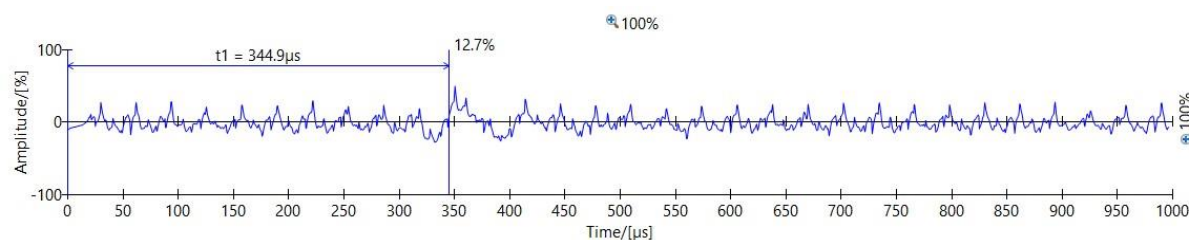


Figura 4.37 - Leitura do tempo t_s correspondente à amostra de solo tratada com 3% de LS.

Como é possível identificar pelas imagens, a leitura das ondas foi muito difícil de ser realizada devido à baixa rigidez do material (tanto natural quanto a amostra tratada com LS). Apesar disso, estimou-se valores de G_0 na ordem de 54MPa para o solo natural e de 56MPa para o solo tratado com 3% de lignosulfonato de cálcio e curado por 28 dias.

4.6 ENSAIOS DE MICROESTRUTURA

A fim de avaliar alterações na microestrutura do solo devido à adição do lignosulfonato de cálcio, realizaram-se ensaios de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e difratometria de raios-X (DRX). As análises de MEV foram executadas em três amostras distintas correspondentes a (i) solo natural, (ii) lignosulfonato de cálcio (LS) e (iii) solo + 3%LS. Já para o DRX, foram utilizadas apenas as amostras (i) e (iii), buscando identificar mudanças na mineralogia das misturas.

As amostras (i) e (iii) para os dois ensaios correspondiam ao menor peso específico aparente seco ($16,8 \text{ kN/m}^3$), sendo moldadas com teor de umidade de 18,5% e, no caso da amostra (iii), curada por 28 dias (melhor resultado para reversão da dispersibilidade). Após o tempo de cura, as amostras foram levemente fragmentadas e secas em estufa a 60°C , e para o ensaio DRX as amostras foram destorroadas e passadas na peneira 42 malha $0,355\text{mm}$ a fim de retirar as partículas maiores, que poderiam atrapalhar o sinal para identificação dos argilominerais.

4.6.1 Microscopia Eletrônica de Varredura

Como já referido, os ensaios de microscopia eletrônica de varredura (MEV) foram realizados nas amostras (i) solo natural, (ii) lignosulfonato de cálcio (LS) e (iii) solo + 3%LS. Ao fim do tempo de cura, as amostras eram secas a temperatura ambiente durante um dia e prosseguiram para os procedimentos que envolviam o ensaio, os quais foram realizados em um microscópio eletrônico de varredura, em modo alto vácuo, Jeol, JSM - 6610LV, com microsonda de EDS. De modo a aumentar a nitidez das imagens, as amostras eram metalizadas com íons de carbono antes de prosseguirem ao microscópio. Através dos resultados de MEV estimava-se avaliar de forma visual eventuais transformações na morfologia da microestrutura do solo em decorrência da adição do lignosulfonato de cálcio.

A Figura 4.38 apresenta a preparação e aplicação de alto vácuo nas amostras.

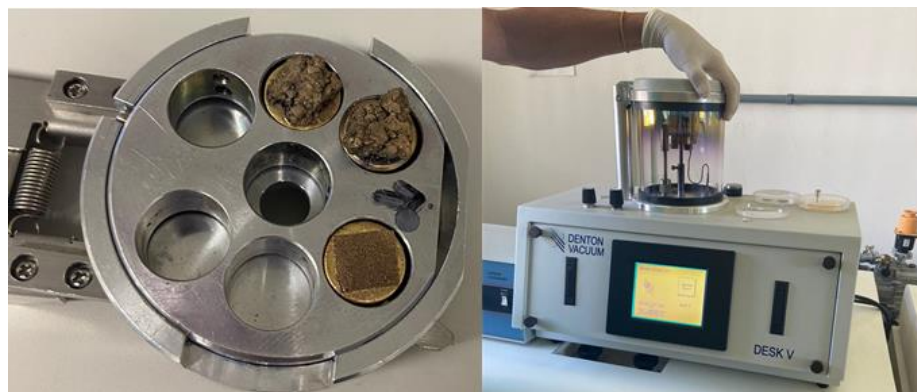


Figura 4.38 - Preparação das amostras para o MEV e aplicação de alto vácuo.

A Figura 4.39 exibe a imagem MEV do solo natural, não tratado, em níveis de ampliação de 1500x e 4000x. Como pode ser visto nesta imagem, a estrutura do solo é descontínua e levemente escamosa, apresentando partículas de diversos tamanhos e grande número de poros também de variados tamanho.

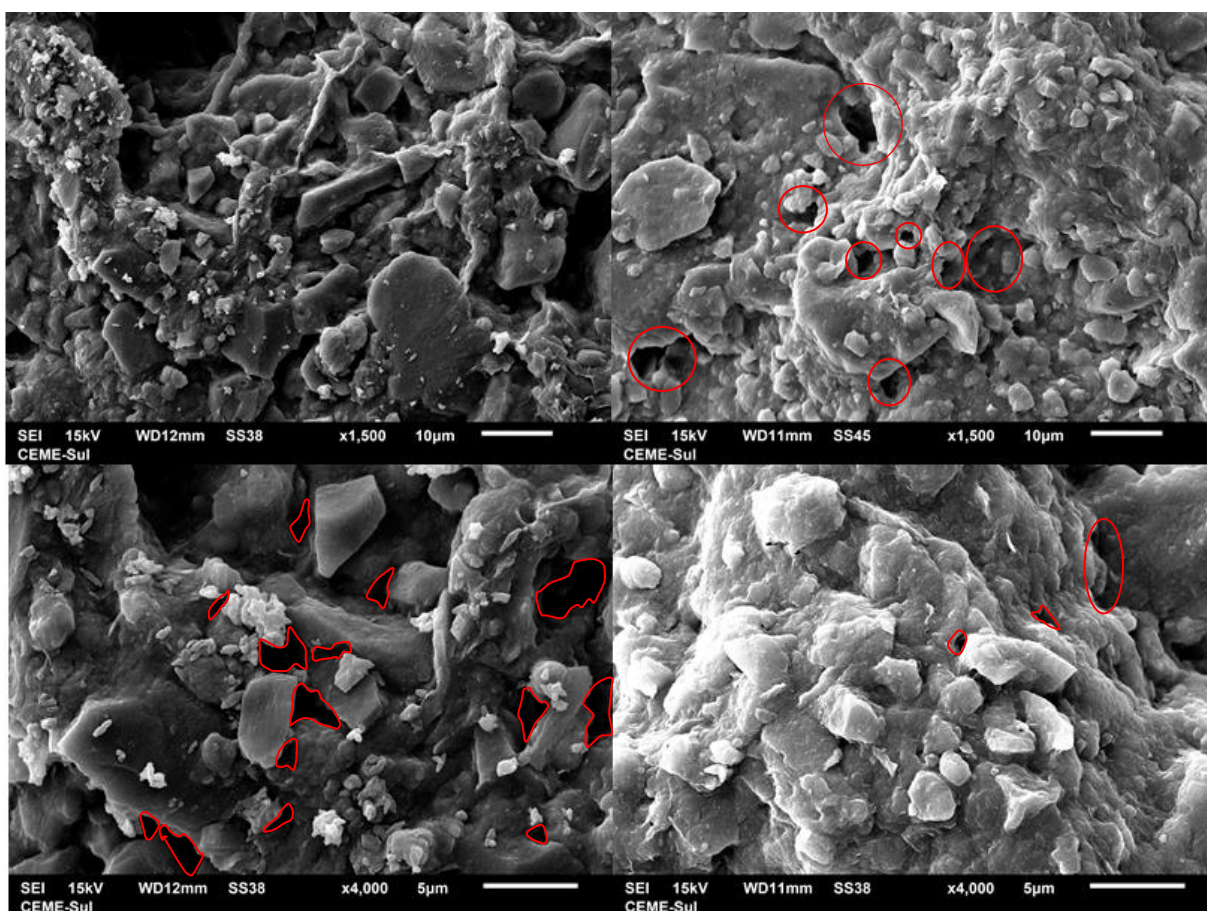


Figura 4.39 - Imagem MEV da amostra de solo natural compactada $\gamma_d = 16,8 \text{ kN/m}^3$, em níveis de ampliação de 1500x e 4000x, respectivamente. Poros circulado em vermelho.

A partir da imagem MEV do lignosulfonato de cálcio, em níveis de ampliação de 500x, 1500x e 4000x, mostrada na Figura 4.40, fica evidente que as partículas de LS são laminadas e afiadas com grande tamanho.

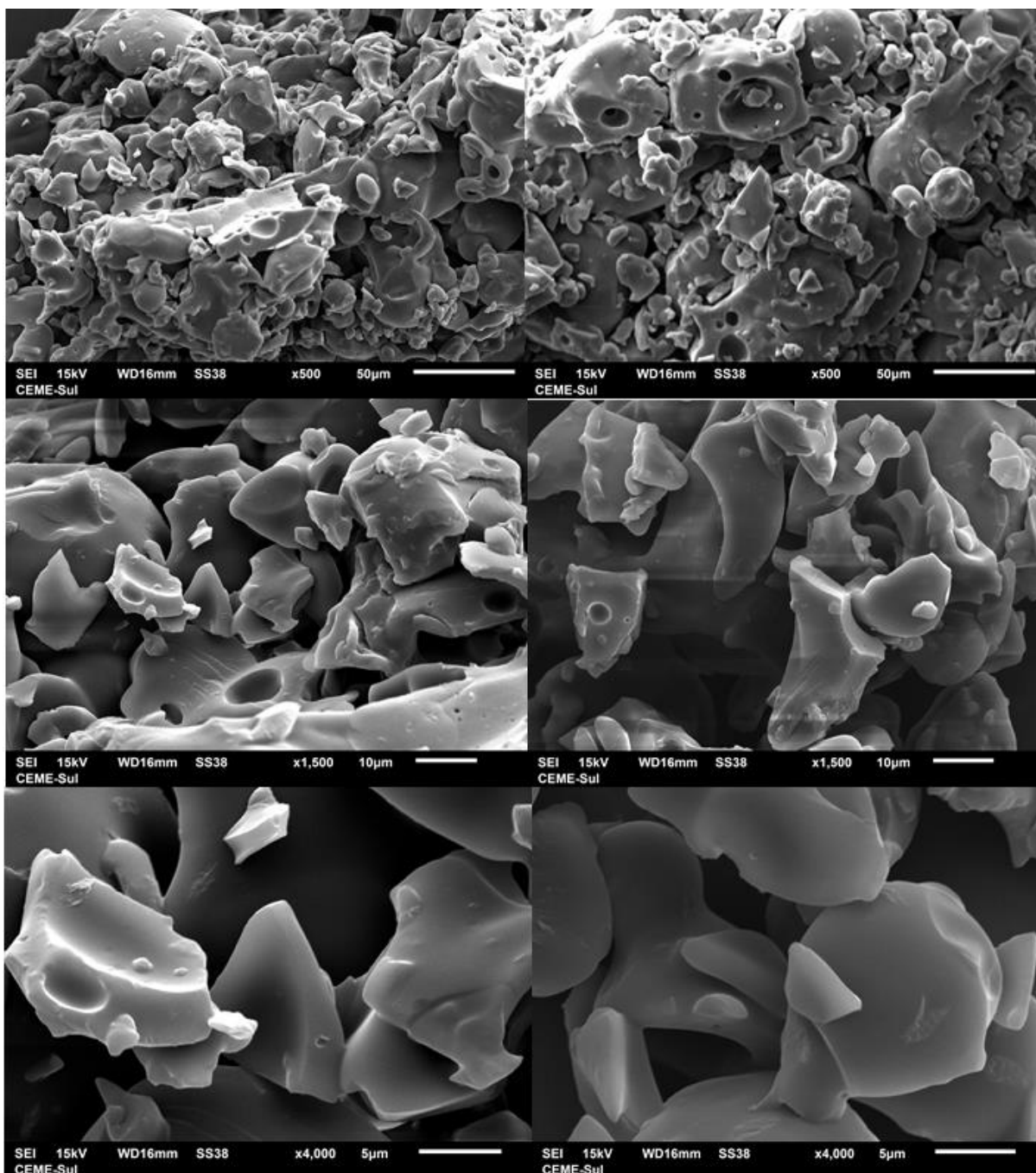


Figura 4.40 - Imagens MEV do lignosulfonato de cálcio (LS) utilizado na pesquisa, em níveis de ampliação de 500x 1500x e 4000x, respectivamente.

A Figura 4.41 mostra a imagem MEV de um solo tratado com 3% de LS após cura de 28 dias. A estrutura do solo mudou devido ao desenvolvimento da reação eletrostática entre a mistura

solo-água-LS. Comparando as Figura 4.39 e Figura 4.41 nota-se uma grande mudança na estrutura do solo. É óbvio que a estrutura do solo não tratado mudou de uma forma baseada em grãos para uma mistura mais agregada devido à reação eletrostática e aos aglomerados de grãos produzidos, além de apresentar menores quantidade de poros, ainda que poros de maior tamanho.

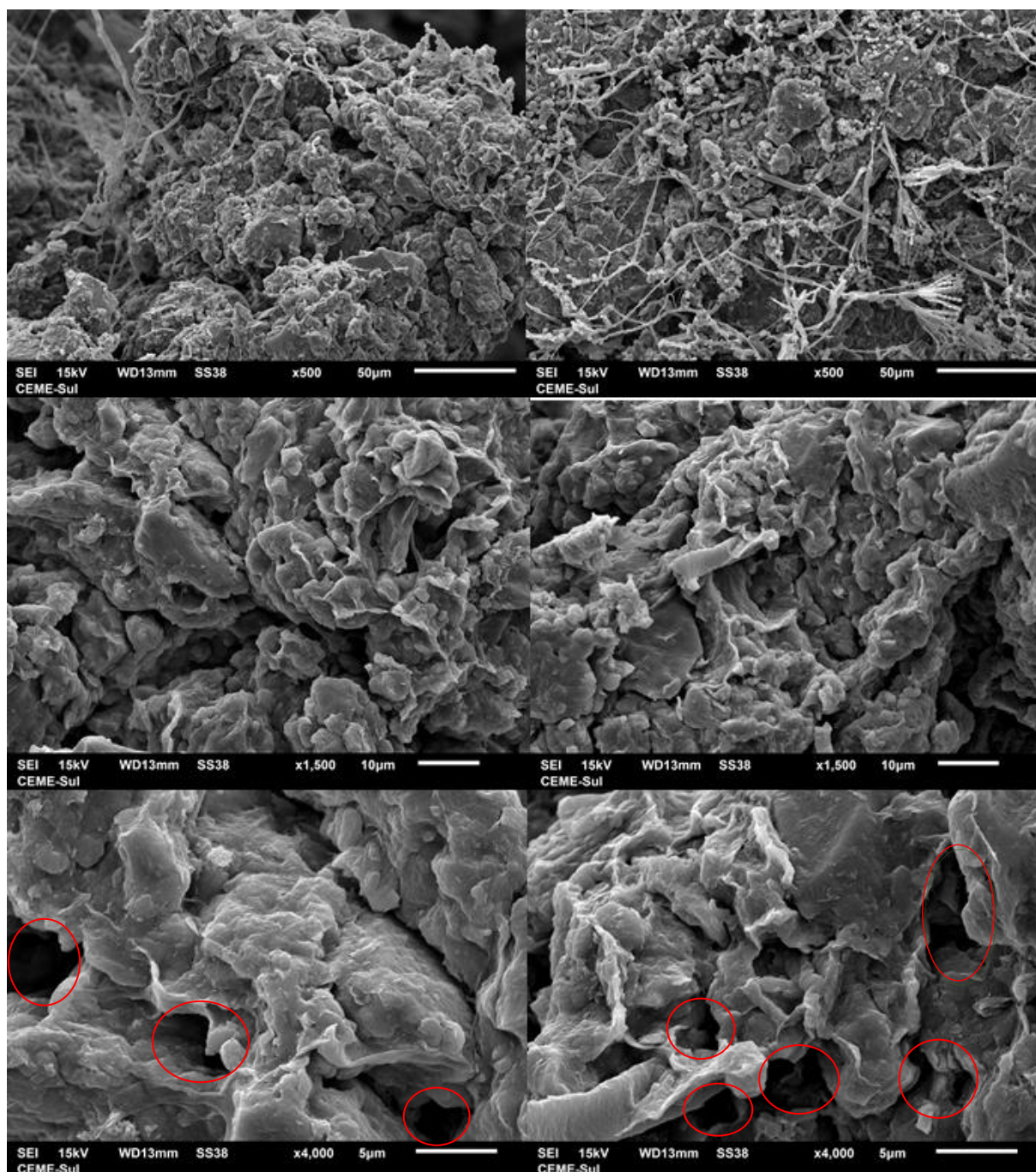


Figura 4.41 - Imagens MEV de amostras de solo tratado com 3% de LS, compactado com $\gamma_d = 16,8\text{kN/m}^3$ e curado por 28 dias, em níveis de ampliação de 500x 1500x e 4000x, respectivamente. Poros circulado em vermelho.

Os autores Alizagha *et al.* (2016) e Ta'negonbadi e Noorzad (2017) também identificaram em suas pesquisas resultados similares, e justificaram que estes estariam alinhados com o mecanismo de estabilização proposto por Vinod *et al.* (2010) para uma argila dispersiva estabilizada com lignosulfonato de cálcio. Com base na análise microquímica que os autores fizeram, quando a mistura de água + LS é adicionada à argila, a água se decompõe em hidroxila íons (OH⁻) e hidrogênio (H⁺). Então o LS é protonado por H⁺ e libera água, resultando em um composto carregado positivamente. Estes compostos de LS recém-criados e com cargas positivas neutralizam as cargas negativas na superfície dos argilominerais.

Esta neutralização promove uma redução na espessura da dupla camada dos argilominerais, atraindo-os uns para os outros, formando agregados estáveis. De fato, por esses processos, a estrutura do solo torna-se mais agregada, proporcionando um aumento nas propriedades de resistência do mesmo.

Conforme já citado anteriormente, e referido por Ta'negonbadi e Noorzad (2017), para entender as diferenças entre o mecanismo de estabilização do lignosulfonato de cálcio com solos granulares, destaca-se o estudo de Muttuvel (2008) para uma areia siltosa. Com base em sua análise experimental e MEV, o aumento de resistência em amostras de areia siltosa tratadas com LS foi atribuída ao aumento de coesão por cimentação. Amostras de solo não tratado não eram coesivas e todas as amostras tratadas foram compactadas com o mesmo peso específico aparente seco e mantidas sob mesmas condições de cura. Concluiu-se, portanto, que o lignosulfonato de cálcio atua como agente cimentante para unir as partículas, formando para uma estrutura mais estável e resistente. Com base nos dois mecanismos de estabilização descritos acima (agregação e cimentação), pode-se perceber que a diferença entre esses mecanismos é a troca de cátions que ocorrem no mecanismo de estabilização de solos argilosos por agregação.

4.6.2 Difractometria de Raios-X

Os ensaios de DRX buscavam avaliar a transformação na mineralogia do solo decorrente da adição empregada, bem como verificar a formação de algum composto ligante de natureza cristalina.

Ao fim do tempo de cura, as amostras foram secas a temperatura ambiente durante um dia, destorroadas até a fração de 0,3mm e prosseguiram para os procedimentos que envolviam o

ensaio, os quais foram realizados em um difratômetro de raios X com câmara para temperaturas criogênicas, Bruker, D8 Advance, apresentado na Figura 4.42, com tubo de raios-X com radiação $\text{Cu K}\alpha$, seguindo condições de análise com inclinação 2θ de 2° a 60° , fendas de $0,5^\circ$ e janela de 20 mm, voltagem de 40 kV, corrente de 40 mA e comprimento de onda (λ) de $1,5418\text{\AA}$. Os difratogramas foram plotados no software Excel e analisados no software X'Pert Highscore e estão apresentados nas Figura 4.43 e Figura 4.44 correspondentes às amostras de solo natural e de solo + 3%LS curada por 28 dias (melhor resultado para reversão da dispersibilidade), respectivamente.



Figura 4.42 - Difratômetro de raios -X Bruker, D8 Advance.

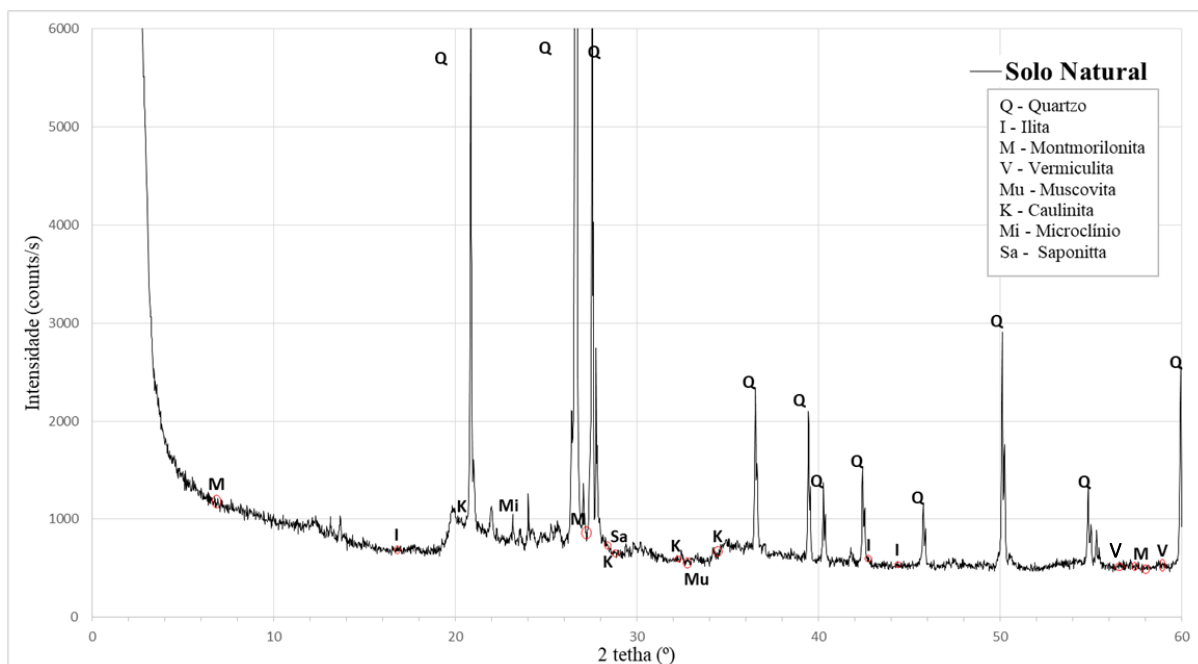


Figura 4.43 - DRX da amostra de solo dispersivo.

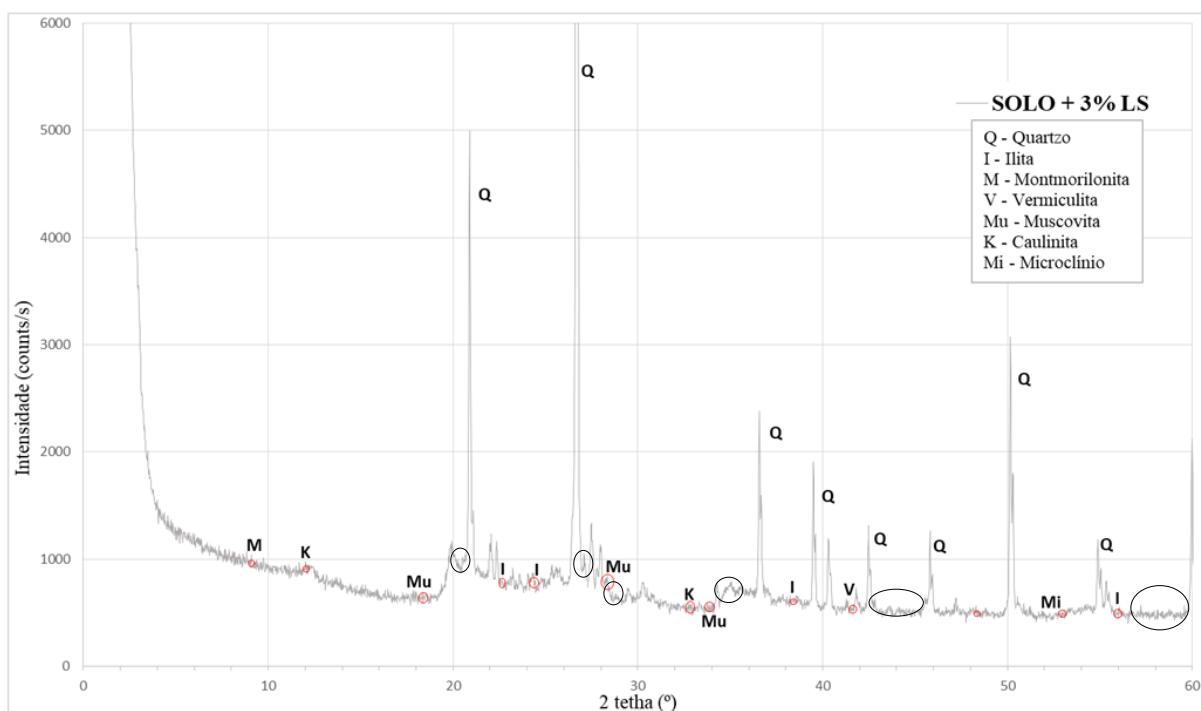


Figura 4.44 - DRX da amostra de solo tratado com 3% de LS e curada por 28 dias.

O DRX trata-se de um ensaio de natureza qualitativa, e dessa forma não foram encontradas diferenças (formação de fases cristalinas diferentes) entre os difratogramas das duas misturas. No entanto, é possível notar uma redução em alguns picos relativos ao quartzo (Q) e a diminuição (ou desaparecimento) na intensidade dos picos relativos aos argilominerais como

a saponita (S) a 28,8°, caulinita (K) a 20,9°, 28,4° e 34,5° e a illita (I) a 42,8° e 44, 3°. Percebe-se também o desaparecimento do pico relativo aos argilominerais expansíveis como a montmorillonita (M) e a vermiculita (V) (56° a 59°).

Fenômenos análogos foram observados por Alizagha *et al.* (2016), que sugeriram que LS alterou ou destruiu as redes de montmorillonita. A intensidade dos picos de outros minerais como quartzo, caulinita e illita também diminuíram após o tratamento. No entanto, os padrões de DRX não mostraram intercalação de LS nas camadas internas desses minerais, significando que apenas a adsorção periférica de LS ocorreu nas superfícies desses minerais. A razão provável é o grande peso molecular do polímero lignosulfonato de cálcio em comparação com o espaçamento muito pequeno das camadas internas dos minerais não expansivos. Os processos de adsorção subsequentemente revestiram as redes minerais do solo para formar flocos e restringiram a característica de difração dos planos atômicos, especialmente na montmorillonita. O aumento da presença de picos de minerais de illita aumentaram após a adição do LS, o que também pode ter contribuído para a redução das propriedades intrínsecas de expansão do solo.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O uso de subprodutos como o lignossulfonato de cálcio no melhoramento de solos oferece um atrativo alternativo às tecnologias convencionais. Com o objetivo de avaliar o lignossulfonato como melhorador de solos dispersivos, foi realizado um programa de ensaios de laboratório. O solo dispersivo foi caracterizado através de ensaios de análise granulométrica, de plasticidade e análise química. A classificação geotécnica por ensaios da Metodologia MCT também foi conduzida. Ensaio de compactação focaram na obtenção dos parâmetros de compactação (peso específico aparente seco e teor de umidade ótima) para as misturas. Os resultados dos ensaios de resistência à compressão simples determinaram a melhor mistura correlacionada ao aumento na resistência à compressão e comportamento dos corpos de prova durante a imersão de 4h que antecedia os ensaios. A verificação do melhoramento da dispersibilidade do material foi obtida através dos ensaios Crumb Test, Pinhole Test e sedimentométrico comparativo. A resistência às intempéries da melhor mistura foi avaliada através dos ensaios de durabilidade. O microscópio eletrônico de varredura (MEV) e o difratômetro de raios-X (DRX) foram utilizados para analisar alterações na estrutura e na mineralogia das misturas, respectivamente, antes e após a adição do lignosulfonato de cálcio.

Por fim, com base no que foi exposto e comentado ao longo do presente trabalho, apresentam-se conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

5.1 CONCLUSÕES

Da análise dos resultados verificados na resistência à compressão simples, Pinhole Test, Crumb Test, sedimentometria comparativa, durabilidade por sucessivos ciclos de molhagem – secagem – escovação, módulo cisalhante inicial e ensaios de microestrutura, estabeleceram-se, considerando as limitações experimentais do presente estudo, as seguintes conclusões:

Caracterização do Solo:

Com base na análise granulométrica e de plasticidade, o solo foi classificado como sendo um pedregulho argilo-arenoso, altamente plástico, com atividade coloidal normal. Pela Metodologia MCT a classificação obtida foi NG', solo argiloso de comportamento não laterítico.

A análise química caracterizou o material como sendo não dispersivo, porém com uma porcentagem de sódio de 23%.

Resistência à Compressão Simples (RCS):

O tempo de cura foi a variável mais influente em termos de ganho de resistência à compressão simples, onde os espécimes curados por 28 dias apresentavam maiores ganhos de RCS e de resistência a dispersar quando imersos. Este resultado já era esperado, pois o processo de melhoramento do solo com o LS necessita de um período de cura significativo para possibilitar as reações de químicas e trocas catiônicas.

O peso específico aparente seco foi a segunda variável mais influente para a RCS. Pesos específicos mais baixos derivam menores ganhos de resistência à compressão simples, porém fornecem maior teor de umidade, possibilitando maior troca catiônica entre o lignosulfonato de cálcio e os argilominerais, maior coesão e conseqüente melhoria também no comportamento dispersivo.

Para a determinação das variáveis de compactação da melhor mistura em termos de ganho de resistência e reversão da dispersibilidade, levou-se em consideração a integridade dos corpos de prova após o período de imersão que antecedia o ensaio. Neste caso, os corpos de prova que se mantiveram 100% íntegros foram os que continham 3% de lignosulfonato de cálcio. Apesar de não ter sido o teor de aditivo que apresentou os melhores resultados de resistência, os corpos de prova tratados com 3% obtiveram o comportamento mais estável tanto em termos de resistência quanto em integridade pós imersão, para ambos os tempos de cura de 7 e 28 dias.

Crumb Test:

O grau de dispersibilidade das amostras submetidas ao Crumb Test, conforme a norma NBR 13601 (ABNT, 2020a), identificaram que o solo passou de grau de dispersão 4 – altamente dispersivo para grau de dispersão 1 – não dispersivo, com a melhor mistura de 3% de lignosulfonato de cálcio curado por 28 dias. Sob essa perspectiva, pode-se considerar satisfatória a proposta de melhoramento.

Pinhole Test:

As amostras submetidas ao Pinhole Test, segundo as diretrizes da norma NBR 14114 (ABNT, 1998), atestaram a eficiência da melhor mistura com 3% de lignosulfonato de cálcio curada por 28 dias em suprimir o potencial dispersivo original do solo de D2 a ND4 para ND1, conforme a mesma norma. Os resultados deste ensaio são extremamente importantes sob à perspectiva de avaliar o solo quanto ao fenômeno de *piping*, e neste aspecto o melhoramento deste solo com o LS também foi considerado satisfatório.

Sedimentometria Comparativa (SCS):

As amostras de solo submetidas ao ensaio de sedimentometria comparativa, segundo a NBR 13602 (ABNT, 2020b), atestaram a eficiência da melhor mistura de 3% de LS curada por 28 dias em suprimir o comportamento dispersivo do solo natural, onde a porcentagem de dispersão foi reduzida de 96,30% para 22,22%. Sendo, após o melhoramento classificado como não dispersivo. Sob essa perspectiva, pode-se considerar satisfatória a proposta de melhoramento.

Durabilidade por molhagem – secagem – escovação:

Inicialmente as amostras ensaiadas conforme a NBR 13554 (ABNT, 2012b) não resistiram ao processo de imersão do segundo ciclo. Assim, optou-se por realizar novamente o ensaio, porém considerando o período de 42h de secagem ao ar – e não mais em estufa a 71°C. Os corpos de prova submetidos a este segundo ensaio resistiram 5 ciclos completos, e resultaram em PMA de 19,7% e PMI máxima de 10,9%.

De forma geral, apesar da mudança no processo de secagem e ainda que tenham resistido a 5 dos 6 ciclos requisitados pela norma, o desempenho geral da mistura não foi favorável uma vez que a PMA foi relativamente alta, ainda que dentro do esperado para um material não cimentado.

Módulo Cisalhante Inicial (G_0):

Através de ensaios de pulso ultrassônico foram obtidos valores de G_0 na ordem de 54MPa para o solo natural e de 56MPa para o solo tratado com 3% de lignosulfonato de cálcio e curado por 28 dias. Como esperado, houve pequena variação entre os resultados do módulo cisalhante a pequeníssimas deformações das amostras, uma vez que o material não é cimentado e não há grande ganho de resistência nem grande aumento de rigidez proporcionados pelo teor de 3% de LS.

Microestrutura:

A análise das imagens MEV das amostras mostraram que o solo natural apresentava estrutura descontínua irregular e levemente escamosa, com grande número de poros de diversos tamanhos. Após o melhoramento com o LS, a estrutura tornou-se mais agregada e com menores quantidade de poros, ainda que em maiores tamanhos. Esta mudança pode estar ligada ao desenvolvimento da reação eletrostática entre a mistura solo-água-LS.

Nos resultados do DRX, podem-se identificar diferenças nos difratogramas das amostras tratadas e não tratadas, com reduções nos picos relativos de quartzo e diminuição ou desaparecimento na intensidade dos picos de argilominerais como saponita, caulinita, illita e principalmente montmorillonita e vermiculita. Esta diminuição/desaparecimento possivelmente foi causado pela adsorção periférica do lignosulfonato de cálcio nas superfícies desses minerais.

Nesse sentido, pode-se perceber que a supressão da dispersibilidade, verificada nos ensaios Crumb Test, Pinhole Test e Sedimentométrico Comparativo, deu-se em razão da substituição iônica dos íons Na^+ por íons Ca^{2+} , pelo balanceamento das cargas superficiais negativas dos argilominerais e pela diminuição/desaparecimento dos picos dos argilominerais expansíveis.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A fim de que os conhecimentos obtidos no presente trabalho sejam ampliados e, também, que os resultados aqui relatados sejam verificados e comparados, a autora sugere os seguintes tópicos que julga interessante:

- Avaliar o desempenho da mistura para tempos de cura mais longos de 60, 90, 180 e 360 dias;
- Avaliar a influência da temperatura de cura em termos de resistência e reversão da dispersibilidade de solos dispersivos melhorados com lignosulfonato de cálcio;
- Executar uma análise estatística completa, a fim de identificar e confirmar a influência de cada uma das variáveis controláveis descritas nessa pesquisa;
- Mapear as ocorrências destes solos dispersivos no município de Pelotas/RS e arredores, com base em dados geológicos, pedológicos e trabalho de campo, identificando características e feições destas ocorrências;
- Identificar padrões físicos, químicos e mineralógicos causais do processo dispersivo do solo em questão;

- Análise do ciclo de vida (ACV) da mistura aqui proposta, de modo a efetivamente avaliar o desempenho ambiental desta;
- Avaliar a viabilidade técnica de utilização do lignosulfonato de cálcio e desta mistura em campo;
- Avaliar alterações de condutividade hidráulica dos solos dispersivos melhorados com lignosulfonato de cálcio e sua influência em termos de resistência;
- Avaliar em campo variações de pH, oxigênio, infiltrabilidade, durabilidade e pressões de expansão de solos dispersivos melhorados com lignosulfonato de cálcio;
- Estudo da microestrutura das misturas com uma variedade maior de ensaios de DRX, TGA/DTG, MEV com EDS, dentre outros;
- Busca de um composto (polímero, resíduo, subproduto ou material não poluente) que possibilite maiores ganhos de resistência quando empregado em conjunto com o lignosulfonato de cálcio, mantendo o melhoramento da dispersibilidade promovido por este.

6 REFERÊNCIAS

ALAZIGHA, D.; INDRARATNA, B.; VINOD, J. S.; EZEAJUGH, L. Emeka. (2016). The swelling behaviour of lignosulfonate-treated expansive soil. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement**, 169 (3), 182-193.

ALAZIGHA, D., INDRARATNA, B., VINOD, J. & HEITOR, A. (2017). Mechanisms of stabilization of expansive soil with lignosulfonate admixture. **Transportation Geotechnics**, 14.

ARUNALANDAN, K., LOGANATHAN, P., KRONE, R. B. (1975). Pore eroding fluid influences on surface erosion on soil. **Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE**, 101 (1), p. 51-66.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2016a) **NBR 6457**: Amostras de solo — Preparação para ensaio de compactação e ensaio de caracterização. Rio de Janeiro, p.8.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2012) **NBR 12025**: Solo-cimento — Ensaio de compressão simples de corpos de prova cilíndricos — Método de ensaio. Rio de Janeiro, p.2.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2012b) **NBR 13554**: Solo-cimento — Ensaio de durabilidade por molhagem e secagem — Método de ensaio. Rio de Janeiro, p.4.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2012c) **NBR 12024**: Solo-cimento — Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos — Procedimento. Rio de Janeiro, p.6.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2016b) **NBR 6458**: Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro, p.8.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2018) **NBR 7181**: Solo — Análise granulométrica. Rio de Janeiro, p. 12.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2020a) **NBR 13601**: Solo — Avaliação da dispersibilidade de solos argilosos pelo ensaio do torrão (crumb test). Rio de Janeiro, p. 4.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2020b) **NBR 13602**: Solo — Avaliação da dispersibilidade de solos argilosos pelo ensaio sedimentométrico comparativo — Ensaio de dispersão SCS. Rio de Janeiro, p. 9.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1996) **NBR 13603**: Solo - Avaliação da dispersibilidade de solos argilosos, por meio de ensaios químicos em amostra de água intersticial. Rio de Janeiro, p. 3.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2016c) **NBR 6459**: Solo - Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, p. 5.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2016d) **NBR 7180**: Solo — Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, p. 3.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2016e) **NBR 7182**: Solo — Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, p. 9.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1998) **NBR 14114**: Solo - Solos argilosos dispersivos - Identificação e classificação por meio do ensaio do furo de agulha (pinhole test). Rio de Janeiro, p. 8.

ATHUKORALA, R., INDRARATNA, B. & VINOD, J. S. (2013). Modeling the internal erosion behavior of lignosulfonate treated soil. In C. L. Meehan, D. Pradel, M. A. Pando & J. F. Labuz (Eds.), **Geo-Congress 2013** (pp. 1872-1881). United States: American Society of Civil Engineers.

BATEMAN, A. MM. (1959). **Economic Mineral Deposita**. 2ª ed. Wiley, New York, p.699.

BELARBI, A.; ABDELDJALIL, Z.; ABDELMALEK, B., (2013). Dispersive Clay: Influence of Physical and Chemical Properties on Dispersion Degree. **Electronic Journal of Geotechnical Engineering**. 18.

BELL, F. G.; WALKER, D. J. H. (2000). A further examination of the nature of dispersive soils in Natal, South Africa. **Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology**, 33: p. 187–199.

BOZELL, J.J.; HOLLADAY, J.E.; JOHNSON, D.; WHITE, J.F. (2007). **Top Value Added Chemicals from Biomass - Volume II: Results of Screening for Potential Candidates from Biorefinery Lignin**. PNNL-16983, Pacific Northwest National Laboratory (PNNL) and the National Renewable Energy Laboratory (NREL), Richland, WA.

BRAZETTI, R. (1996). Aditivos Orgânicos para Estabilização de Solos 1. Origem e pesquisas. **7a Reunião de Pavimentação Urbana**, São José dos Campos.

CANAKCI, H.; AZIZ, A.; CELIK, F. (2015). Soil stabilization of clay with lignin, rice husk powder and ash. **Geomechanics and Engineering**. 8. 67-79.

CHEMSTAB (2003). **Technical Manual**, CHEMSTAB Consulting Pty Ltd, Horsley, NSW Australia.

CHEN, Q.; INDRARATNA, B.; CARTER, J.; RUJIKIATKAMJORN, C. (2014). A theoretical and experimental study on the behaviour of lignosulfonate-treated sandy silt. **Computers and Geotechnics**, 61, 316–327.

CHEN, Q.; INDRARATNA, B. (2015). Shear behaviour of sandy silt treated with lignosulfonate. **Faculty of Engineering and Information Sciences - Papers: Part A**. 4657.

COLLARES, A. C. B. (2002). **Influência de fatores estruturais e químicos no colapso e dispersão de dois solos**. Tese de Doutorado (Geotecnia). USP, Escola de Engenharia. São Paulo, 2002, p. 249.

COSTA, J. A.; MEXIAS, A. S.; GOMES, M. E. B. Caracterização dos argilominerais usados em matéria-prima cerâmica, da formação Rio do Rasto, Bacia do Paraná, no município de Turvo, SC. **Cerâmica [online]**. 2010, v. 56, n. 340, p. 360-367.

CRUZ, S. (2008) **Caracterização de solos dispersivos nos aterros compactados na Barragem de Sobradinho**. Dissertação (Engenharia Geotécnica). UFOP, Escola de Minas. Ouro Preto, 2008, p. 303.

DAVIDSON, D.T.; HANDY, R.L. (1960). **Highway Engineering Handdbook**, Section 21, Soil stabilization. McGraw-Hill, New York, 1960. p. 108-133.

DEMPSEY, B. J.; THOMPSON, M. R. (1968). Durability Properties of Lime-Soil Mixtures. **Highway Research Board**, XS-16, Record 235.

EPA. (1995). Chemical wood pulping. Chapter 10.2 in **Compilation of Air Pollutant Emission Factors**, Volume 1: Stationary Point and Area Sources, United States Environmental Protection Agency, Washington, DC.

FURTADO, G. R. G.; MACHADO, N. (1982). Argilas Dispersivas na Barragem de Sobradinho. **Seminário Internacional sobre Represas y Operación de Embalses**, Comissão de Integração Elétrica Regional – CIER.

GOMES (1986). **Argilas: o que são e para o que servem**. Fundação Calouste Gulbenkian.

GOPALAKRISHNAN, K.; KIM, S.; CEYLAN, H. (2010). Lingnin recovery and utilization. **Bioenergy and Biofuel from Biowastes and Biomass**, 12, p. 247-274.

GOW, A.J.; DAVIDSON, D.T.; SHEELER, J.B. (1961). Relative effects of chlorides, lignosulfonates and molasses on properties of a soil-aggregate mix. **Highway Research Board Bulletin**, No. 282, pp. 66-83.

GRACE, T.M. (1987). Chemical recovery technology - a review. **IPC Technical Paper Series**, No. 247, The Institute of Paper Chemistry, Appleton, WI.

GRIM, R. E.; BRADLEY, W. F. (1953). Clay mineral composition and properties of some deep residual soil from São Paulo, Brasil. **Anais do 2º Congresso Mundial de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações**, p.63. IPT, São Paulo.

GRIM, R. E. (1962). **Applied Clay Mineralogy**. New York, McGraw Hill.

GUIMARÃES, J. E. P. (1971). Estabilização de Solos – Nova e Importante Aplicação da Cal seus Conceitos e suas Vantagens. **ABPC, Boletim nº 5**, São Paulo, p. 67.

INDRARATNA, B. (1991). Erosion of Dispersive Soils in Northeast Thailand. **Geotechnical Engineering**, Vol. 22, n. 1, p. 1-3.

INDRARATNA, B.; MUTTUVEL, T.; KHABBAZ, H.; ARMSTRONG, R. (2008). Predicting the erosion rate of chemically treated soil using a process simulation apparatus for internal crack erosion. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering** 134(6): 837-844.

INDRARATNA, B.; ATHUKORALA, R.; VINOD, J. (2013). Estimating the rate of erosion of a silty sand treated with lignosulfonate. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 139 (5), 701-714.

INDRARATNA, B.; ATHUKORALA, R.; VINOD, J. S. (2014). Erosion mitigation of lignosulfonate treated unstable soils. **In 7th international congress on environmental geotechnics**: 793–800.

INGLES, O. G.; METCALF, J. B. (1972). **Soil stabilization: principles and practices**. Sydney: Butterworths.

IPSWICH PLANNING SCHEME. **Dispersive soil management**. Ipswich. Implementation Guideline No. 28, 2016.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Levantamento dos Recursos Naturais: Folha SH.22 Porto Alegre e parte das Folhas SH.21 Uruguaiana e SI.22 Lagoa Mirim**. Volume 33. Rio de Janeiro: IBGE, 1986.

- KELLER, W. D. (1962). Diagenesis in clay minerals, a review. **Clays and Minerals** **11**, 136.
- KÉZDI, A. (1979). Stabilized Earth Roads. **In: Developments in Geotechnical Engineering** 19. Budapest, Elsevier/Akadémiai Kiadó/Hungary, 1979. Cap.1, p.13-30: Introduction; Cap.2 p.31-68: Physical and chemical aspects of soil stabilization; Cap.7, p.212-40: Chemical soil stabilization.
- KOOHPEYMA, H. R.; VAKILI, A. H.; MOAYEDI, H.; PANJSETOONI, A.; NAZIR, R. (2013). Investigating the effect of lignosulfonate on erosion rate of the embankments constructed with clayey sand. **The Scientific World Journal**, 2013, p. 1–6.
- LI, Y.; ZHANG, Y.; CEYLAN, H.; KIM, S. (2019). Laboratory Evaluation of Silty Soils Stabilized with Lignosulfonate. **International Airfield and Highway Pavements Conference**, 2019, p. 531-540.
- LORA, J.H.; GLASSER, W.G. (2002). Recent industrial applications of lignin: A sustainable alternative to nonrenewable materials. **Journal of Polymers and the Environment**, 10(1-2), 2002, p. 39-48.
- MAHARAJ, A.; VAN ROOY, J.; PAIGE-GREEN, P. (2015). Revised test protocols for the identification of dispersive soils. **Journal of the South African Institution of Civil Engineers**. 57. 31-37.
- MONIZ, A. C. (1972). **Elementos de Pedologia**. Editora Universidade de São Paulo.
- MOORE, D. M.; REYNOLDS, R. C. (1997). **X-Ray Diffraction and the Identification and Analysis of Clay Minerals**. New York: Oxford University Press, 1997.
- MORAES, L.; PARFITT, F.; BASTOS, C. (2019). Estabilização de uma areia argilosa sedimentar proveniente de uma jazida localizada no RS com o uso do aditivo químico lignosulfonato de cálcio (LS). **Anais do X Seminário de Engenharia Geotécnica do Rio Grande do Sul (GEORS)**, Santa Maria.

MUTTUVEL, T. (2008). **Erosion rate of chemically stabilised soils incorporating tensile stress-deformation behavior**. Wollongong: University of Wollongong.

NOGAMI, J.S.; VILLIBOR, D.F. (1979). Soil characterization of mapping units for highway purposes in a tropical area. **Bulletin of International Association of Engineering Geology**, Krefeld, n. 19, p.196-199, 1979.

NOGAMI, J.S.; VILLIBOR, D.F. (1981). Uma nova classificação de solos para finalidades rodoviárias. **Anais Simpósio Brasileiro de Solos Tropicais**, 1, Rio de Janeiro/RJ: COPPE/ABMS, 1981, P. 30-40.

OLIVEIRA, L. C. D. (1994) **A estabilização de solos aplicada a habitação, um estudo de misturas solo-cimento**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - UFRJ, Rio de Janeiro.

PANDITHARADHYA, M.; JAYA, M.; REDDY, C.; AMULYA, S.; SHANKAR, A. (2017). Experimental Investigation of Lateritic Soil treated with Calcium Lignosulfonate. **Indian Geotechnical Conference**.

PESSOA, F. H. C. (2004). **Análises de Solos de Urucu para Fins de Uso Rodoviário**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade de Brasília, Brasília-DF.

PUPPALA, A. J.; HANCHANLOET, S. (1999). Evaluation of a new chemical treatment method on strength and resilient properties of a cohesive soil. **Transportation Research Board**; Paper No. 990389.

ROCHA, B.; GIACHETI, H. (2016). A determinação do módulo de cisalhamento máximo (go) dos solos em furos de sondagens. **Revista Fundações & Obras Geotécnicas**. 6. 46 - 52.

SALOMÃO, F. X.; ANTUNES, F. S. (1988). **Solos em Pedologia – Geologia de Engenharia**. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia (ABGE). São Paulo, Brasil. p. 88-99.

SANTOS, S. P. (1989). **Ciência e Tecnologia de Argilas**. Editora Edgard Blucher Ltda. 2º edição, Vol. 1, p.277-298.

SCHEUERMANN FILHO, H. C. (2019). **Estabilização de um solo dispersivo com pó de vidro moído e cal de carbureto**. Dissertação (PPGEC - Geotecnia), UFRGS, Escola de Engenharia.

SCHWENDLER, D. H. (2013). **Estabilização de dois solos do Rio Grande do Sul com lignosulfonato de cálcio para fins rodoviários**. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil). UNISC, Santa Cruz do Sul.

SHERARD, J. L.; DECKER, R. S.; RYKER, N. L. (1972). Iping in earth dams of dispersive clay. **Proceedings of the Specialty Conference on the performance of Earth and Earth-Supported Structures** – ASCE.

SHERARD, J. L.; DUNNIGAN, L. P.; DECKER, R. S.; STEELE, E. F. (1975). Pinhole test for identify dispersive soils. Paper submitted for consideration, **Journal of Geotechnical Engineering Division**, ASCE.

SMITH, C.J. (1952). The Chrome-Lignin Process and Ion Exchange Studies. **Proceedings of the Conference on Soil Stabilization. Massachusetts, 1952.**

STRECK, E.V.; KÄMPF, N.; DALMOLIN, R.S.D.; KLAMT, E; NASCIMENTO, P.C; GIASSON, E.; PINTO, L.F.S. (2018) **Solos do Rio Grande do Sul**. 3 ed. Porto Alegre: EMATER/RS – ASCAR, 2018. 252p.

TA'NEGONBADI, B.; NOORZAD, R. (2017). Stabilization of clayey soil using lignosulfonate. **Transportation Geotechnics**, Volume 12, p. 45-55.

TEITELBAUM, J. (2019). **Bairro Quartier**. Disponível em: <<https://bairroquartier.com.br>> Acesso em 17 de junho de 2021.

TINGLE, J. S.; SANTORI, R. L. (2003). Stabilization of clay soils with non-traditional additives. **Transportation Research Record** 1819, p. 72-84.

TOMAZELLI, L.J.; VILLWOCK, J.A. **Mapeamento geológico de planícies costeiras: o exemplo da costa do Rio Grande do Sul**. Gravel, Porto Alegre, n.3, 2005, p. 109-115.

VELDE, B. (1992). **Introduction to Clay Minerals**. Hong Kong: Excel Typesetter Company, 1992.

VINOD, J.S.; INDRARATNA, B.; AL MAHAMUD, MA. (2010). Stabilization of an erodible soil using a chemical admixture. **Proceedings the ICE – Ground Improve**, 2010; 163(1): p. 43–51.

VINOD, J.S.; INDRARATNA, B. (2011). A conceptual model for lignosulfonate treated the soils. **13th International Conference of the International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics**. Melbourne, Australia.

VON, H. J.; GERBER, F. A., (1988). A Proposed Procedure for the Identification of Dispersive Soils. **International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering**. 3.

WELTER, C.; BASTOS, C.A.B. (2003). Avaliação da dispersibilidade de Planossolos Solódicos encontrados na Planície Costeira Sul do RS. **Congresso regional de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia – CRICTE**. Itajaí/SC, 2003.

XAVIER, S.C. (2017). **Mapeamento geotécnico aplicado ao planejamento do uso e ocupação do solo da cidade de Pelotas/RS - estudo voltado à expansão urbana**. Tese de Doutorado - UFRGS. Porto Alegre, 2017.

XAVIER, S. C. (2010). **O mapeamento geotécnico por meio de geoprocessamento como instrumento de auxílio ao planejamento do uso e ocupação do solo em cidades costeiras: estudo de caso para Pelotas (RS)**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica, FURG. Rio Grande, 2010.

ZAHRI, A.; ZAINORABIDIN, A. (2019). An overview of traditional and non traditional stabilizer for soft soil. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**. 527.

7 ANEXOS

Anexo - A

QUADRO - PROPRIEDADES TÍPICAS DOS GRUPOS DE SOLOS

CLASSES				N - SOLOS DE COMPORTAMENTO "NÃO LATERÍTICO"				L - SOLOS DE COMPORTAMENTO "LATERÍTICO"			
GRUPOS				NA AREIAS	NA' ARENOSOS	NS' SILTOSOS	NG' ARGILOSOS	LA AREIAS	LA' ARENOSOS	LG' ARGILOSOS	
GRANULOMETRIAS TÍPICAS (MINERAIS) (1)				AREIAS AREIAS SILTOSAS SILTOS (q)	AREIAS SILTOSAS, AREIAS ARGILOSAS	SILTOS (k,m), SILTOS ARENOSOS E ARGILOSOS	ARGILAS, ARGILAS ARENOSAS, ARGILAS SILTOSAS	AREIAS COM POUCA ARGILA	AREIAS ARGILOSAS, ARGILAS ARENOSAS	ARGILAS, ARGILAS ARENOSAS	
CAPACIDADE DE SUPORTE (2)	MINI - CBR SEM EMBEBIÇÃO (%)	MUITO ALTO	>30	ALTA A MÉDIA	ALTA	MÉDIA A ALTA	ALTA	ALTA	ALTA	ALTA A MUITO ALTA	ALTA
		ALTO	12-30								
		MÉDIO	4-12								
		BAIXO	<4								
	PERDA DE SUPORTE POR EMBEBIÇÃO (%)	ALTA	>70	MÉDIA A BAIXA	BAIXA	ALTA	ALTA	BAIXA	BAIXA	BAIXA	BAIXA
		MÉDIA	40-70								
BAIXA		<40									
EXPANSÃO (%) (2)	ALTA	>3	BAIXA	BAIXA	ALTA	ALTA A MÉDIA	BAIXA	BAIXA	BAIXA	BAIXA	
	MÉDIA	0,5-3									
CONTRAÇÃO (%) (2)	BAIXA	<0,5	BAIXA A MÉDIA	BAIXA A MÉDIA	MÉDIA	ALTA A MÉDIA	BAIXA	BAIXA	BAIXA A MÉDIA	MÉDIA A ALTA	
PERMEABILIDADE log k (cm/s)	ALTA	>(-3)	MÉDIA A ALTA	BAIXA	MÉDIA A BAIXA	BAIXA A MÉDIA	MÉDIA A BAIXA	BAIXA	BAIXA	BAIXA	
	MÉDIA	(-3)A(-6)									
	BAIXA	<(-6)									
PLASTICIDADE		IP (%)	LL (%)	BAIXA A NP	MÉDIA A NP	MÉDIA A ALTA	ALTA	NP A BAIXA	BAIXA A MÉDIA	MÉDIA A ALTA	
	ALTA	> 30	> 70								
	MÉDIA	7 - 30	30 - 70								
	BAIXA	< 7	< 30								

(1) q - QUARTZO, m - MICAS, k - CAULINITA (2) CORPOS-DE-PROVA COMPACTADOS NA UMIDADE ÓTIMA, ENERGIA NORMAL, COM SOBRECARGA PADRÃO QUANDO PERTINENTE.

Anexo - B

Anexo – C

$\gamma_d = 16,8kN/m^3$ 28 dias																		
% de LS	CP	γ_d (kN/m ³)	Desvio Médio	Variância	Desvio Padrão	Aceitação	Umidade (%)	Desvio Médio	Variância	Desvio Padrão	Aceitação	Resistência (kPa)	Desvio Médio	Variância	Desvio Padrão	Aceitação	Resistência Média (kPa)	
1%	CP1	16,92	0,13	0,04	0,20	OK!	18,84%	0,0035	1,68E-05	0,0041004	OK!	116,50	15,70	600,86	24,51	OK!	103,89	
	CP2	16,87	0,12			OK!	19,54%	0,0026			75,64	21,19	OK!			75,64		15,70
	CP3	16,56	0,17			OK!	19,56%	0,0027			119,53	16,08	OK!			119,53		16,08
2%	CP1	16,64	0,03	0,00	0,04	OK!	19,44%	0,0006	5,033E-07	0,0007095	OK!	77,15	0,01	0,00	0,02	OK!	77,16	
	CP2	16,61	0,02			OK!	19,53%	0,0004			77,15	0,01	OK!			77,15		0,01
	CP3	16,56	0,03			OK!	19,58%	0,0005			77,19	0,02	OK!			77,19		0,02
3%	CP1	17,00	0,19	0,05	0,22	OK!	19,26%	0,0011	2,52E-06	0,0015875	OK!	77,20	0,58	0,79	0,89	OK!	76,66	
	CP2	16,65	0,14			OK!	19,32%	0,0010			77,15	0,57	OK!			77,15		0,57
	CP3	16,59	0,15			OK!	19,56%	0,0014			75,64	0,77	OK!			75,64		0,77
$\gamma_d = 17,7kN/m^3$ 28 dias																		
% de LS	CP	γ_d (kN/m ³)	Desvio Médio	Variância	Desvio Padrão	Aceitação	Umidade (%)	Desvio Médio	Variância	Desvio Padrão	Aceitação	Resistência (kPa)	Desvio Médio	Variância	Desvio Padrão	Aceitação	Resistência Média (kPa)	
1%	CP1	18,18	0,11	0,04	0,21	OK!	16,01%	0,0029	2,66E-05	0,0051549	OK!	133,21	17,02	1110,34	33,32	OK!	134,19	
	CP2	18,35	0,15			OK!	15,63%	0,0035			167,99	25,35	OK!			167,99		25,35
	CP3	17,93	0,17			OK!	16,65%	0,0042			101,37	24,62	OK!			101,37		24,62
2%	CP1	18,04	0,11	0,02	0,13	OK!	15,74%	0,0030	2,112E-05	0,004596	OK!	143,17	49,78	5860,88	76,56	OK!	98,49	
	CP2	17,84	0,08			OK!	15,53%	0,0028			10,10	66,30	OK!			10,10		66,30
	CP3	17,80	0,08			OK!	14,86%	0,0039			142,22	49,66	OK!			142,22		49,66
3%	CP1	17,57	0,17	0,07	0,27	OK!	16,04%	0,0048	7,912E-05	0,0088951	OK!	79,17	19,38	859,01	29,31	OK!	56,19	
	CP2	17,52	0,18			OK!	16,77%	0,0063			23,18	24,76	OK!			23,18		24,76
	CP3	18,01	0,23			OK!	15,00%	0,0070			66,23	17,76	OK!			66,23		17,76
$\gamma_d = 18,8kN/m^3$ 28 dias																		
% de LS	CP	γ_d (kN/m ³)	Desvio Médio	Variância	Desvio Padrão	Aceitação	Umidade (%)	Desvio Médio	Variância	Desvio Padrão	Aceitação	Resistência (kPa)	Desvio Médio	Variância	Desvio Padrão	Aceitação	Resistência Média (kPa)	
1%	CP1	0,00	0,00	0,00	0,00	OK!	12,74%	0,0002	4,00E-08	0,0002	OK!	0,00	0,00	0,00	0,00	Descartado!	0,00	
	CP2	0,00	0,00			OK!	12,70%	0,0002			0,00	0,00	OK!			0,00		0,00
	CP3	0,00	0,00			OK!	12,72%	0,0001			0,00	0,00	OK!			0,00		0,00
2%	CP1	0,00	9,32	115,84	10,76	OK!	13,95%	0,0070	6,592E-05	0,0081193	OK!	0,00	90,80	15225,80	123,39	OK!	121,07	
	CP2	18,66	6,99			OK!	12,58%	0,0062			246,66	94,19	OK!			246,66		94,19
	CP3	18,62	6,99			OK!	12,51%	0,0063			116,55	63,36	OK!			116,55		63,36
3%	CP1	18,65	0,33	0,29	0,54	OK!	12,75%	0,0049	4,882E-05	0,0069874	OK!	78,72	20,26	993,01	31,51	OK!	62,06	
	CP2	17,85	0,46			OK!	14,14%	0,0055			25,72	27,26	OK!			25,72		27,26
	CP3	18,88	0,36			OK!	13,32%	0,0038			81,74	20,63	OK!			81,74		20,63

Informações dos Fatores

Fator	Níveis	Valores
Peso Específico (kN/m ³)	3	16,8; 17,7; 18,6
Teor de LS (%)	3	1; 2; 3
Tempo de Cura (dias)	2	7; 28

Análise de Variância

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)
Modelo	17	114999	6765
Linear	5	76657	15331
Peso Específico (kN/m ³)	2	15965	7982
Teor de LS (%)	2	4246	2123
Tempo de Cura (dias)	1	56446	56446
Interações de 2 fatores	8	15390	1924
Peso Específico (kN/m ³)*Teor de LS (%)	4	9517	2379
Peso Específico (kN/m ³)*Tempo de Cura (dias)	2	2841	1420
Teor de LS (%)*Tempo de Cura (dias)	2	3032	1516
Interações de 3 fatores	4	22952	5738
Peso Específico (kN/m ³)*Teor de LS (%)*Tempo de Cura (dias)	4	22952	5738
Erro	36	59570	1655
Total	53	174569	

Fonte	Valor F	Valor-P
Modelo	4,09	0,000
Linear	9,27	0,000
Peso Específico (kN/m ³)	4,82	0,014
Teor de LS (%)	1,28	0,290
Tempo de Cura (dias)	34,11	0,000
Interações de 2 fatores	1,16	0,348
Peso Específico (kN/m ³)*Teor de LS (%)	1,44	0,241
Peso Específico (kN/m ³)*Tempo de Cura (dias)	0,86	0,432
Teor de LS (%)*Tempo de Cura (dias)	0,92	0,409
Interações de 3 fatores	3,47	0,017
Peso Específico (kN/m ³)*Teor de LS (%)*Tempo de Cura (dias)	3,47	0,017
Erro		
Total		

Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	R2(pred)
40,6783	65,88%	49,76%	23,22%

Coeficientes

Termo	Coef	Coef	Valor-T	Valor-P
Constante	48,75	5,54	8,81	0,000
Peso Específico (kN/m ³)				
16,8	-4,82	7,83	-0,62	0,542
17,7	23,05	7,83	2,94	0,006
Teor de LS (%)				
1	-7,00	7,83	-0,89	0,377
2	12,51	7,83	1,60	0,119
Tempo de Cura (dias)				
7	-32,33	5,54	-5,84	0,000
Peso Específico (kN/m ³)*Teor de LS (%)				
16,8 1	17,4	11,1	1,57	0,125
16,8 2	-17,6	11,1	-1,59	0,120
17,7 1	6,2	11,1	0,56	0,582
17,7 2	0,1	11,1	0,01	0,990
Peso Específico (kN/m ³)*Tempo de Cura (dias)				
16,8 7	-9,65	7,83	-1,23	0,226
17,7 7	7,84	7,83	1,00	0,323
Teor de LS (%)*Tempo de Cura (dias)				
1 7	-5,28	7,83	-0,67	0,504
2 7	-5,32	7,83	-0,68	0,501
Peso Específico (kN/m ³)*Teor de LS (%)*Tempo de Cura (dias)				
16,8 1 7	-2,3	11,1	-0,21	0,834
16,8 2 7	8,9	11,1	0,81	0,425
17,7 1 7	-33,5	11,1	-3,02	0,005
17,7 2 7	15,8	11,1	1,42	0,163