



DAPHNE ROSSANA LEÓN MOGROVEJO

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES GEOTÉCNICAS DE
UM SOLO ARGILOSO E OUTRO ARENOSO COM
ADIÇÃO DE FIBRAS DE PAPEL KRAFT**

**CAMPINAS
2013**



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E URBANISMO

DAPHNE ROSSANA LEÓN MOGROVEJO

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES GEOTÉCNICAS DE
UM SOLO ARGILOSO E OUTRO ARENOSO COM
ADIÇÃO DE FIBRAS DE PAPEL KRAFT**

Orientador: Prof. Dr. Paulo José Rocha de Albuquerque

Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Unicamp, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, na área de Geotecnia.

**ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA
DISSERTAÇÃO DEFENDIDA PELA ALUNA DAPHNE ROSSANA
LEÓN MOGROVEJO E ORIENTADA PELO PROF. DR. PAULO JOSÉ
ROCHA DE ALBUQUERQUE.**

ASSINATURA DO ORIENTADOR

**CAMPINAS
2013**

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

L553a León Mogrovejo, Daphne Rossana, 1986-
Avaliação das propriedades geotécnicas de um solo argiloso e outro arenoso com adição de fibras de papel kraft / Daphne Rossana León Mogrovejo. – Campinas, SP : [s.n.], 2013.

Orientador: Paulo José Rocha de Albuquerque.
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo.

1. Solos. 2. Embalagens de papel. 3. Reciclagem. 4. Laboratório. 5. Contaminação. I. Albuquerque, Paulo José Rocha de, 1964-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Evaluation of geotechnical properties of a clayey and sandy soil with added fibers kraft paper

Palavras-chave em inglês:

Soils

Paper bags

Recycling

Laboratory

Contamination

Área de concentração: Geotecnia

Titulação: Mestra em Engenharia Civil

Banca examinadora:

Paulo José Rocha de Albuquerque [Orientador]

David de Carvalho

Antonio Anderson da Silva Segantini

Data de defesa: 26-08-2013

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Civil

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E URBANISMO**

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES GEOTÉCNICAS DE UM SOLO
ARGILOSO E OUTRO ARENOSO COM ADIÇÃO DE FIBRAS DE
PAPEL KRAFT**

Daphne Rossana León Mogrovejo

Dissertação de Mestrado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:

Paulo J. R. Albuquerque

**Prof. Dr. Paulo José Rocha de Albuquerque
Presidente e Orientador / Universidade Estadual de Campinas**

David Carvalho

**Prof. Dr. David de Carvalho
Universidade Estadual de Campinas**

Antonio Anderson S. Segantini

**Prof. Dr. Antonio Anderson da Silva Segantini
Universidade Estadual Paulista**

Campinas, 26 de agosto de 2013

RESUMO

MOGROVEJO, D. R. L. **Avaliação das propriedades geotécnicas de um solo argiloso e outro arenoso com adição de fibras de papel kraft.** Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas - Unicamp, 2013, 193p.

Neste trabalho verificou-se a hipótese de que as fibras dispersas de papel Kraft, provenientes da reciclagem de sacos de cimento, podem ser utilizadas como estabilizante para melhorar as características e propriedades dos solos, por meio da análise do comportamento da mistura solo com fibras de polpa de celulose extraídas de sacos de cimento com três teores de fibra (5%, 10% e 15%) e dois tipos de solos (arenoso e argiloso). Não obstante, avaliou-se preliminarmente a influência desta adição nas características da água proveniente de uma possível percolação pelos solos, tendo em vista a possibilidade de contaminação do subsolo. Após realizar ensaios de laboratório (caracterização, compactação, permeabilidade e resistência) a partir de amostras deformadas, realizaram-se análises comparativas com as misturas. Constatou-se uma melhoria no desempenho das misturas quanto à resistência ao cisalhamento em ambos os solos, sendo observado melhor desempenho para o solo argiloso. Entretanto, verificou-se nas águas coletadas das misturas a partir de ensaios de permeabilidade, a tendência de aumento de condutividade elétrica, demanda química de oxigênio e dureza total quando comparados às águas dos dois solos sem fibra. Para verificar a validade dos resultados, realizaram-se análises estatísticas através do teste de Dunnett.

Palavras chave: Solos; Embalagens de papel; Reciclagem; Laboratório; Contaminação.

ABSTRACT

MOGROVEJO, D. R. L. **Evaluation of geotechnical properties of a clayey and sandy soil with added fibers kraft paper**. Thesis (Master of Science) - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas - Unicamp, 2013, 193p.

In this study was verified the hypothesis that the dispersed Kraft paper's fibers, resulted from the recycling process of cement bags, can be used as stabilizer in order to improve the characteristics and properties of soils, by analyzing of the behavior of mixture soil with cellulose pulp fibers extracted of cement bags with three fiber contents (5%, 10% and 15%) and two types of soils (sandy and clay). However, it was evaluated preliminarily the influence of this addition on the characteristics of water from a possible percolation through the soil, in view of the possibility of contamination of the subsoil After performing laboratorial experiments (physical characterization, compaction, permeability and resistance) from disturbed samples, were performed comparative analyses with the mixtures. It was noted an improvement in the performance of the mixtures when regarding shear resistance in both soils, and was observed even better performance in the clay soil. However, the collected samples of the mixtures from permeability tests presented a tendency of increased of electrical conductivity, chemical oxygen demand and total hardness when compared to the waters of the two soils without fiber. Statistical analyzes were performed to check the validity of the results using Dunnett test.

Key-words: Soils; Paper bags; Recycling; Laboratory; Contamination.

SUMÁRIO

RESUMO.....	vii
ABSTRACT	ix
SUMÁRIO.....	xi
AGRADECIMENTOS	xvii
LISTA DE FIGURAS	xix
LISTA DE TABELAS	xxvii
LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS	xxxii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Contextualização do Estudo	1
1.2. Objetivos	3
1.2.1. Geral	3
1.2.2. Específicos	3
1.3. Contribuição do presente estudo	4
1.4. Estrutura do trabalho.....	5
2. RESÍDUOS SÓLIDOS.....	7
2.1. Aproveitamento dos resíduos sólidos	7
2.2. Aspectos importantes sobre os sacos de cimento	13
3. ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS	19
3.1. Evolução das estabilizações e tipo de estabilizações	20
3.1.1. Propósito da estabilização	21
3.1.2. Tipos de estabilização	23
3.1.2.1. Estabilização mecânica	23
3.1.2.2. Estabilização física	24

3.1.2.3. Estabilização química	24
3.2. Experiências passadas de estabilizações	25
3.2.1. Estabilizações com aditivos químicos convencionais	25
3.2.1.1. Estabilização com cimento Portland (solo-cimento)	25
3.2.1.2. Estabilização com cal (solo-cal)	26
3.2.1.3. Estabilização com emulsão asfáltica (solo-betume)	27
3.2.1.4. Estabilização com cinzas volantes	28
3.2.2. Estabilizações com aditivos químicos não convencionais	29
3.2.2.1. Estabilização Solo – Licor negro Kraft	30
3.2.2.2. Estabilização Solo – DS-328	30
3.2.2.3. Estabilização Solo – Vinhoto ou Solo – Vinhaça	31
3.2.2.4. Estabilização Solo – RBI Grade 81	32
3.2.2.5. Estabilização Solo – Cinza de casca de arroz e Cal.....	33
3.2.2.6. Outras estabilizações não convencionais	34
3.2.3. Reforço de solos com fibras	35
3.2.3.1. Tipos de fibras utilizados como reforço	35
3.2.3.2. Solos reforçados com fibras	38
3.3. Kraftterra	41
4. QUALIDADE DA ÁGUA E CONTAMINAÇÃO DO LENÇOL FREÁTICO	43
4.1. Importância da qualidade de água	43
4.1.1. Águas superficiais e águas subterrâneas	45
4.1.2. Definições relacionadas à qualidade da água	46
4.1.3. Impactos das atividades antrópicas sobre a qualidade da água.....	47
4.2. Formas de contaminação do lençol freático	49
4.2.1. Fontes de poluição dos lençóis freáticos	50
4.2.1.1. Poluição urbana e doméstica	51
4.2.1.2. Poluição rural.....	52
4.2.1.3. Poluição por mineração	53
4.3. Legislação brasileira	54
5. MATERIAIS E MÉTODOS.....	57
5.1. Amostras de solos.....	57

5.1.1. Amostra 1	57
5.1.2. Amostra 2	58
5.2. Reciclagem dos sacos de cimento.....	59
5.3. Preparo e mistura dos solos com as fibras dispersas de papel Kraft.....	66
5.4. Proporções.....	69
5.5. Ensaios de caracterização física.....	70
5.6. Ensaios de compactação - Proctor Normal.....	70
5.7. Ensaios de cisalhamento direto	71
5.8. Ensaios de compressão simples ou de resistência à compressão não confinada	73
5.9. Ensaios de permeabilidade.....	74
5.10. Ensaios para análises físico-químicas das águas coletadas	76
5.10.1. pH	76
5.10.2. Condutividade elétrica (CE)	78
5.10.3. Cor aparente	79
5.10.4. Dureza total	81
5.10.5. Demanda química de oxigênio (DQO)	83
5.11. Análise estatística dos dados experimentais	85
6. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS	87
6.1. Ensaios de caracterização física.....	87
6.1.1. Análise granulométrica	87
6.1.2. Limites de Atterberg.....	90
6.1.3. Classificação dos Solos	91
6.2. Ensaios de compactação - Proctor Normal.....	94
6.3. Ensaios de cisalhamento direto	100
6.3.1. Cisalhamento direto na umidade ótima.....	101
6.3.2. Cisalhamento direto inundado	104
6.3.3. Cisalhamento direto com ruptura aos 28 dias.....	108
6.4. Ensaios de compressão simples ou de resistência à compressão não confinada	117
6.4.1. Compressão simples na umidade ótima	118

6.4.2. Compressão simples com ruptura aos 28 dias	122
6.4.3. Compressão simples com ruptura aos 60 dias	129
6.5. Ensaio de permeabilidade	131
6.6. Ensaio para análises físico-químicas das águas coletadas	132
6.7. Síntese das análises dos resultados	142
7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	145
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	149
ANEXO A	161
ANEXO B	167
ANEXO C	181

*Aos dois grandes amores da minha vida,
meu esposo Julio e meu filho Fabian...*

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela benção de viver cada dia e pela força que me deu para concluir este trabalho.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Paulo José Rocha de Albuquerque, pela paciência, apoio, incentivo e confiança que depositou em mim, pelas inúmeras sugestões e ensinamentos indispensáveis para a realização deste trabalho, e principalmente pela grande ajuda na redação, corrigindo, naturalmente por não ser português-falante, erros que dificultariam o bom entendimento do texto, além de tudo agradeço pela grande amizade construída neste período.

Ao amor da minha vida, Julio, meu amigo e companheiro, pelo amor e apoio incondicionais, por me incentivar a continuar com o mestrado quando queria desistir. Agradeço muito pela ajuda que me deu em uma parte importante desta pesquisa com seus conhecimentos relacionados à estatística e à análise numérica, bem como na correção do texto.

Ao meu amado filho Fabian por alegrar todos os meus dias com seu sorriso e suas travessuras, ele é o motor da minha vida.

Aos meus amados pais Humberto e Roxana, inspirações da minha vida, pelo amor incondicional, apoio e compreensão de ficar longe deles em outro país. Obrigada por me incentivar e me darem forças para correr atrás dos meus sonhos e por fazer de mim a pessoa que agora sou. Obrigada pelo sacrifício de vir até aqui para me ajudar no cuidado do meu filho, enquanto desenvolvia este trabalho.

Aos meus irmãos, Fabrizio, Candy e Zindell, pelo amor, amizade, apoio moral e pelos incentivos constantes. Obrigada por estarem sempre presentes na minha vida, especialmente à minha irmã Candy, minha confidente e cúmplice em tudo, por sempre me dar forças para seguir em frente e por vir para me ajudar no cuidado do meu filho.

A toda minha família, por estarem sempre presentes e se preocuparem por mim.

À Universidade Estadual de Campinas (Unicamp) por ter me concedido a oportunidade de estudar na instituição e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de mestrado.

Aos técnicos de laboratório do DGT, Cipriano e Reinaldo, meus amigos, por me transmitirem seus conhecimentos e me ajudarem nas atividades de laboratório, e principalmente pela amizade e pelos momentos agradáveis que passei com eles.

Ao técnico de laboratório do Departamento de Estruturas, Marçal, pelo auxílio, colaboração e conhecimentos prestados na obtenção das fibras e nas misturas.

Ao técnico de laboratório do Departamento de Saneamento e Ambiente, Enelton, pelo auxílio, colaboração e conhecimentos prestados nas análises das águas coletadas e pela ajuda na redação do texto referente a esse tema.

Ao Prof. Dr. Pérsio Leister de Almeida Barros, pela contribuição prestada no exame de qualificação.

Ao Prof. Dr. Edson Aparecido Abdul Nour, pelo auxílio e colaboração para definir os ensaios nas águas coletadas.

Ao Eng. Eliezer Laister (Votorantim Cimentos) pela colaboração no fornecimento dos sacos de cimento.

Aos amigos que conheci neste período, Miriam, David, Claudia, Richard, Marisol, Bibiana, Marina, agradeço o companheirismo, a amizade, o apoio e os momentos agradáveis que me ajudaram a superar a saudade da minha terra.

A todos aqueles que de alguma forma contribuíram para a realização e conclusão deste trabalho.

LISTA DE FIGURAS

Figura 5.1 – Localização do Município de Campinas e de Paulínia no Estado de São Paulo	59
Figura 5.2 – Liquidificador industrial com cuba de 4 litros	61
Figura 5.3 – Processo de transformação dos sacos de cimento em polpa de celulose: a) Kraft fragmentado; b) Kraft de molho; c) Polpa de celulose; d) Água para reutilizar	61
Figura 5.4 – a) Saco de algodão; b) Retirada do excesso de água com a torção manual do saco; c) Polpa sem o excesso de água	62
Figura 5.5 – a) Argamassadeira pequena; b) Dispersão das fibras na argamassadeira (acima) e Fibras dispersas (abaixo)	63
Figura 5.6 – a) Argamassadeira grande; b) Fibra sendo misturada com solo em argamassadeira (acima) e Adição de água à mistura (abaixo)	67
Figura 5.7 – Equipamentos utilizados para determinar pH e CE: a) pHmetro e eletrodo, b) condutivímetro e eletrodo	79
Figura 5.8 – Leitura de cor aparente: a) espectrofotômetro, b) amostra pronta para ser lida.....	81
Figura 5.9 – Ensaio de dureza total: a) indicador Negro de Eriocromo T adicionado à amostra, b) ponto final da titulação com EDTA	83
Figura 5.10 – DQO: a) amostras de água misturadas com dicromato de potássio e ácido sulfúrico concentrado, b) amostras em bloco digestor, c) amostra pronta para ser lida.	85

Figura 6.1 – Curva granulométrica do solo arenoso.....	88
Figura 6.2 – Curva granulométrica do solo argiloso	89
Figura 6.3 – Curvas de compactação das misturas solo arenoso - fibras dispersas de papel Kraft.....	95
Figura 6.4 – Curvas de compactação das misturas solo argiloso - fibras dispersas de papel Kraft.....	96
Figura 6.5 – Peso específico seco máximo em função da adição de fibras dispersas de papel Kraft aos dois solos	99
Figura 6.6 – Teor de umidade ótima em função da adição de fibras dispersas de papel Kraft aos dois solos	99
Figura 6.7 – Envoltórias médias de resistência das misturas solo arenoso - fibras dispersas de papel Kraft para ensaios de cisalhamento direto na umidade ótima.....	101
Figura 6.8 – Envoltórias médias de resistência das misturas solo argiloso - fibras dispersas de papel Kraft para ensaios de cisalhamento direto na umidade ótima.....	102
Figura 6.9 – Envoltórias médias de resistência das misturas solo arenoso - fibras dispersas de papel Kraft para ensaios de cisalhamento direto inundado.....	105
Figura 6.10 – Envoltórias médias de resistência das misturas solo argiloso - fibras dispersas de papel Kraft para ensaios de cisalhamento direto inundado.....	105
Figura 6.11 – Envoltórias médias de resistência das misturas solo arenoso - fibras dispersas de papel Kraft para ensaios de cisalhamento direto ruptura aos 28 dias.....	108
Figura 6.12 – Envoltórias médias de resistência das misturas solo argiloso - fibras dispersas de papel Kraft para ensaios de cisalhamento direto ruptura aos 28 dias.....	109
Figura 6.13 – Ângulo de atrito em função da adição de fibras dispersas de papel Kraft ao solo arenoso.....	112

Figura 6.14 – Coesão em função da adição de fibras dispersas de papel Kraft ao solo arenoso	112
Figura 6.15 – Ângulo de atrito em função da adição de fibras dispersas de papel Kraft ao solo argiloso	113
Figura 6.16 – Coesão em função da adição de fibras dispersas de papel Kraft ao solo argiloso.....	113
Figura 6.17 – Tensão vertical vs. Deformação específica das misturas solo arenoso - fibras dispersas de papel Kraft para ensaios de compressão simples	119
Figura 6.18 – Tensão vertical vs. Deformação específica das misturas solo argiloso - fibras dispersas de papel Kraft para ensaios de compressão simples	119
Figura 6.19 – Tensão vertical vs. Deformação específica das misturas solo arenoso - fibras dispersas de papel Kraft para ensaios de compressão simples com ruptura aos 28 dias.....	122
Figura 6.20 – Tensão vertical vs. Deformação específica das misturas solo argiloso - fibras dispersas de papel Kraft para ensaios de compressão simples com ruptura aos 28 dias.....	123
Figura 6.21 – Resistência à compressão simples em função da adição de fibras dispersas de papel Kraft ao solo arenoso	126
Figura 6.22 – Módulo de elasticidade inicial em função da adição de fibras dispersas de papel Kraft ao solo arenoso.....	126
Figura 6.23 – Resistência à compressão simples em função da adição de fibras dispersas de papel Kraft ao solo argiloso.....	127
Figura 6.24 – Módulo de elasticidade inicial em função da adição de fibras dispersas de papel Kraft ao solo argiloso	127

Figura 6.25 – Resistência à compressão simples em função da adição de 5% de fibras dispersas de papel Kraft ao solo arenoso quando aplicadas idades de rompimento de 0, 28 e 60 dias.....	130
Figura 6.26 – Resistência à compressão simples em função da adição de 5% de fibras dispersas de papel Kraft ao solo argiloso quando aplicadas idades de rompimento de 0, 28 e 60 dias.....	131
Figura 6.27 – pH das águas percoladas em função da adição de fibras dispersas de papel Kraft aos dois solos	135
Figura 6.28 – Condutividade elétrica das águas percoladas em função da adição de fibras dispersas de papel Kraft aos dois solos	135
Figura 6.29 – Cor aparente das águas percoladas em função da adição de fibras dispersas de papel Kraft aos dois solos	136
Figura 6.30 – Dureza total das águas percoladas em função da adição de fibras dispersas de papel Kraft aos dois solos	136
Figura 6.31 – Demanda química de oxigênio (DQO) das águas percoladas em função da adição de fibras dispersas de papel Kraft aos dois solos.....	137
Figura B1 – Tensão cisalhante vs. Deformação específica horizontal das misturas do solo arenoso com 0% de fibra - ensaio de CDUO.....	168
Figura B2 – Tensão cisalhante vs. Deformação específica horizontal das misturas do solo arenoso com 5% de fibra - ensaio de CDUO.....	168
Figura B3 – Tensão cisalhante vs. Deformação específica horizontal das misturas do solo arenoso com 10% de fibra - ensaio de CDUO.....	169
Figura B4 – Tensão cisalhante vs. Deformação específica horizontal das misturas do solo arenoso com 15% de fibra - ensaio de CDUO.....	169
Figura B5 – Tensão cisalhante vs. Deformação específica horizontal das misturas do solo arenoso com 0% de fibra - ensaio de CDI	170

Figura B6 – Tensão cisalhante vs. Deformação específica horizontal das misturas do solo arenoso com 5% de fibra - ensaio de CDI	170
Figura B7 – Tensão cisalhante vs. Deformação específica horizontal das misturas do solo arenoso com 10% de fibra - ensaio de CDI	171
Figura B8 – Tensão cisalhante vs. Deformação específica horizontal das misturas do solo arenoso com 15% de fibra - ensaio de CDI	171
Figura B9 – Tensão cisalhante vs. Deformação específica horizontal das misturas do solo arenoso com 0% de fibra - ensaio de CD28	172
Figura B10 – Tensão cisalhante vs. Deformação específica horizontal das misturas do solo arenoso com 5% de fibra - ensaio de CD28	172
Figura B11 – Tensão cisalhante vs. Deformação específica horizontal das misturas do solo arenoso com 10% de fibra - ensaio de CD28	173
Figura B12 – Tensão cisalhante vs. Deformação específica horizontal das misturas do solo arenoso com 15% de fibra - ensaio de CD28	173
Figura B13 – Tensão cisalhante vs. Deformação específica horizontal das misturas do solo argiloso com 0% de fibra - ensaio de CDUO	174
Figura B14 – Tensão cisalhante vs. Deformação específica horizontal das misturas do solo argiloso com 5% de fibra - ensaio de CDUO	174
Figura B15 – Tensão cisalhante vs. Deformação específica horizontal das misturas do solo argiloso com 10% de fibra - ensaio de CDUO	175
Figura B16 – Tensão cisalhante vs. Deformação específica horizontal das misturas do solo argiloso com 15% de fibra - ensaio de CDUO	175
Figura B17 – Tensão cisalhante vs. Deformação específica horizontal das misturas do solo argiloso com 0% de fibra - ensaio de CDI.....	176

Figura B18 – Tensão cisalhante vs. Deformação específica horizontal das misturas do solo argiloso com 5% de fibra - ensaio de CDI.....	176
Figura B19 – Tensão cisalhante vs. Deformação específica horizontal das misturas do solo argiloso com 10% de fibra - ensaio de CDI.....	177
Figura B20 – Tensão cisalhante vs. Deformação específica horizontal das misturas do solo argiloso com 15% de fibra - ensaio de CDI.....	177
Figura B21 – Tensão cisalhante vs. Deformação específica horizontal das misturas do solo argiloso com 0% de fibra - ensaio de CD28.....	178
Figura B22 – Tensão cisalhante vs. Deformação específica horizontal das misturas do solo argiloso com 5% de fibra - ensaio de CD28.....	178
Figura B23 – Tensão cisalhante vs. Deformação específica horizontal das misturas do solo argiloso com 10% de fibra - ensaio de CD28.....	179
Figura B24 – Tensão cisalhante vs. Deformação específica horizontal das misturas do solo argiloso com 15% de fibra - ensaio de CD28.....	179
Figura C1 – Variação volumétrica vs. Deformação específica horizontal das misturas do solo arenoso com 0% de fibra - ensaio de CDUO.....	182
Figura C2 – Variação volumétrica vs. Deformação específica horizontal das misturas do solo arenoso com 5% de fibra - ensaio de CDUO.....	182
Figura C3 – Variação volumétrica vs. Deformação específica horizontal das misturas do solo arenoso com 10% de fibra - ensaio de CDUO.....	183
Figura C4 – Variação volumétrica vs. Deformação específica horizontal das misturas do solo arenoso com 15% de fibra - ensaio de CDUO.....	183
Figura C5 – Variação volumétrica vs. Deformação específica horizontal das misturas do solo arenoso com 0% de fibra - ensaio de CDI.....	184

Figura C6 – Variação volumétrica vs. Deformação específica horizontal das misturas do solo arenoso com 5% de fibra - ensaio de CDI	184
Figura C7 – Variação volumétrica vs. Deformação específica horizontal das misturas do solo arenoso com 10% de fibra - ensaio de CDI	185
Figura C8 – Variação volumétrica vs. Deformação específica horizontal das misturas do solo arenoso com 15% de fibra - ensaio de CDI	185
Figura C9 – Variação volumétrica vs. Deformação específica horizontal das misturas do solo arenoso com 0% de fibra - ensaio de CD28	186
Figura C10 – Variação volumétrica vs. Deformação específica horizontal das misturas do solo arenoso com 5% de fibra - ensaio de CD28	186
Figura C11 – Variação volumétrica vs. Deformação específica horizontal das misturas do solo arenoso com 10% de fibra - ensaio de CD28	187
Figura C12 – Variação volumétrica vs. Deformação específica horizontal das misturas do solo arenoso com 15% de fibra - ensaio de CD28	187
Figura C13 – Variação volumétrica vs. Deformação específica horizontal das misturas do solo argiloso com 0% de fibra - ensaio de CDUO	188
Figura C14 – Variação volumétrica vs. Deformação específica horizontal das misturas do solo argiloso com 5% de fibra - ensaio de CDUO	188
Figura C15 – Variação volumétrica vs. Deformação específica horizontal das misturas do solo argiloso com 10% de fibra - ensaio de CDUO	189
Figura C16 – Variação volumétrica vs. Deformação específica horizontal das misturas do solo argiloso com 15% de fibra - ensaio de CDUO	189
Figura C17 – Variação volumétrica vs. Deformação específica horizontal das misturas do solo argiloso com 0% de fibra - ensaio de CDI.....	190

Figura C18 – Variação volumétrica vs. Deformação específica horizontal das misturas do solo argiloso com 5% de fibra - ensaio de CDI.....	190
Figura C19 – Variação volumétrica vs. Deformação específica horizontal das misturas do solo argiloso com 10% de fibra - ensaio de CDI.....	191
Figura C20 – Variação volumétrica vs. Deformação específica horizontal das misturas do solo argiloso com 15% de fibra - ensaio de CDI.....	191
Figura C21 – Variação volumétrica vs. Deformação específica horizontal das misturas do solo argiloso com 0% de fibra - ensaio de CD28.....	192
Figura C22 – Variação volumétrica vs. Deformação específica horizontal das misturas do solo argiloso com 5% de fibra - ensaio de CD28.....	192
Figura C23 – Variação volumétrica vs. Deformação específica horizontal das misturas do solo argiloso com 10% de fibra - ensaio de CD28.....	193
Figura C24 – Variação volumétrica vs. Deformação específica horizontal das misturas do solo argiloso com 15% de fibra - ensaio de CD28.....	193

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Estudos realizados de solos reforçados com fibras.....	40
Tabela 4.1 – Principais problemas de qualidade de água doce em escala global (Chapman, 1996)	48
Tabela 4.2 – Legislação brasileira sobre águas subterrâneas e outros documentos relacionados.....	55
Tabela 4.3 – Padrões de potabilidade conforme a Portaria MS Nº 2914/2011, a Resolução CONAMA Nº 357/2005 e a OMS.....	56
Tabela 5.1 – Quantidade de golpes e quantidade de solo por camada para cada tipo de solo e mistura no ensaio de compressão simples	74
Tabela 6.1 – Classificação do solo arenoso segundo NBR 6502/95.....	88
Tabela 6.2 – Classificação do solo argiloso segundo NBR 6502/95	89
Tabela 6.3 – Peso específico dos sólidos, D_{50} , D_{60} e granulometria NBR dos solos arenoso e argiloso.....	90
Tabela 6.4 – Valores de Limites de Consistência.....	91
Tabela 6.5 – Identificação dos solos pelas classificações NBR, USCS, AASHTO e MCT	92
Tabela 6.6 – Índice de Atividade das Argilas.....	94

Tabela 6.7 – Peso específico seco máximo ($\gamma_{dm\acute{a}x}$) e teor de umidade ótima ($w_{\acute{o}t}$) dos ensaios de compactação das misturas solo – fibras dispersas de papel Kraft.....	97
Tabela 6.8 – Equações das envoltórias médias de resistência dos ensaios de cisalhamento direto na umidade ótima das misturas solo – fibras dispersas de papel Kraft.....	102
Tabela 6.9 – Ângulo de atrito interno (ϕ) e coesão (c) dos ensaios de cisalhamento direto na umidade ótima das misturas solo – fibras dispersas de papel Kraft.....	103
Tabela 6.10 – Equações das envoltórias médias de resistência dos ensaios de cisalhamento direto inundado das misturas solo – fibras dispersas de papel Kraft.....	106
Tabela 6.11 – Ângulo de atrito interno (ϕ) e coesão (c) dos ensaios de cisalhamento direto inundado das misturas solo – fibras dispersas de papel Kraft.....	106
Tabela 6.12 – Equações das envoltórias médias de resistência dos ensaios de cisalhamento direto aos 28 dias das misturas solo – fibras dispersas de papel Kraft..	109
Tabela 6.13 – Ângulo de atrito interno (ϕ) e coesão (c) dos ensaios de cisalhamento direto com ruptura aos 28 dias das misturas solo – fibras dispersas de papel Kraft....	110
Tabela 6.14 – Deformações específicas referenciais dos valores pico das curvas tensão cisalhante vs. deformação específica horizontal dos ensaios de cisalhamento	115
Tabela 6.15 – Maiores variações volumétricas apresentadas nas curvas variação volumétrica vs. deformação específica horizontal dos ensaios de cisalhamento	116
Tabela 6.16 – Resistência à compressão simples (q_u) e Módulo de elasticidade (E_{50}) dos ensaios de compressão simples na umidade ótima das misturas solo – fibras dispersas de papel Kraft.....	120
Tabela 6.17 – Resistência à compressão simples (q_u) e Módulo de elasticidade (E_{50}) dos ensaios de compressão simples com ruptura aos 28 dias das misturas solo – fibras dispersas de papel Kraft.....	124

Tabela 6.18 – Resistência à compressão simples (q_u) com idades de rompimento de 0, 28 e 60 dias das misturas solo – fibras dispersas de papel Kraft.....	130
Tabela 6.19 – Resultados das análises físico-químicas das águas percoladas	134
Tabela 6.20 – Variáveis otimizadas no solo argiloso.....	144
Tabela A.1 – Resumo dos cálculos dos ensaios mini-MCV para o solo arenoso.....	161
Tabela A.2 – Resumo dos cálculos dos ensaios mini-MCV para o solo argiloso	164

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

A	Índice de atividade da argila
AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
c	Coesão
CaCO ₃ /L	Carbonato de cálcio por litro
CC	Coeficiente de curvatura
CDI	Cisalhamento direto inundado
CDUO	Cisalhamento direto na umidade ótima
CD28	Cisalhamento direto com ruptura aos 28 dias
CE	Condutividade elétrica
CNU	Coeficiente de não uniformidade
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CSUO	Compressão simples na umidade ótima
CS28	Compressão simples com ruptura aos 28 dias
CV	Coeficiente de variação
D	Diâmetro da partícula
D ₁₀	Diâmetro efetivo 10%
D ₅₀	Diâmetro 50%
D ₆₀	Diâmetro 60%
DQO	Demanda química de oxigênio
EDTA	Ácido Etilenodiaminotetracético
E ₅₀	Módulo de Elasticidade para 50% da deformação da tensão máxima
FEC	Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo
IP	Índice de plasticidade

K	Coeficiente de permeabilidade
k_{20°	Coeficiente de permeabilidade corrigido à temperatura de 20 °C
LC	Limite de contração
LL	Limite de liquidez
LP	Limite de plasticidade
MCT	Miniatura Compactada Tropical
MCV	Moisture Condition Value
MS	Ministério da Saúde
OMS	Organização Mundial da Saúde
pH	Potencial hidrogeniônico
q_u	Resistência à compressão simples
Sd	Desvio padrão
SMEWW	Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater
UH	Unidade Hazen
USCS	Unified Soil Classification System
VMP	Valor máximo permitido
VMR	Valor máximo recomendado
WHO	World Health Organization
$w_{ót}$	Teor de umidade ótima
$\Delta\sigma$	Tensão vertical
ΔV	Variação volumétrica
ϵ_{hi}	Deformação cisalhante específica horizontal
ϵ_i	Deformação específica
ϕ	Ângulo de atrito interno do solo
$\gamma_{dmáx}$	Peso específico aparente seco máximo
γ_s	Peso específico dos sólidos
λ	Comprimento de onda dominante
σ	Tensão normal
τ	Tensão cisalhante

1. INTRODUÇÃO

1.1. Contextualização do Estudo

Dentre os mais sérios problemas contemporâneos, enfrentados pela gestão ambiental, pode-se destacar o impacto da geração de resíduos sólidos dos vários processos de produção e seu potencial para reciclagem, provocado pela Indústria da Construção Civil. Embora seja possível e prioritário reduzir a quantidade de resíduos durante a produção e até pós-consumo, eles sempre serão gerados.

A construção civil é certamente o maior gerador de resíduos de toda a sociedade e seu impacto ambiental está associado ao uso intensivo de matérias-primas naturais não renováveis, além de um grande volume de resíduos gerados e não aproveitados totalmente.

O desenvolvimento de tecnologias ambientalmente eficientes e seguras para reciclagem de resíduos que resultem em produtos com desempenho técnico adequado e que sejam economicamente competitivas nos diferentes mercados é um desafio técnico importante.

Dentre os materiais descartados das construções encontram-se os sacos de cimento feitos de papel Kraft natural multifolhado (constituído por material com boas características físicas e mecânicas) que, geralmente, após a utilização do cimento não são reaproveitados ou reciclados pelas empresas de reciclagem por estar contaminados com cimento, gerando assim um enorme volume deste material (BUSON, 2009).

Ao considerar que cada embalagem dos sacos de 50 kg de cimento tem uma massa média de 150g e considerando os milhões de toneladas de produção mundial de cimento, podem-se imaginar as toneladas produzidas de papel Kraft que são descartados e depositados na natureza sem qualquer tratamento.

Na maioria das regiões brasileiras o consumo de cimento ensacado é maior que o de cimento a granel, o qual demonstra que é relevante e necessária sua reciclagem.

As especificações técnicas de produção exigem uma celulose sulfato de fibra longa e de alta resistência, que é geralmente empregada pura (provenientes de celulose de madeira ou de celulose de bambu) e garante à sua fibra excelentes propriedades físicas e mecânicas.

Estes materiais, contudo, possuem características importantes e poderiam ser úteis do ponto de vista geotécnico, pois muitas vezes o solo de um determinado local não apresenta condições adequadas para a aplicação em construções. Este solo pode ser pouco resistente, muito compressível ou apresentar características que deixam a desejar do ponto de vista econômico. Nestes casos o engenheiro geotécnico deverá tomar uma das seguintes três decisões:

- Aceitar o material tal e como se encontra, e efetuar o projeto de acordo com as restrições impostas pela qualidade do solo;
- Remover e descartar o solo do lugar e substituí-lo por um solo de características adequadas; ou,
- Alterar ou mudar as propriedades do material existente com a finalidade de obter um material que reúne características adequadas aos requisitos impostos, ou pelo menos que a qualidade obtida seja adequada.

O uso da estabilização não está associado somente a uma medida corretiva, mais do que isso, a uma medida preventiva ou de segurança contra condições adversas que se desenvolvem durante a construção ou durante a vida da estrutura.

Neste sentido, propõe-se neste trabalho um método de estabilização que consiste na adição de fibras dispersas de papel Kraft provenientes da reciclagem de embalagens de cimento para avaliar quais propriedades do solo melhoram ao nível desejado, através da realização dos diversos ensaios laboratoriais, esperando que a melhora principal da mistura seja a resistência.

O desenvolvimento desta pesquisa está associado à análise dos teores de fibras dispersas de papel Kraft adequados para se utilizar no intuito de promover melhoria das propriedades dos solos analisados, por meio de ensaios laboratoriais, sendo analisados também, os efeitos destes resíduos sobre tais solos quando percolado (ex: contaminação do lençol freático).

1.2. Objetivos

1.2.1. Geral

O objetivo geral deste trabalho é verificar a hipótese de que as fibras dispersas de papel Kraft, provenientes da reciclagem de sacos de cimento, podem ser utilizadas como estabilizantes para melhorar as características e propriedades dos solos, com a finalidade de obter o provável teor ótimo de fibras dispersas para o solo que apresente melhorias significativas, comparando o comportamento da mistura com os solos sem fibra. Estes resultados fornecerão subsídios para o desenvolvimento de futuras pesquisas sobre novos métodos de estabilização de solos, ou mesmo deste método com outros tipos de solos.

1.2.2. Específicos

De modo a atingir o objetivo principal foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Realizar ensaios de laboratório para caracterização e obtenção de parâmetros geotécnicos de dois tipos de solos (arenoso e argiloso), além de ensaios de compactação, cisalhamento direto (umidade ótima, inundado e com ruptura aos 28 dias), compressão simples (umidade ótima e com ruptura aos 28 dias) e permeabilidade.
- Complementar o trabalho de Buson (2009) nos aspectos relativos ao processo da reciclagem dos sacs de cimento bem como ao preparo das misturas com os solos.
- Comparar o comportamento dos solos estabilizados com as fibras dispersas de papel Kraft com os solos sem fibra, avaliando estatisticamente os resultados obtidos a fim de determinar diferenças significativas quando adicionadas as fibras.
- Realizar ensaios preliminares das características físicas e químicas das águas percolando pelas misturas estudadas que, no caso, poderiam se infiltrar no lençol freático e contaminá-lo, produzindo grandes impactos no meio ambiente.
- Determinar qual dos solos avaliados responde melhor ao tratamento com fibras dispersas de papel Kraft, no que se refere à resistência, e, portanto, o melhor para aplicar a técnica.
- Determinar o provável teor ótimo de fibras dispersas de papel Kraft que deve ser adicionado ao solo que apresente melhorias significativas para obter as modificações ótimas das propriedades do solo.

1.3. Contribuição do presente estudo

Com base nos resultados obtidos será elaborado um banco de dados com os resultados dos ensaios para cada tipo de solo e respectivas misturas, complementando a metodologia proposta (solo – fibras dispersas de papel Kraft) para os dois solos

avaliados (arenoso e argiloso) e, por sua vez, uma completa caracterização geotécnica dos solos naturais.

Será determinado o solo que apresenta notáveis melhorias na resistência e outras propriedades de importância quando misturado com a fibra (por meio de testes estatísticos) e, portanto, o provável teor ótimo de fibra para obter as melhores características da mistura quanto à resistência.

Espera-se com esta pesquisa inovar nas técnicas de estabilização de solos e fornecer subsídios para o desenvolvimento de futuras pesquisas e, à sua vez, reduzir a quantidade de embalagens de cimento provenientes das construções e descartadas na natureza sem nenhum tratamento nem aproveitamento.

Além disso, espera-se contribuir com a importância da qualidade de água, através dos resultados preliminares sobre a composição física e química da água percolando pelas misturas estudadas que, no caso, poderiam se infiltrar no lençol freático e contaminá-lo.

1.4. Estrutura do trabalho

O presente capítulo introduz a necessidade de melhorar as propriedades dos solos através da estabilização e a problemática do impacto ambiental dos resíduos da construção civil. Também são citados neste capítulo os objetivos gerais e específicos, bem como a contribuição e estrutura do trabalho.

Em seguida são abordados os aspectos relacionados à contaminação de resíduos da construção e os conceitos de sustentabilidade do projeto, no capítulo 2.

No capítulo 3 são discutidas técnicas clássicas e atuais de estabilização de solos.

No capítulo 4 se apresenta uma abordagem sobre a importância da qualidade de água e a contaminação do lençol freático, bem como da legislação brasileira que estabelece os padrões de qualidade de água.

No capítulo 5 são apresentados os materiais e métodos, incluindo os procedimentos, equipamentos e materiais utilizados nos estudos e análises para definição do processo de reciclagem e mistura do solo com fibras dispersas de papel Kraft, bem como para a preparação e execução dos ensaios propostos.

O capítulo 6 consiste na apresentação e análise dos resultados, abordando a caracterização dos dois solos estudados e as comparações dos solos com a adição de fibras em todos os ensaios propostos, incluindo as análises físico-químicas das águas percoladas.

No capítulo 7 são apresentadas as conclusões do trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

Por fim, o capítulo 8 contém as referências bibliográficas e ao final, os anexos.

2. RESÍDUOS SÓLIDOS

O consumo de bens e serviços gera, de alguma maneira, resíduos. Assim, uma vez produzido, este material permanecerá no ambiente como um passivo, mesmo que seja reutilizado e reciclado inúmeras vezes; daqui a importância de evitar o consumismo e priorizar a redução da quantidade de lixo produzido (MANSOR et. al., 2010).

A reciclagem de resíduos sólidos vem sendo crescentemente debatida e impulsionada enquanto alternativa de ação à disposição da sociedade diante da crise ambiental reconhecida, devido a razões de natureza ambiental, pedagógica e cultural como: a crescente poluição ambiental que atinge o solo, o ar, os rios e os mares; a escassez e os custos crescentes da energia; os custos e o eventual esgotamento das matérias-primas; as dificuldades e magnitude dos investimentos requeridos para captação de água potável; a escassez e altos custos de aterros sanitários e incineradores; e, não menos importante, o interesse social em se envolver a população em um esforço coletivo na salvaguarda dos interesses ambientais (CALDERONI, 2003).

2.1. Aproveitamento dos resíduos sólidos

A importância do aproveitamento de resíduos deve-se basicamente a dois fatores: a possibilidade de desenvolvimento de materiais de baixo custo a partir de subprodutos industriais, disponíveis localmente, através da investigação de suas potencialidades; e, a interface direta do setor da construção com a cadeia produtiva fornecedora de insumos e diretamente através do potencial uso de materiais e processos que causem mínimo impacto na cadeia produtiva (ROCHA E CHERIAF, 2003).

O governo do Estado de São Paulo tem melhorado seu desempenho em relação ao tratamento e à disposição de resíduos sólidos domiciliares. Assim, atividades como reduzir a geração de lixo, reutilizar materiais quando possível e reciclá-los passaram a integrar a agenda do Estado, trazendo novos desafios como a redução drástica da dispersão de resíduos no meio ambiente através da reciclagem e a diminuição de quantidade de massa de resíduos destinada a aterros (MANSOR et. al., 2010).

Assim, conscientes da importância da diminuição de resíduos sólidos e o desenvolvimento da legislação para tratamento desses resíduos, pode-se dizer que há necessidade de desenvolver, no setor de construção civil, processos e tecnologias construtivas que não causem danos ao meio ambiente e ao homem.

Segundo Rocha e Cheriaf (2003), a Indústria da Construção Civil apresenta viabilidade para incorporar resíduos industriais nos materiais de construção e reduzir custos dos produtos de construção. Hoje em dia, o desenvolvimento tecnológico de processos associados à reciclagem de resíduos industriais tem muita importância. Assim, cada vez mais, tem-se realizado estudos sobre o aproveitamento de resíduos sólidos como novos materiais, devido ao aumento no seu descarte e aos problemas da exaustão de matérias-primas naturais; esses estudos podem reduzir o impacto ambiental dos resíduos e viabilizar a redução de custos industriais e criação de novos empregos.

Há uma política visando reduzir a eliminação direta de resíduos em aterros industriais ou sanitários; por isso, a legislação ambiental impulsiona o desenvolvimento de produtos para a construção civil com resíduos incorporados (BUSON, 2009). Mas, apenas uma quantidade desses resíduos vem recebendo tratamento ou destinação adequada, ficando uma parcela armazenada nas próprias instalações onde foram gerados que poderia ser avaliada e identificada como fonte de matéria-prima para a construção civil (ROCHA e CHERIAF, 2003).

Calderoni (2003) cita que as definições de lixo, resíduo, e reciclagem diferem conforme a situação em que são aplicadas. O lixo é todo material considerado como

inútil ou cuja existência em dado meio é tida como nociva. O resíduo é todo material sobrando das atividades produtivas, geralmente industrial.

Em algumas situações os conceitos de resíduo, lixo e rejeito são equivalentes. Assim, Boscov (2008) cita que resíduo é definido como qualquer matéria descartada ou abandonada ao longo de atividades industriais, comerciais, domésticas ou outras; ou ainda como produtos secundários para os quais não há demanda econômica e para os quais é necessária disposição.

Hiwatashi (1998) acrescenta a informação de que o Compromisso Empresarial para Reciclagem – CEMPRE – define lixo como aquilo que não tem valor comercial. Mas, na atualidade, grande parte dos resíduos é reaproveitada, reutilizada ou reciclada, passando a ter novamente valor comercial, portanto, pouca coisa rejeitada seria chamada de lixo.

Ainda conforme a autora, reciclagem é o resultado de um processo através do qual os materiais que se tornariam lixo, ou estão no lixo, são separados, coletados adequadamente, triados e processados ou tratados para serem utilizados como matéria-prima pela Indústria, envolvendo uma série de agentes e atividades sem os quais não seria viável a recuperação do resíduo.

A reciclagem consiste em transformar os materiais que compõem os resíduos, por meio da alteração de suas características físico-químicas, em novos produtos. Considerando as suas características e composição, o resíduo pode ser reciclado para ser posteriormente utilizado na fabricação de novos produtos, concebidos com a mesma finalidade ou com finalidade distinta da original (MANSOR et. al., 2010).

Segundo a norma ABNT NBR 10004/04, os resíduos nos estados sólido e semi-sólido são aqueles que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ainda segundo a norma em menção, os resíduos são classificados quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde humana (periculosidade de um resíduo) como segue: Classe I (perigosos) e Classe II (não perigosos), esta última classe ainda é subdividida em Classe II A (não inertes) e Classe II B (inertes); os resíduos de papel e papelão

pertencem à classe II A com a codificação A006, por possuir propriedades como biodegradabilidade e combustibilidade.

Conforme Marson et. al. (2010), a Política Estadual de Resíduos Sólidos – PERS –, estabelecida pela Lei Estadual N° 12300/06 e regulamentada pelo Decreto N° 54645/09, define as seguintes categorias de resíduos sólidos para fins de gestão e gerenciamento: Resíduos urbanos (provenientes de residências e estabelecimentos comerciais); Resíduos industriais (provenientes de atividades industriais, mineração e estações de tratamento); Resíduos de serviços de saúde (provenientes de atividades médico-assistencial humana e animal); Resíduos de atividades rurais (provenientes da atividade agropecuária); Resíduos provenientes de portos, aeroportos, terminais rodoviários e ferroviários, postos de fronteira e estruturas similares; e, Resíduos da construção civil (provenientes de obras de construção civil e afines).

Os resíduos sólidos da construção, também chamados resíduos de construção e demolição, são aqueles oriundos das atividades de construção, incluindo novas obras, reformas, demolições e limpeza de terrenos (BOSCOV, 2008).

Conforme a Resolução CONAMA N° 307 de 17 de julho de 2002, alterada pelas resoluções 448/12, 431/11 e 348/04 que estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil, a reciclagem é o processo de reaproveitamento de um resíduo, após ter sido submetido à transformação. Ainda conforme a norma em menção, os resíduos da construção civil são classificados em quatro classes: Classe A (resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados); Classe B (resíduos recicláveis para outras destinações); Classe C (resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem ou recuperação); e Classe D (resíduos perigosos oriundos do processo de construção). O papel Kraft dos sacos de cimento (papel) encontra-se na classe B.

Hendriks et. al. (2007) ressalta que o conceito de reciclagem relaciona-se ao ciclo 'novo-velho-novo' e implica uma série de operações como são: coleta, desmonte,

tratamento e conseqüentemente volta ao fabricante original que o torna novo, mas como um material secundário.

Então, a reciclagem se relaciona ao ciclo de utilização de um material que uma vez tornado velho pode-se tornar novamente em novo. Esse conceito fundamenta-se na gerência ambiental, social e econômica de recursos naturais, visando à gerência do ciclo de vida de materiais. Baseia-se em um dos pilares da política ambiental, conhecida como *“integral chain management”* ou gerência de cadeia integrada ou gerência do ciclo de vida dos materiais de construção, que inclui a cadeia de produção, construção, demolição, reuso ou reciclagem e disposição (HENDRIKS et. al., 2007). Essa gestão e gerenciamento implicam na redução do uso de recursos naturais (fontes de energia e matéria-prima) e em mantê-los no ciclo de vida de produção o máximo de tempo possível, o qual enfatiza a importância da fase de projeto no processo construtivo que é visto como um processo de reciclagem (BLUMENSCHHEIN, 2004).

Não existem dados consolidados e confiáveis sobre a geração de resíduos industriais e muito menos do impacto causado, mesmo para uma indústria que apresente um sistema de gestão de resíduos. Os custos associados à prática de gestão de resíduos são parte fundamental na avaliação de viabilidade econômica da reciclagem e no desenvolvimento de alternativas de reciclagem (JOHN e ÂNGULO, 2003). A reciclagem de resíduos pode causar impactos ao meio ambiente que precisam ser adequadamente gerenciados. Assim, variáveis como tipo de resíduo, tecnologia empregada, e utilização proposta para o material reciclado, podem tornar o processo de reciclagem ainda mais impactante do que o próprio resíduo o era antes de ser reciclado (ÂNGULO et. al., 2001).

A transformação de um resíduo em um produto comercial efetivamente utilizado pela sociedade oferece grandes oportunidades para aumentar a sustentabilidade social e ambiental, mas oferece também significativos riscos ambientais, técnicos e financeiros e para a saúde dos trabalhadores (JOHN e ÂNGULO, 2003).

John et. al. (2003) ressaltam que a aplicação do resíduo deve ser feita em função das características do resíduo e não em torno de ideias pré-concebidas, pois a

aplicação adequada para cada resíduo dependerá do melhor aproveitamento das suas características físico-químicas com menor impacto ambiental dentro de um mercado específico onde o produto reciclado possui boas condições de competição com um produto convencional.

As decisões arquitetônicas e construtivas deveriam ter sempre presente a gestão e gerenciamento de resíduos sólidos, ou seja, a busca e especificação de materiais e técnicas potencialmente sustentáveis. Assim, os projetos deveriam considerar a análise do ciclo de vida dos materiais de construção que tenha a ver com o consumo de energia (pouca energia é o ótimo) e o grau de reciclabilidade (alto grau é ótimo); e, ao mesmo tempo, desenvolver técnicas construtivas que proporcionem pouco desperdício de materiais, prevendo assim a quantidade de produtos que podem ser gerados a partir dos resíduos (BUSON, 2009; MANSOR et. al., 2010).

Buson (2009) ressalta que nos processos construtivos sempre existe alguma etapa de produção de resíduos, ou seja, descarte ou desperdício de materiais. Assim, a racionalização dos processos construtivos, a gestão de qualidade e a modulação de projeto, materiais e componentes seriam algumas soluções para reduzir a produção desses resíduos.

Todo projeto construtivo deveria incluir uma avaliação sobre a possível utilização dos resíduos industriais produzidos na sua execução, especialmente aqueles resíduos que se encontrem perto do local da obra. Na construção é possível aproveitar grandes quantidades de resíduos industriais com um adequado gerenciamento e gestão destes (MATEOS, 2006).

Um processo de pesquisa e desenvolvimento de técnicas para reciclagem de resíduo que sejam viáveis no mercado é uma tarefa muito complexa, pois envolve conhecimento de ciências de materiais, ambientais, de saúde, econômicas, marketing, legais e sociais, além da avaliação de desempenho do produto em um cenário de trabalho multidisciplinar (JOHN e ÂNGULO, 2003).

2.2. Aspectos importantes sobre os sacos de cimento

Um dos mais sérios problemas contemporâneos, enfrentados pela gestão ambiental, é o impacto da geração de resíduos sólidos dos vários processos de produção e seu potencial para reciclagem, provocado pela Indústria da Construção Civil (BLUMENSCHHEIN, 2001).

A baixa cobertura de serviços de coleta e a situação precária das áreas destinadas à disposição final do lixo urbano tornam urgente a implantação de políticas que diminuam o volume dos resíduos sólidos produzidos pela Indústria da Construção Civil. Ao mesmo tempo, faz-se necessário, viabilizar soluções para o problema da disposição, como o fortalecimento dos processos de reciclagem e a reutilização de produtos. O mau gerenciamento desses resíduos contribui para o acelerado esgotamento das áreas de disposição final, os custos adicionais de governos e o desperdício de recursos naturais não renováveis (BLUMENSCHHEIN, 2004).

A reciclagem de resíduos da construção e demolição como material de construção civil vem da antiguidade. Seu emprego foi iniciado na Europa após a segunda guerra mundial. A preocupação com reciclagem de resíduos é relativamente recente no Brasil, especialmente se comparada com países europeus onde a fração reciclada pode atingir cerca de 90% (ampla prática de reciclagem), como é o caso da Holanda (HENDRIKS et. al., 2007; JOHN e AGOPYAN, 2000).

A construção civil é certamente o maior gerador de resíduos de toda a sociedade. O volume de entulho de construção e demolição gerado é até duas vezes maior que o volume de lixo sólido urbano. Em São Paulo o volume de entulho gerado é de 2500 caminhões por dia (RECICLAGEM DE RESÍDUOS PARA CONSTRUÇÃO, 2013). Os resíduos de construção são geralmente constituídos de: solos, materiais cerâmicos, materiais metálicos e materiais orgânicos (JOHN e AGOPYAN, 2000). Dentre os materiais orgânicos dos resíduos da construção encontram-se os sacos de cimento feitos de papel Kraft natural multifolhado, os quais, geralmente, não são reaproveitados ou reciclados após o seu uso nas obras por estar contaminados com cimento, gerando assim um enorme volume desse resíduo (BUSON, 2009).

A contaminação provocada pelos produtos ensacados (ex.: cimento, adubos, rações e produtos químicos em geral) está intimamente vinculada à baixa taxa de recuperação dos sacos multifolhados. Estas contaminações exigem procedimentos e cuidados adicionais aos processos de reciclagem desse material (TAVES et. al., 2001 Apud. BUSON, 2009).

Do ponto de vista técnico, as possibilidades de reciclagem dos resíduos variam de acordo com a sua composição: quase a totalidade da fração cerâmica pode ser beneficiada como agregado com diferentes aplicações; a fração metálica é aproveitada como sucata; para as demais frações, especialmente madeira, embalagens e gesso, ainda não se dispõe de tecnologia de reciclagem (JOHN e AGOPYAN, 2000).

A produção mundial de cimento em 2010 foi de 3.344 milhões de toneladas. Nesse mesmo ano, o Brasil foi o sexto maior produtor mundial de cimento (59,2 milhões de toneladas) e o quarto maior consumidor mundial (60,0 milhões de toneladas), mas respeito à América Latina foi o primeiro produtor, sendo a sua participação de 38,5% da produção total do continente. Em 2011 a produção nacional de cimento foi de 64,1 milhões de toneladas, aumentando em 8% com respeito do ano 2010; desse total 68% foram de cimento ensacado, o que equivale a 43,6 milhões de toneladas (RELATÓRIO ANUAL 2011 – SNIC, 2013).

Ainda conforme o mesmo relatório, em todas as regiões brasileiras o percentual de consumo de cimento ensacado é maior que o de cimento a granel, sendo que a Região Sudeste é a que maior consumidora de cimento no Brasil, aproximadamente 50% de todo o cimento fabricado no país. Do cimento consumido em 2011, tem-se que: na Região Norte do Brasil, 72,8% é ensacado; na Região Nordeste 79,6%; na Região Centro-Oeste 74,4%; na Região Sudeste 63,9%; e na Região Sul 58,2%. Tais percentuais demonstram a viabilidade da reciclagem de sacos de cimento.

A indústria de celulose e papel vem buscando progressivamente minimizar os impactos ambientais de suas atividades. Para tanto, o setor atua constantemente no replanejamento de processos, na redução e no reuso de insumos, bem como na reutilização de resíduos para proteção do solo e na reciclagem de materiais, gerando

outros produtos para as demais cadeias do negócio. O setor de celulose e papel é um tradicional consumidor de produtos de origem renovável. Segundo as empresas que responderam ao questionário, 33 milhões de toneladas de matérias-primas e insumos consumidos em 2010 podem ser consideradas de origem renovável (RELATÓRIO DE SUSTENTABILIDADE 2010 – BRACELPA, 2013).

Ainda segundo o mesmo relatório, o Brasil é o quarto produtor mundial de celulose e nono produtor mundial de papel, o qual faz ter em conta a importância da sustentabilidade como o melhor caminho para gerar e distribuir valor de modo equilibrado entre negócio, sociedade e meio ambiente.

As duas principais fontes de madeira utilizadas para a produção de celulose no Brasil são as florestas plantadas de pinus ou pinheiro (fibra longa) e de eucalipto (fibra curta), responsáveis por mais de 98% do volume produzido; a celulose de fibra longa (originária do pinus) é a utilizada para sacos de embalagem (BRACELPA, 2013). Mas, existem também algumas indústrias que produzem sacos para embalagem de cimento com celulose de bambu, da espécie *Bambusa vulgaris* (bambu comum). O bambu produz celulose de fibra longa; as fibras do bambu se entrelaçam melhor devido à característica de serem longas como as fibras do pinheiro e estreitas como as do eucalipto, conferindo assim excelentes características físicas aos produtos (ex.: papéis) do que as obtidas pelas tradicionais matérias-primas utilizadas na produção de celulose. A celulose de bambu possui muitas vantagens e se destaca pela produção de cartões de alta resistência final com os menores índices de rasgo do mercado, convertendo-a na embalagem mais utilizada em segmentos como cimento, cal, argamassa e gesso. Assim, o papel de bambu tem a mesma qualidade que qualquer outro e suas fibras são muito resistentes, com qualidade igual ou superior à fibra de madeira comum (MANHÃES, 2008).

O Kraft é um papel de embalagem pesada, cuja característica principal é sua resistência mecânica. Dentre os vários tipos encontra-se o papel Kraft natural para sacos multifoldados que é fabricado com pasta química sulfato não-branqueada, essencialmente de fibra longa, geralmente nas gramaturas de 80 a 90 g/m². É altamente resistente ao rasgo e com boa resistência ao estouro, usado essencialmente

para sacos e embalagens industriais de grande porte (Relatório Estatístico 2011/2012– BRACELPA, 2013).

Então, as fibras das embalagens de papel Kraft, provenientes de celulose de madeira ou de celulose de bambu, têm excelentes propriedades físicas e mecânicas. As especificações técnicas de produção exigem uma celulose sulfato de fibra longa e de alto rendimento e resistência.

No ano 2011 foram produzidas no Brasil aproximadamente 337.000 toneladas de papel Kraft natural para sacos multifolhados, o que equivale a 3,3% da produção brasileira de papel (Relatório Estatístico 2011/2012– BRACELPA, 2013). Nem todo esse papel é utilizado para o ensacamento de cimento, mas se fosse o caso representaria 2,2 bilhões de sacos de 50 Kg de cimento por ano.

Considerando que cada embalagem de sacos de cimento de 50 kg tem em média 150 g e as toneladas produzidas dessas embalagens anualmente, pode-se imaginar o grande impacto ambiental ao serem descartadas e depositadas na natureza sem qualquer tratamento.

Devido à reciclagem de sacos de cimento estar inserida no âmbito da Indústria da Construção Civil e considerando que é um tipo de resíduo pouco reaproveitado, esta pesquisa aborda aspectos importantes sobre seu processo de reciclagem e mistura com solos para estabilização, minimizando os impactos ambientais ocasionados pelo descarte deste resíduo.

É importante ressaltar que o papel não pode ser reciclado infinitas vezes, pois as fibras perdem a resistência e as características que definem o tipo de papel (BRACELPA, 2013).

Não se pode ignorar o fato de que no processo de reciclagem são necessários:

- a) energia para transformar o produto ou tratá-lo de forma a torná-lo apropriado a ingressar novamente na cadeia produtiva, a qual depende da utilização proposta para o resíduo e se relaciona diretamente aos processos de transformações utilizados;
- b) materiais ou matérias-primas (quando a energia não é suficiente) para modificar o

resíduo física e/ou quimicamente. Tanto a energia como as matérias-primas utilizadas no processo podem representar um grande impacto para o meio ambiente (ÂNGULO et. al., 2001).

A reciclagem também pode gerar resíduos, os quais nem sempre são tão ou mais simples do que aqueles que foram reciclados, podendo ainda se tornar mais agressivos ao homem e ao meio ambiente do que os resíduos que estão sendo reciclados; a quantidade e características destes novos resíduos vão depender do tipo de reciclagem escolhida. Dependendo de sua periculosidade e complexidade, os novos resíduos podem causar também novos problemas, como a impossibilidade de serem reciclados, a falta de tecnologia para o seu tratamento, a falta de locais para dispô-los e o custo que isto ocasionaria. Daqui a importância de considerar os resíduos gerados pelos materiais reciclados no final de sua vida útil e a possibilidade de serem novamente reciclados (ÂNGULO et. al., 2001).

É muito importante selecionar o tipo adequado de reciclagem para a utilização do resíduo. Assim, o processo de obtenção da polpa de celulose através da trituração do papel Kraft não gera qualquer novo resíduo ou contaminante, pois só é necessário um procedimento de limpeza dos sacos de cimento e filtragem da água utilizada no processo.

3. ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS

A estabilização de um solo consiste em dotá-lo de condições que possam resistir às ações climáticas e aos esforços e desgastes induzidos pelo tráfego, sob as condições mais adversas consideradas no projeto (FRANÇA, 2003).

Nogami e Villibor (1995) definiram a estabilização de solos e materiais relacionados (areia, pedregulho, etc.) “in situ” ou transportado, compactado artificialmente, como sendo a modificação de qualquer propriedade dos solos que melhore seu comportamento mecânico e hídrico quando sob a ação de cargas e das intempéries.

Ainda segundo os autores, a estabilização de um material consiste no seu tratamento mecânico pela adição de pelo menos outro material natural ou artificial com uma ou mais das seguintes finalidades:

- Melhorar propriedades mecânicas e hidráulicas tais como: aumentar a resistência à compressão; diminuir as deformações elásticas e permanentes; aumentar ou reduzir a permeabilidade; diminuir a expansão e reduzir a contração.
- Garantir a permanência das propriedades citadas anteriormente, no decorrer do tempo (durabilidade) mesmo sob a ação de cargas dinâmicas dos veículos.

3.1. Evolução das estabilizações e tipo de estabilizações

Existem referências na literatura de que a prática da estabilização de solos é bastante antiga, inclusive milenar, e tem sido utilizada como recurso técnico na construção civil, ainda em condições primitivas (FRANÇA, 2003).

No decorrer do tempo, foram-se conhecendo os diferentes tipos de solos e como eram afetados com a umidade, surgindo a necessidade de neutralizar os efeitos da água, para o qual foram feitos estudos dos quais se concluiu que a melhoria das propriedades ajuda no desenvolvimento da engenharia dos solos (MORENO, 1996).

O solo, o material natural de construção mais abundante, tem sido utilizado pelo homem para os trabalhos de engenharia desde o princípio da história. Assim, os conceitos básicos de melhoramento, compactação de solos, fundação, reforço e drenagem, foram desenvolvidos há centenas de milhares de anos e permanecem sem modificação (MORENO, 1996).

Na época do império romano se tinham conhecimentos da extensa variedade das propriedades do solo, importância da fase da água e solos adequados para as fundações de grandes obras. No período colonial se reconheceu a importância da água no solo e a utilização de drenagem superficial e subterrânea foi muito comum em trabalhos de engenharia. No período de 1776 a 1876, o maior problema nas construções de estradas era a drenagem adequada; nesta época Coulomb estabeleceu uma teoria de muros de contenção que foi uma das primeiras referências para conhecer a pressão hidrostática. Por sua conta, Alejandro Colin estudava a ação dos deslizamentos e entendeu que a perda da resistência aplicada pela intensidade de laminas de argila era devido à ação da água ou umidade na argila. O período de 1876 a 1976 foi marcado pelo grande avanço na engenharia de fundações; em 1880 a umidade do solo se expressou em porcentagens da massa do solo; em 1911, Atterberg, consciente da necessidade de medir e estudar as propriedades físicas dos solos propôs os testes de limite de liquidez, plástico e contração para classificar os solos; no ano 1920 o maior avance em mecânica dos solos foi a compactação de aterros de ferrovias, desenvolvendo o método de controle de umidade, que à sua vez levou ao

desenvolvimento de ensaios para a determinação da umidade no campo (MORENO, 1996).

Através dos anos até hoje se fizeram muitos estudos sobre as propriedades da argila, como a permeabilidade, adensamento, drenos de areia, controle da umidade para a compactação, etc. A fase da água no sistema solo-água-ar é sempre de principal interesse, pois tem uma grande influência nas propriedades da engenharia geotécnica.

Todas estas considerações levaram ao desenvolvimento de numerosos métodos para estabilização e melhoramento de solos. Assim, as estabilizações de solos são procedimentos que visam à melhoria das características mecânicas e hidráulicas dos mesmos.

3.1.1. Propósito da estabilização

Conforme Moreno (1996), a estabilização de solos tem como propósito melhorar as seguintes propriedades:

a) Estabilidade volumétrica:

Muitos solos sofrem variações volumétricas (expansão e contração) com as mudanças de teor de umidade. Ainda, se as pressões da expansão não são controladas podem ocasionar danos como: levantar os pavimentos, inclinar postes, fissurar muros, quebrar canos de esgoto, etc.

b) Resistência:

Esta propriedade constitui um dos pontos fundamentais da mecânica dos solos. Em geral, o aumento de teor de umidade significa a diminuição da resistência dos solos. Às vezes, resulta difícil incrementar a resistência de um solo através da adição de agentes estabilizantes. Existem várias formas de estabilização utilizadas para melhorar a resistência de alguns solos; assim, com o objeto de melhorar esta propriedade, são utilizados os métodos mecânicos e químicos que serão discutidos mais para frente.

c) Permeabilidade:

É a propriedade do solo de permitir o passe de água e ar. A permeabilidade pode ser afetada por diversos fatores inerentes ao solo e às características da água circulante, como: relação de vazios do solo; temperatura da água; estrutura e estratificação do solo; existência de furos e fissuras no solo; e, grau de saturação. O tamanho e o número dos poros do solo, que tem relação com sua textura e estrutura, interferem na taxa de filtração e na taxa de percolação e, portanto na sua permeabilidade. Quanto mais baixa a umidade de compactação maiores permeabilidades serão produzidas no solo compactado, devido aos grumos não desagregados que resistem ao esforço de compactação e permitem a formação de grandes vazios intersticiais.

d) Compressibilidade:

É a variação volumétrica do solo sob o estado de qualquer carga; neste estado de tensões se produzem deformações do solo que se manifestam em recalques. A compressibilidade influencia as propriedades dos solos, pois modifica a permeabilidade e altera as forças existentes entre as partículas, o qual modifica a resistência ao cisalhamento e produz deslocamentos. A compressão de um solo não é um processo elástico reversível; desta forma, quando o solo é comprimido não volta ao seu estado original, mesmo quando as tensões que produziram a compressão tenham desaparecido. Um coeficiente de compressibilidade alto caracteriza um solo muito compressível, enquanto um coeficiente de compressibilidade baixo corresponde a um solo que tende a grandes mudanças de volume quando aumenta a pressão.

e) Durabilidade:

É a resistência aos processos de desagregação, erosão e abrasão. A durabilidade em pavimentos está relacionada às capas superficiais destes na formação de buracos, erosões nos taludes, cortes e mudanças na textura dos agregados nos asfaltos. Ocasionalmente, erosões profundas internas ocorrem nos aterros ou cortes não só por causa de uma baixa durabilidade, mas também

a uma alta permeabilidade. A baixa durabilidade nos solos estabilizados se deve ao uso de um estabilizante inadequado, à quantidade insuficiente de estabilizante, ou à resistência inadequada contra os ataques da água ou agentes químicos.

3.1.2. Tipos de estabilização

Os mecanismos de estabilização se dividem em três áreas: mecânica, física e química.

3.1.2.1. Estabilização mecânica

A estabilização mecânica de um solo consiste num conjunto de operações “mecânicas” que lhe conferem estabilidade, quando solicitado em pavimentos de estradas. As operações mecânicas são aquelas que apenas modificam o arranjo das partículas, ou a sua granulometria, por meio da subtração ou adição de algumas frações de solos (NASCIMENTO, 1970). Ou seja, as melhorias introduzidas no comportamento do solo originam-se de mudanças no seu sistema trifásico, isto é, nas fases sólida, líquida e gasosa (FRANÇA, 2003).

A estabilização mecânica se restringe a dois métodos para a melhoria das propriedades dos solos: (a) rearranjo das partículas, método conhecido como estabilização por compactação, e (b) adição ou retirada de partículas do solo (correção ou ajuste granulométrico). O primeiro é o mais utilizado e, muitas vezes, é associado à estabilização física e/ou química (SAMPAIO, 2008; FRANÇA, 2003).

Entende-se por compactação o processo manual ou mecânico que visa reduzir o volume de vazios do solo, melhorando as suas características de resistência, deformabilidade e permeabilidade. Assim, a compactação é associada a um processo rápido e brusco que procura alterar a estrutura das partículas de um solo.

3.1.2.2. Estabilização física

Quando as características de estabilidade resultantes de uma aceleração da consolidação não podem ser obtidas mecanicamente ou quando se tornam necessários elevados valores de resistência e rigidez de um solo, devem-se considerar métodos alternativos de estabilização. Neste caso, recorre-se a aditivos ou tratamentos que envolvam reações físicas capazes de modificar as propriedades do solo (CRISTELO, 2001).

Estes tratamentos são a estabilização térmica (afeta na compressibilidade dos solos argilosos, sendo que diminui com o aumento da temperatura) e a estabilização por eletro-osmose (não visa à secagem do solo, mas sim direcionar a percolação da água de forma a provocar um efeito de estabilização), que tem sido alvo de vários testes ao longo dos últimos anos com resultados variáveis. De uma forma geral, são pouco viáveis economicamente, sendo utilizados apenas quando algum tipo de dificuldade impede o recurso a métodos menos dispendiosos (CRISTELO, 2001).

3.1.2.3. Estabilização química

A estabilização química de um solo refere-se às alterações produzidas na sua estrutura pela introdução de certa quantidade de aditivo suficiente para melhorar as propriedades físicas e mecânicas do solo, possibilitando assim seu emprego para fins de projeto (FRANÇA, 2003). Podem ser utilizados vários tipos de aditivos químicos, sendo que as partículas do solo são aglutinadas através de reações químicas e não físicas (CRISTELO, 2001).

Há uma série de aditivos químicos utilizados para melhorar as propriedades dos solos (estabilizantes de solos), desde produtos industrializados até subprodutos ou resíduos industriais. Estes aditivos conferem resistência ao solo por meio da cimentação dos grãos entre si; alguns dos aditivos químicos convencionais são: cal hidratada, cimento Portland, cinzas volantes e emulsão asfáltica (FRANÇA, 2003; SAMPAIO, 2008).

Segundo Correia (1996) apud Cristelo (2001), o tratamento de solos com estes materiais em obras de terraplenagem tem dois objetivos: melhorar solos muito úmidos; e, realizar camadas de solo suficientemente rígidas e estáveis às variações hídricas, capazes de suportar a construção das camadas superiores e ter bom comportamento sob a ação do tráfego.

3.2. Experiências passadas de estabilizações

Em praticamente todas as obras rodoviárias é executada a estabilização mecânica, como parte da rotina para melhorar os comportamentos dos solos. Mas também existe a alternativa da estabilização química quando a mecânica não atende todos os parâmetros solicitados no projeto. Assim, a estabilização química é realizada conjuntamente com a estabilização mecânica para obter ainda melhores resultados.

A seguir, será feita uma breve descrição das estabilizações com aditivos químicos convencionais e não convencionais, bem como solos reforçados com fibras.

3.2.1. Estabilizações com aditivos químicos convencionais

3.2.1.1. Estabilização com cimento Portland (solo-cimento)

Segundo a Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP (2013), o solo-cimento é o material resultante da mistura homogênea, compactada e curada de solo, cimento e água em proporções adequadas. O produto resultante deste processo é um material com boa resistência à compressão, bom índice de impermeabilidade, baixo índice de retração volumétrica e boa durabilidade. Das proporções para a obtenção solo-cimento, o solo é o maior contribuinte e o cimento entra em uma quantidade que varia de 5% a 10% do peso do solo, o suficiente para estabilizá-lo e conferir as propriedades de resistência desejadas para o composto.

O cimento Portland é um dos aditivos mais conhecidos e aplicados na estabilização química, sendo seus principais objetivos a melhoria das características mecânicas e maior estabilidade relativamente à variação do teor de água (CRISTELO, 2001). Assim, as reações de hidratação do cimento são as mais importantes e respondem pela maior parte da resistência final alcançada (FRANÇA, 2003).

Praticamente qualquer tipo de solo pode ser utilizado na mistura, entretanto os solos mais apropriados são os que possuem teor de areia entre 45% e 50%. Somente os solos que contêm matéria orgânica em sua composição não podem ser utilizados (ABCP, 2013).

Nos solos granulares o cimento cria ligações nos contatos intergranulares, garantindo um aumento da parcela resistente relativa à coesão. Nos solos finos, as partículas de solo se aderem aos grãos de cimento formando regiões de material floculado que apresentam ligações oriundas dos fenômenos de cimentação (FRANÇA, 2003).

3.2.1.2. Estabilização com cal (solo-cal)

Segundo a Associação Brasileira dos Produtores de Cal – ABPC (2013), a cal na construção civil é utilizada principalmente na forma hidratada, como componente fundamental no preparo de argamassas de assentamento e de revestimento de grande durabilidade e ótimo desempenho. Também é empregada na construção de estradas, como elemento de estabilização de solos de baixa capacidade de suporte e como aditivo de misturas asfálticas, garantindo maior longevidade ao capeamento das rodovias.

No solo-cal ocorrem reações químicas com a fração fina do solo, as quais têm efeitos nas propriedades do solo como: distribuição granulométrica (floculação); plasticidade (diminuição nas argilas expansivas e aumento nas não expansivas); variação volumétrica (redução da expansibilidade); compactação (maior resistência a

ela); resistência e rigidez (aumento imediato e crescente); melhoria da trabalhabilidade e maior durabilidade (SAMPAIO, 2008).

A dosagem do estabilizante, que depende do objetivo específico da obra, é importante para determinar o nível de melhoria nas propriedades do solo. Assim, a adição de pouco estabilizante (menor grau de tratamento ou solo modificado com cal) faz com que ocorra a fase rápida das reações, ou seja, não há formação dos materiais cimentantes e melhora apenas algumas propriedades do solo; a adição de maior quantidade do estabilizante (maior grau de tratamento ou estabilização com cal) produz mudanças permanentes na estrutura do solo tratado, ou seja, permite desenvolver as reações pozolânicas (BENTO, 2006).

Conforme Bento (2006), outros fatores importantes que interferem na estabilização solo-cal são o tipo de cal utilizada e os tempos de cura estabelecidos, sendo estes fatores diretamente influenciados pela mineralogia dos solos. Assim, a autora menciona experiências de estudos desses fatores como: Gutierrez et. al. (1998); Lovato (2004); Serafini et. al. (2004); Mendonça et. al. (1998).

3.2.1.3. Estabilização com emulsão asfáltica (solo-betume)

Segundo a Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfaltos – ABEDA (2013), as emulsões asfálticas são misturas de cimento asfáltico disperso na fase água, produzidas de um processo mecânico em equipamentos de alta capacidade de cisalhamento, denominados moinhos coloidais. A estabilização solo-betume é o produto resultante da mistura de solos, geralmente locais, com emulsão asfáltica na presença ou não de minerais ativos, em equipamentos apropriados, espalhado e compactado a frio.

Conforme Sampaio (2008), a mistura de solo-emulsão é a junção de solos pulverizados (argila, silte e areia) com água e material betuminoso (emulsão asfáltica) com a finalidade de alterar ou melhorar as propriedades dos solos para apresentarem

características de um material estabilizado para base ou sub-base, impermeabilizando e aumentando seu suporte.

Ao misturar solo, água e emulsão asfáltica começa uma série de processos físicos e químicos que influenciam no comportamento mecânico do solo. Assim, a estabilização solo-betume melhora as características de um solo através da coesão, atrito e impermeabilidade. Então, o material asfáltico tem ação ligante (confere coesão principalmente aos solos arenosos) ou impermeabilizante (confere impermeabilização principalmente aos solos argilosos, cortando as ascensões capilares) ou as duas ao mesmo tempo (MOREIRA, 2010; SAMPAIO, 2008).

O betume tem por finalidade proteger a coesão hidráulica existente nos solos coesivos e evitar a lubrificação entre partículas, impedindo o acesso da água aos agrupamentos de partículas do solo pela vedação de seus poros e desenvolvendo a força coesiva que dá ao conjunto a suficiente estabilidade e, portanto, contribui ao aumento da resistência do solo (MOREIRA, 2010).

Segundo Hamzah (1983) apud Cristelo (2001), as propriedades dos solos estabilizados com emulsão asfáltica são: aumento da resistência à compressão uniaxial; aumento da resistência à compressão e do módulo de elasticidade; redução da densidade máxima; e, redução da susceptibilidade à água.

Algumas experiências sobre o solo-betume no Brasil são as de Soliz (2007) e, Momm (1983), citadas por Sampaio (2008). Além, a mesma autora desenvolveu um estudo sobre o comportamento mecânico e hídrico de solos estabilizados com um tipo específico de emulsão asfáltica (teores de 5, 6 e 7%), realizando diversos ensaios de resistência e caracterização e obtendo bons resultados.

3.2.1.4. Estabilização com cinzas volantes

Conforme Guimarães (2002), a cinza volante (material pozolânico) é um resíduo industrial existente em abundância como refugo nas usinas térmicas a carvão, ou seja, é resultante da queima de terra ou carvão em pó. As cinzas volantes contém sílica

ativa, elemento necessário para o aparecimento de reações entre a cal e o solo na mistura compactada para o pavimento. A reatividade da cinza volante varia de acordo com o carvão que lhe dá origem e o processo de combustão; Embora a mistura com cinza volante possa ser feita no próprio leito da estrada, como a cal, os melhores resultados são obtidos com materiais previamente preparados em usinas centrais.

Existem dois tipos de pozolanas, as naturais e as industriais; as cinzas volantes constituem uma pozolana industrial, possuindo algumas propriedades em comum com certas cinzas vulcânicas ou naturais. As cinzas volantes precisam ser misturadas com um ativador (cal ou cimento Portland), que provê o hidróxido de cálcio requerido para formar um composto cimentado (SAMPAIO 2008; CRISTELO 2001).

Na presença de água os constituintes naturais de cimentação das cinzas volantes reagirão para produzir um material cimentado. Desde que contenha sua própria pozolana, as cinzas volantes não dependem de solos providos de pozolana para reagirem (PARSONS e MILBURN, 2003).

Uma vez que a cal é deficiente em material pozolânico natural, a utilização deste aditivo melhora as propriedades físicas do solo (CRISTELO, 2001). A cal e as cinzas volantes são misturadas em usinas com vários tipos de solos e agregados para formar um notável material para base, capaz de competir com a base granulada de classe I e com o solo-cimento e ainda com certo atrativo econômico (GUIMARÃES, 2002). Contudo, a atividade pozolânica das cinzas volantes depende da sua granulometria; assim, quanto mais fina, mais eficiente a sua ação na estabilização dos solos com cal (CRISTELO, 2001).

3.2.2. Estabilizações com aditivos químicos não convencionais

Nos últimos anos as execuções de obras rodoviárias vêm desenvolvendo-se e aprimorando-se muito no Brasil e devido à importância das estradas no contexto socioeconômico, político e estratégico do país, é necessário que as obras rodoviárias sejam construídas de forma racional e de boa qualidade. Atendendo essas exigências,

começou-se a testar outros tipos de aditivos para estabilizações químicas de solos. Algumas dessas são mencionadas a seguir:

3.2.2.1. Estabilização Solo – Licor negro Kraft

O licor negro Kraft é um resíduo da Indústria de papel e celulose. Sua composição química é muito complexa e depende do tipo de madeira utilizada, da concentração do álcali residual, do tipo de cozimento, entre outros. Sua parte sólida compõe-se de 40% de lignina alcalina, 30% de carboidratos e 5% de acetatos. O teor de substância sólida atinge apenas 16% do seu peso, sendo o restante água de fontes diversas. (VIEIRA, 1994).

Ainda Vieira (1994) relatou que a madeira de *Eucalyptus* sp é transformada em polpa Kraft, quando, aproximadamente 50% do seu peso é dissolvido em uma solução cáustica, compondo o mais importante subproduto interno na fabricação de celulose, o licor negro residual. O processo Kraft consiste no cozimento dos cavacos de madeira, em forte solução alcalina de soda cáustica e sulfeto de sódio, com o objetivo de facilitar a separação das fibras, pela dissolução de lignina. No trabalho do autor estudaram-se os efeitos da adição do licor negro Kraft a dois solos nos teores de 0,25, 0,50, 1, 2 e 4% de sólidos presentes no licor, por peso de solo seco. A energia de compactação foi a do Proctor normal para a realização dos ensaios de compactação, CBR e resistência à compressão não-confinada, observando-se que com o acréscimo do teor de licor negro houve um decréscimo do peso específico máximo e aumento de teor de umidade ótimo; assim, a mistura solo-licor negro Kraft não proporcionou aumentos significativos na resistência mecânica e na maioria das misturas ocorreu decréscimo da resistência mecânica em relação ao solo natural.

3.2.2.2. Estabilização Solo – DS-328

O DS-328 é um líquido de cor verde solúvel em água que foi desenvolvido, exclusivamente, para a estabilização de solos, sendo um composto metalo-orgânico

que atua nas partículas finas do solo, ou seja, que na sua composição existem duas substâncias: um mineral e outra orgânica. O DS-328 pode ser utilizado com ou sem neutralizantes e no caso de se utilizar neutralizantes, podem ser diferentes compostos químicos que formam reações de neutralização ou salinização ao atuar com o DS-328; assim, o fabricante recomenda como neutralizantes: o cimento, a cal hidratada, o sulfato de alumínio e o hidróxido de cálcio úmido (VAILLANT, 1995).

O aditivo químico DS-328 é indicado para tratamento de solos na execução de camadas de reforço de subleito, de sub-bases e bases. Vaillant (1995) estudou os efeitos da adição do DS-328 a dois solos nas dosagens de 1:500, 1:1000, 1:1500 e 1:2000, entendendo-se por dosagem 1:1000 a proporção de 1 kg de DS-328 para 1000 kg de solo seco. A energia de compactação foi a do Proctor intermediário para a realização dos ensaios compactação, CBR e resistência à compressão não-confinada, observando-se que nos parâmetros de compactação não houve alterações significativas e o ganho de resistência mecânica dependeu do tipo de solo, do neutralizante utilizado e do tempo de cura.

3.2.2.3. Estabilização Solo – Vinhoto ou Solo – Vinhaça

O vinhoto ou vinhaça é um dos resíduos gerados na produção de açúcar e álcool caracterizados por serem altamente poluidores. É um líquido de coloração clara, escurecendo-se à medida que se oxida pela exposição ao ar. É o mais preocupante dos resíduos da produção de açúcar e álcool, devido à sua elevada acidez alta temperatura e alto índice de DBO (demanda bioquímica de oxigênio); cabe ressaltar que a DBO de 1 litro de vinhoto é 100 vezes superior à de igual volume de esgoto doméstico (FERRAZ, 1994).

Ferraz (1994) estudou os efeitos da adição do vinhoto “in natura” a dois solos, com dosagens de 20, 40, 60 e 80% de vinhoto, em relação à quantidade total de líquido a se adicionar ao solo. Essa metodologia foi utilizada pela maior facilidade no procedimento de dosagem, uso de vinhoto “in natura” e pelo fato deste produto ser muito solúvel em água. A energia de compactação foi a do Proctor normal para a

realização dos ensaios compactação, CBR e resistência à compressão não-confinada, observando-se que houve uma tendência de queda no teor ótimo de umidade e um ligeiro acréscimo no peso específico seco máximo, com o aumento de teor de vinhoto; assim, com adição de vinhoto ao solo não se observou melhoria substancial na resistência mecânica das misturas.

Rolim (1996) fez uma avaliação físico-mecânica do solo-vinhaça concentrada e sua utilização para fins de fabricação de tijolos, e os resultados obtidos servem para estabilização de solos. No trabalho do autor estudaram-se os efeitos da adição da vinhaça concentrada a 19% de sólidos totais a dois solos (argiloso e arenoso) nos teores de 12, 16 e 20% por peso de solo seco. Utilizando a energia de compactação Proctor normal nos ensaios realizados, o autor observou que com o acréscimo do teor de vinhaça concentrada houve um aumento do peso específico seco máximo e decréscimo de teor de umidade; assim, a mistura solo-vinhaça concentrada proporcionou aumentos significativos na resistência mecânica com o acréscimo do teor de vinhaça e de idade de cura no solo arenoso.

3.2.2.4. Estabilização Solo – RBI Grade 81

O RBI Grade 81 é um estabilizante químico desenvolvido na África do Sul, em 1990. Sendo fabricado em Israel e comercializado em embalagens de 25 kg. Este estabilizante foi utilizado em países como África do Sul, Itália, Espanha, Portugal e Namíbia, tendo sido testado em uma gama de solos que variam de muito plástico (solos argilosos) a não-plástico (solos arenosos). Os resultados dos ensaios revelaram que houve significativos ganhos de resistência mecânica e durabilidade. Sendo que, o procedimento de mistura de solo e RBI é semelhante ao das misturas com cal, cimento ou betume (FRANÇA, 2003).

França (2003) estudou, para fins rodoviários, o efeito da adição do RBI Grade 81 a quatro tipos de solos. Estudaram-se os efeitos da adição do RBI Grade 81 a quatro solos nos teores de 2, 4 e 6% por peso de solo seco e com os períodos de cura de 1, 7 e 28 dias, possibilitando observar a influência do teor de aditivo, da energia de

compactação e do período de cura no comportamento mecânico das misturas. Utilizando as energias de compactação Proctor intermediário e modificado nos ensaios de compactação, CBR e resistência à compressão não-confinada, observou-se que com o acréscimo do teor de RBI Grade 81 houve um decréscimo do peso específico seco máximo e aumento de teor ótimo de umidade; assim, a mistura proporcionou aumentos significativos na resistência mecânica com o acréscimo do teor de aditivo e do período de cura.

3.2.2.5. Estabilização Solo – Cinza de casca de arroz e Cal

A planta de arroz, durante seu crescimento, absorve sílica do solo e a acumula dentro de sua estrutura. A casca de arroz é tipicamente composta de celulose (40-45%), lignina (25-30%), cinza (15-20%) e água (8-15%). A cinza é principalmente derivada da opalina, da qual cerca de 90% é sílica (BEHAK, 2007).

Behak (2007) estudou o efeito da adição da cinza de casca de arroz (CCA) e cal a um solo sedimentar arenoso do Uruguai; utilizando dois tipos de CCA (cinza residual do processo de queima de casca de arroz em um forno sem controle de temperatura, e cinzas produzidas em laboratório por incineração de casca de arroz a diferentes temperaturas controladas). No trabalho do autor estudaram-se os efeitos da adição dos dois tipos de CCA e cal a um solo nos teores de 15 e 20% por peso de solo seco, 5 e 10% de cal e com os períodos de cura de 7, 14, 28 e 56 dias, possibilitando observar a influência do teor de CCA e cal, da energia de compactação e do período e temperatura de cura no comportamento mecânico das misturas. Utilizando as energias de compactação Proctor intermediário e modificado na realização dos ensaios de compactação, CBR, resistência à compressão não-confinada, tração por compressão diametral, durabilidade e difratogramas de raios-X, observou-se que com o acréscimo do teor de CCA e cal houve um decréscimo do peso específico seco máximo e aumento de teor ótimo de umidade; assim, a mistura solo-CCA proporcionou aumentos significativos na resistência mecânica com o acréscimo do teor de CCA e cal e do período de cura.

3.2.2.6. Outras estabilizações não convencionais

Rolim (1996) cita vários outros tipos de estabilizações não convencionais realizadas com o decorrer do tempo, a seguir se mencionam alguns destes:

- Freire e Piedade Jr. (1979) pesquisaram os efeitos da aplicação de dois condicionadores, CMC (carboximetilcelulose) nas dosagens de 0,1% e 0,25%, e silicato de sódio nas dosagens de 0,6% e 1,2%, em peso, sobre a resistência relativa dos agregados à demolição mecânica em função do tempo, de dois solos distintos. A partir do peneiramento a seco, os autores determinaram a porcentagem acumulada de agregados na peneira n° 60 (0,25 mm) e também o módulo de finura, propondo que o módulo de finura fosse usado como índice de estabilidade estrutural dos agregados do solo.
- Guida e Medina (1974) estudaram o uso de ácido fosfórico na estabilização de solos visando uma possível aplicação em solos lateríticos, para fins de pavimentação. Trabalharam com quatro tipos de solo e cinco teores de ácido, a saber: 1, 2, 3, 4 e 5%, para diferentes energias de compactação. A partir dos resultados obtidos, os autores concluíram que solos finos, tratados com ácido fosfórico, desenvolvem elevada resistência á compressão simples, devido à cimentação das partículas, motivo pelo qual os autores sugeriram o emprego deste aditivo como uma possibilidade na estabilização de solos tropicais.
- Chies et. al. (1993) utilizaram cal em misturas com cinzas volantes e cinzas pesadas (materiais pozolânicos sílico-aluminosos, que por si só não apresentam valor cimentante); a estabilização do material depende da qualidade de seus componentes e da energia de compactação empregada.
- Silveira (1967) afirmou que a ação do cloreto de cálcio no solo provém de reações de caráter coloidal, que reduzem a dupla camada dos coloides e, assim, a perda de resistência de solos que contem finos; a alteração das características químicas da água do solo e o aumento da atração entre as partículas de solos finos foram, também, verificados pelo autor.

Existem muitas outras estabilizações com produtos comerciais não tradicionais patenteados como ISS 2500, consolid, perma-zyme, dynacal, enzymatic, entre outros; também com resíduos industriais como alcatrão de madeira, escórias de aciaria, escórias de alto-forno; e também com produtos alternativos como hidróxido de sódio, acrilato de sódio, cloreto de cálcio, cloreto de sódio, entre outros. Em fim, há uma ampla gama de estabilizações com produtos não tradicionais para melhorar as propriedades dos solos e garantir uma boa qualidade na construção.

3.2.3. Reforço de solos com fibras

O reforço de solos com fibras é uma técnica na qual se insere um material com alta resistência à tração, promovendo uma melhoria nas propriedades mecânicas dos solos, aumentando assim a resistência e diminuindo a compressibilidade destes (FERREIRA, 2010). As fibras são utilizadas como elemento de reforço para dar suporte a solos frágeis, sendo seu volume bem menor em relação ao volume da matriz.

A técnica de reforçar o solo com fibras é um processo muito conhecido pela humanidade. Uma das aplicações que mais se aproxima dos geossintéticos utilizados atualmente data de 1926, quando o Departamento de Estradas da Carolina do Sul, Estados Unidos, utilizou mantas de algodão como reforço de camadas asfálticas de pavimentos. Historicamente, há indícios da aplicação desta técnica em algumas partes da Grande Muralha da China bem como em estradas construídas pelos Incas, no Peru, empregando lã de lhama como reforço. (PALMEIRA, 1992 Apud. FEUERHARMEL, 2000).

3.2.3.1. Tipos de fibras utilizados como reforço

No reforço de solos vários tipos de fibras podem ser empregados, desde as naturais até as fabricadas pelo homem. Suas características são intimamente relacionadas ao tipo de material do qual são compostas e de seu processo de fabricação. Dessa forma, a interação matriz-reforço está relacionada com as

características do tipo de reforço e da matriz agindo em conjunto (FEUERHARMEL, 2000; BENTO, 2006).

No mercado existe uma ampla variedade de fibras que podem ser utilizadas como elemento de reforço de materiais compósitos. A diferença entre elas se justifica pela composição física e química, assim como pelas propriedades mecânicas e de resistência que apresentam quando expostas a meios agressivos.

As fibras são classificadas em quatro classes: naturais, poliméricas, minerais e metálicas (FEUERHARMEL, 2000; BENTO, 2006; FERREIRA, 2010). As fibras naturais e poliméricas são orgânicas e as minerais e metálicas são inorgânicas.

a) Fibras naturais

As fibras naturais foram as primeiras a serem empregadas pelo homem como reforço de solo, sendo sua maioria de origem vegetal e destacando-se bambu, capim, juta, malva, coco, linho, sisal e cana-de-açúcar. Estas fibras podem atingir altas resistências, porém apresentam durabilidade pequena e são afetadas pela umidade ambiente; devido à sua alta absorção de água, contribuem à fissuração por retração diferencial. No Brasil, o trabalho pioneiro data do ano 1980 onde se avaliaram diversas fibras vegetais e os esforços se direcionaram para as fibras de coco e sisal, a partir das quais foram desenvolvidos materiais tais como telhas, calhas e pequenas caixas d'água.

É neste grupo onde se encontram as fibras dispersas de papel Kraft utilizadas nesta pesquisa, por serem provenientes da celulose dos sacos de cimento.

b) Fibras poliméricas

Os polímeros possuem diferentes denominações e comportamentos de acordo com sua estrutura química, dando origem a diversos tipos de fibras. Podem apresentar-se na forma fibrilada, que apresentam um formato trançado quando

esticadas transversalmente para que se abram no processo de mistura com o solo, ou na forma de laminetes (filamento único) que é distribuído aleatoriamente dentro da massa de solo.

As fibras poliméricas se dividem em:

- Fibras de polipropileno: constituídas de um polímero que adquire consistência plástica por meio do aumento de temperatura, sendo assim considerado termoplástico; possuem grande flexibilidade e tenacidade e elevada resistência ao ataque químico e álcalis, devido à sua constituição.
- Fibras de polietileno: possuem baixo módulo de elasticidade e se aderem fracamente à matriz cimentada, porém com alta resistência aos álcalis; têm alta durabilidade, mas também grandes deformações de fluência.
- Fibras de poliéster: possuem alta densidade, rigidez e resistência, e características semelhantes às de polipropileno, porém com maior custo; o membro mais importante pertencente a esta família é o polietileno tereftalato (PET) que é um tipo de plástico empregado na fabricação de garrafas.
- Fibras de poliamida: possuem baixa resistência e rigidez devido à forma de suas moléculas espiraladas e dobradas, mas se forem esticadas e reforçadas na sua fabricação, alcançam altas resistências e módulos de elasticidade; a fibra de poliamida aromática (Kevlar) é a de maior sucesso.

c) Fibras minerais

Dentre as fibras minerais destacam-se as seguintes:

- Fibras de carbono: possuem alta resistência e módulo de elasticidade, devido à resistência das ligações entre os átomos de carbono; mas são as mais caras utilizadas como reforços;

- Fibras de vidro: são manufaturadas na forma de fios compostos de centenas de filamentos individuais justapostos; a maioria destas é fabricada a partir do vidro tipo E, que confere suscetibilidade ao ataque dos álcalis;
- Fibras de amianto: possuem alta resistência à tração e alto módulo de elasticidade, além de uma ótima aderência; mas podem causar danos à saúde do homem, pela aspiração de partículas muito pequenas liberadas ao ar quando cortadas.

d) Fibras metálicas

As fibras metálicas mais utilizadas são as de aço, possuindo elevados módulos de elasticidade e resistência à tração. Em função do meio em que estão inseridas, podem apresentar problemas como a corrosão. Possui formato variável, podendo aumentar sua aderência com a matriz.

3.2.3.2. Solos reforçados com fibras

A técnica de inclusão de fibras no solo é parte integrante da tecnologia dos materiais compósitos que são aqueles formados pela combinação de dois ou mais materiais, constituindo um conjunto polifásico que apresenta duas fases básicas: as fibras e a matriz em que as mesmas estão incluídas, sendo as propriedades do conjunto superior a de seus componentes em separado (BENTO, 2006).

Conforme Budinski (1996) apud Feuerharmel (2000), na atualidade se conhece bastante sobre a confecção de diversos materiais de engenharia, sendo que o desenvolvimento de novos componentes e materiais dependerão do amplo conhecimento da química e estruturas atômicas.

Na utilização de fibras como reforço de solos, a escolha do tipo é de vital importância, tendo em vista as várias opções existentes no mercado e dependendo do

nível de melhoramento do solo. Assim, deve-se levar em conta que as naturais sofrem decomposição, tendo uma vida útil menor em relação às sintéticas.

Inúmeras pesquisas de reforço de solos com fibras têm sido realizadas, desde as realizadas somente com fibras (variando o tipo de fibra, a quantidade de fibra ou o tipo de solo) até as que apresentam, além das fibras de reforço, aditivos para melhoramento dos solos. Assim, baseando-se nas referências citadas por Ferreira (2010), Buson (2009), Bento (2006) e outras fontes, na tabela 3.1 se apresentam alguns estudos realizados na busca do desenvolvimento de técnicas para melhorar propriedades do solo com a adição de fibras.

As principais mudanças no comportamento de solos com a inclusão de fibras são: compactação, resistência de pico, resistência pós-pico, deformabilidade, variação volumétrica, modo de ruptura, condutividade elétrica, entre outras (FEUERHARMEL, 2000), que dependem diretamente de a) tipo de fibra utilizada e as características desta como: teor de fibra, comprimento da fibra, orientação das fibras, módulo de elasticidade da fibra; b) outros fatores como: adesão da fibra à matriz do compósito (rugosidade), tensão confinante e modo de carregamento dos ensaios (FERREIRA 2010). Assim, tanto as características da fibra bem como o tipo e os procedimentos de ensaio influíram nos parâmetros do solo.

Tabela 3.1 – Estudos realizados de solos reforçados com fibras

Pesquisador	Estudo realizado
ULBRICH (1997)	Aspectos do comportamento mecânico de um solo reforçado com fibras
MONTARDO et. al. (1998)	Características da resistência e deformação de um solo cimentado reforçado com fibras PET
CARBONIERI (1999)	Reciclagem de garrafas PET: utilização em forma de fibra para reforço de solo
CONSOLI et. al. (1999)	Comportamento de solo-cimento reforçado com fibra
JUNIOR et. al. (1999)	Estudo de solo-cimento reforçado com fibras de polipropileno
LIMA et. al. (1999)	Influência da adição de fibra de polipropileno e da energia de compactação na resposta mecânica de uma mistura solo-cal
PRIETTO et. al. (1999)	Comportamento mecânico de uma areia cimentada reforçada com fibras PET
ROLIM (1999)	Caracterização físico-mecânica de misturas de solo, cal e resíduo "água-de-cola"
TEODORO (1999)	Resistência ao cisalhamento de solos reforçados com fibras plásticas
FAZIO (2000)	Utilização do pó de borracha de pneu reciclado em misturas betuminosas para pavimentação urbana rodoviária
FEUERHARMEL (2000)	Comportamento de solos reforçados com fibras de polipropileno
SPECHT (2000)	Comportamento de misturas solo-cimento-fibra submetidas a carregamentos estáticos e dinâmicos visando à pavimentação
CASAGRANDE (2001)	Estudo do comportamento de um solo reforçado com fibras de polipropileno visando o uso como base de fundações superficiais
SANTONI et. al. (2001)	Propriedades de engenharia da mistura areia-fibra para a construção de estradas
MONTARDO E CONSOLI (2002)	Comportamento mecânico de compósitos solo-cimento-fibra; estudo do efeito das propriedades dos materiais constituintes
BUENO (2003)	Uso de fibras plásticas para reforço de solos compactados
VENDRUSCOLO (2003)	Estudo do comportamento de materiais compósitos fibrosos para aplicação como reforço de base de fundações superficiais
DIAS (2004)	Estudo de misturas de areia-asfalto e cinza-cal para emprego em pavimentos urbanos
LOVATO (2004)	Estudo do comportamento mecânico de um solo laterítico estabilizado com cal, aplicado à pavimentação
CASAGRANDE (2005)	Comportamento de solos reforçados com fibras submetidos a grandes deformações
LEOCÁDIO (2005)	Reforço de solo laterítico com fibras de sisal de distribuição aleatória, tratadas superficialmente com EPS reciclado
TRINDADE (2005)	Latossolo vermelho-amarelo reforçado com fibras de polipropileno de distribuição aleatória
BENTO (2006)	Uso de cal e fibras na melhoria de materiais para utilização em estruturas de pavimentos
FALORCA et. al. (2006)	Comportamento tensão-deslocamento de corte do solo microreforçado com fibras de polipropileno
HATAF et. al. (2006)	Análise experimental da capacidade de carga de uma areia reforçada com fragmentos de pneu distribuídos aleatoriamente
DA SILVA (2007)	Comportamento de solos siltosos quando reforçados com fibras e melhorados com aditivos químicos e orgânicos
FERREIRA (2010)	Estudo do comportamento mecânico de solos reforçados com fibras através do método de elementos discretos
NETO E BUENO (2010)	Reforço de solos moles com geosintéticos
REIS (2010)	Utilização de fibras de poliéster na melhoria da compressibilidade do solo de Cuiabá MT
REIS E JUNIOR (2011)	Reforço de um solo residual expansivo com fibras de poliéster oriundas do PET

3.3. Kraftterra

Buson (2009) apresenta o estudo, desenvolvimento e análise do desempenho técnico de blocos de terra compactada – BTCs – com a incorporação de fibras de polpa de celulose proveniente da reciclagem de sacos de cimento (fibras dispersas de papel Kraft) e uma fração de cimento, para elementos de vedação vertical de edificações e habitações de interesse social; o novo compósito é denominado por ele como Kraftterra.

A presente pesquisa foi desenvolvida com base nos bons resultados de ensaios físicos e mecânicos conseguidos por Buson (2009), abordando aspectos de estabilização para melhorar as características e propriedades geotécnicas, como resistência ao cisalhamento direto e à compressão simples, unicamente com a adição das fibras dispersas de papel Kraft ao solo em diferentes dosagens, à diferença do autor em menção.

O autor realizou vários estudos e análises para tentar padronizar os diversos processos envolvidos na sua pesquisa como são: processo de reciclagem dos sacos de cimento, de preparo e mistura do novo compósito, de fabricação dos BTCs com prensa manual, da execução de paredes com argamassa de assentamento e da execução de reboco para revestimento. Com isto, ele caracterizou o novo material (Kraftterra) e verificou o desempenho físico-mecânico dos seus componentes (BTCs) e elementos construtivos (vedação vertical – paredes), avaliando diferentes proporções dos materiais envolvidos nas misturas que são: o solo (matéria-prima - terra); o estabilizante (cimento); as fibras longas do papel Kraft reciclado (polpa de celulose); e o percentual de água da mistura.

Buson (2009) utilizou percentuais de fibras dispersas de Kraft de 2%, 4% e 6% da massa de solo seco e cimento nos percentuais em massa de 0%, 6%, 9% e 12%. Quanto ao solo, inicialmente utilizou um solo que continha 45% de argila, 42% de areia e 13% de silte; depois prepararam outros três tipos de amostras corrigindo a do solo natural com a adição de areia até alcançar percentuais de argila de 30%, 20% e 15%.

As propriedades avaliadas nos BTCs foram: resistência à compressão, retração linear, durabilidade (envelhecimento acelerado) e índice de absorção de água (com e sem aditivo impermeabilizante – seiva do Aloe vera); e, nos elementos de vedação vertical se avaliaram: resistência à compressão simples e tensão diagonal, durabilidade (envelhecimento acelerado) e resistência ao fogo.

Buson (2009) optou pelas análises comparativas do Kraftterra com o solo-cimento (compósito de referência), tanto entre os próprios compósitos quanto nos BTCs e paredes produzidas; em outras palavras, ele comparou o solo-cimento-fibra com solo-cimento em diferentes porcentagens de cimento e fibra.

Alguns dos resultados obtidos pelo autor são:

- Constatou um melhor desempenho do Kraftterra em paredes quanto à resistência à compressão simples e diagonal (antes e depois de ciclos de envelhecimento acelerado) e quanto à resistência ao fogo, quando comparado com o solo-cimento.
- O percentual de 6% de Kraft nas misturas apresentou os melhores resultados, sendo o recomendado pelo autor para a produção do Kraftterra. Por sua vez, constatou que os solos mais recomendados para a produção de BTCs com Kraftterra são aqueles que apresentaram em torno de 30% de argila.
- Verificou que com a adição das fibras dispersas de papel Kraft nos BTCs e nas argamassas de assentamento houve um grande aumento da capacidade de resistência das paredes aos esforços de compressão simples e aos esforços de tração transversal decorrentes das tensões de compressão, mesmo depois da tensão máxima de ruptura atingida e mesmo após sofrerem grandes esmagamentos.
- Entretanto, verificou que o Kraftterra tende a aumentar a absorção da água quando comparado ao solo-cimento.

4. QUALIDADE DA ÁGUA E CONTAMINAÇÃO DO LENÇOL FREÁTICO

A água é o recurso natural mais importante do mundo, pois sem ela a vida não pode existir e a maioria das indústrias não poderia operar. A presença de uma fonte segura e confiável da água é um pré-requisito essencial para o estabelecimento de uma comunidade estável. A importância da água como um recurso natural requer uma gestão cuidadosa e conservação, e deve ser universalmente reconhecida. Embora a natureza muitas vezes tenha grande capacidade de recuperação de danos ambientais, as demandas crescentes sobre os recursos hídricos exigem a aplicação profissional dos conhecimentos fundamentais sobre o ciclo da água para garantir a manutenção da sua qualidade e quantidade (TEBBUTT, 1998).

A qualidade da água tem se tornado um fator limitante para o aproveitamento dos recursos hídricos, devido ao crescimento da demanda por água no Planeta e à deterioração crescente do meio ambiente como resultado da poluição (BOSCOV, 2008).

4.1. Importância da qualidade de água

Conforme com a Organização Mundial da Saúde (OMS), ou também *World Health Organization (WHO)*, "a qualidade da água" é um termo usado para expressar a aptidão da água para sustentar diversas utilizações ou processos. Dependendo do uso se terão requisitos das características físicas, químicas ou biológicas da água, como por exemplo, os limites de concentrações de substâncias tóxicas para o uso da água potável. Consequentemente, a qualidade da água pode ser definida por um conjunto de variáveis que limitam seu uso. Embora muitos usos coincidam em alguns requisitos para certas variáveis, cada utilização terá suas próprias exigências e influências na

qualidade da água. Os ecossistemas naturais jogam um papel muito importante na consideração de opções para gestão da qualidade da água, porque eles são indicadores sensíveis de alterações ou deterioração da qualidade da água e também pelo seu valor intrínseco (BARTRAM E BALLANCE, 1996).

A água desempenha um papel essencial no suporte da vida humana, mas também, quando contaminada, tem um grande potencial para a transmissão de variedade de doenças e enfermidades. Nos países desenvolvidos, a presença de sistemas de eliminação de águas residuais e abastecimento de água eficiente fazem que as doenças relacionadas com água se tornem raras. No entanto, no mundo em desenvolvimento, por volta de 1,3 bilhões de pessoas carecem de abastecimento de água potável e quase 2,0 bilhões não têm saneamento adequado; tendo como resultado inúmeras doenças relacionadas com a água nessas áreas que é assustador em toda a sua extensão. Milhões de pessoas morrem a cada ano como consequência de saneamento de água inadequado ou inseguro, conforme com alguns dados da OMS que dão uma indicação da magnitude do problema (TEBBUTT, 1998).

Ainda conforme o mesmo autor, mesmo que os países desenvolvidos contem com os sistemas de água eficientes, existe a preocupação sobre os possíveis riscos para a saúde que podem surgir a partir da presença de concentrações traços de impurezas na água potável, especialmente dos compostos potencialmente cancerígenos. Existem vários outros contaminantes químicos (naturais ou sintéticos), que produzem efeitos conhecidos na saúde dos consumidores. Há cerca de duas dúzias de doenças infecciosas, nas quais a incidência pode ser pela influencia da água; embora essas doenças possam ser causadas por vírus, bactérias e outros, é muito útil considerar os aspectos relacionados com a água na propagação de infecções. Por isso é muito importante que as relações entre a qualidade da água e a saúde sejam totalmente apreciadas pelos engenheiros e cientistas envolvidos com o controle de qualidade da água.

A qualidade da água orienta os processos de tratamento necessários e os limites técnicos e econômicos para a potabilização da água.

4.1.1. Águas superficiais e águas subterrâneas

Água corrente, lagos, reservatórios e águas subterrâneas são tipos de corpos de água continentais, ou águas superficiais, interligados pelo ciclo hidrológico, com muitos corpos de água intermediários (naturais e artificiais). A qualidade da água é profundamente afetada pela hidrologia de um corpo de água, daqui a essencialidade dos dados hidrológicos disponíveis para sua avaliação tais como: variação sazonal na vazão do rio, os regimes térmicos e mistos do lago e o regime de recarga e padrão de fluxo subterrâneo das águas subterrâneas (BARTRAM E BALLANCE, 1996).

Um fator importante é a água de chuva, que ao se infiltrar pelo solo, arrasta com ela os componentes do solo e descende até o lençol freático; é por isso que neste trabalho se enfatiza principalmente na qualidade das águas subterrâneas por se tratar de uma alternativa de estabilização de solos que poderia contaminar o lençol freático.

A água subterrânea é contida no espaço poroso de sedimentos (ex.: areia, cascalho) ou nas fissuras da rocha fraturada (ex.: rochas cristalinas, calcário). São importantes duas definições: aquífero, que é o corpo de rocha ou sedimentos que contem a água; e lençol freático que é o nível de água na parte superior do corpo saturado. Normalmente, as águas subterrâneas têm um padrão de fluxo constante. A velocidade é regulada principalmente pela porosidade e permeabilidade do material através do qual a água flui e é menor do que nas águas superficiais (BARTRAM E BALLANCE, 1996).

Iritani e Ezaki (2012) indicam que a água existente abaixo da superfície do terreno e circula na zona saturada é chamada de água subterrânea. A água infiltrada no solo passa por uma zona não saturada ou de aeração (poros preenchidos parcialmente por água e ar), onde parte de essa água é adsorvida pelas plantas e seres vivos e o restante continua em movimento descendente; este excedente se acumula em zonas mais profundas e forma a zona saturada (poros preenchidos totalmente por água); o limite de entre as zonas não saturada e saturada é chamado de lençol freático.

Conforme a Resolução CONAMA Nº 396, de 03 de abril de 2008, as águas subterrâneas são as que ocorrem natural ou artificialmente no subsolo.

O volume armazenado de águas subterrâneas no ciclo hidrológico é cem vezes superior ao volume das águas dos rios e lagos. As águas subterrâneas contribuem com 95% da água doce do planeta, excluindo as calotas polares e geleiras. Estas águas circulam como rios subterrâneos, movendo-se lentamente pelos poros e fissuras das rochas; em um rio rápido, a água pode mover-se à velocidade de 1 m/s, enquanto a velocidade de circulação da água subterrânea é da ordem de 1 m/dia. O tempo de renovação da água dos rios é de algumas semanas, ao passo que as águas subterrâneas se renovam na escala de dezenas a centenas de anos (ROCHA et. al., 2011).

4.1.2. Definições relacionadas à qualidade da água

Conforme Chapman (1996), a definição da qualidade de água não é nada simples, devido à complexidade dos fatores que a determinam e à quantidade de variáveis utilizadas para descrever o estado quantitativo dos corpos de água. A definição de qualidade de água evoluiu devido às necessidades de uso de água e à capacidade de medir e interpretar as características da água.

As seguintes definições são importantes para a avaliação da qualidade de água (CHAPMAN, 1996):

- Qualidade do meio aquático: Refere-se a três conceitos: conjunto de concentrações e partições físicas de substâncias orgânicas ou inorgânicas; composição e estado da biota aquática no corpo d'água; e, descrição das variações sazonais, devido a fatores internos e externos ao corpo de água.
- Poluição do meio aquático: Refere-se à introdução de substâncias ou energia, direta ou indiretamente, pela ação do homem que dão lugar a efeitos nocivos, tais como: danos aos recursos vivos; riscos à saúde humana; entraves às atividades aquáticas (incluindo a pesca); deterioração da qualidade da água com relação ao seu uso em atividades agrícolas, industriais e econômicas.

- Avaliação da qualidade de água: Refere-se ao processo global de avaliação da natureza física, química e biológica da água em relação à qualidade natural, os efeitos humanos e usos pretendidos (principalmente os que podem afetar a saúde humana e a saúde do próprio sistema aquático).
- Monitoramento da qualidade de água: Refere-se à coleta real de informações em lugares estabelecidos e intervalos regulares, a fim de fornecer os dados que possam ser utilizados para definir as condições atuais, estabelecer tendências, etc.

As mudanças na qualidade de água, mas sem qualquer dano à biota ou restrição de uso da água, só podem ser detectáveis através de medições químicas repetidas ao longo de períodos de tempo longos; um exemplo típico é quando concentrações de cloro variam de poucos mg/L a 10 mg/L. Porém, quando existe uma degradação da qualidade da água, quer dizer, que as concentrações máximas aceitáveis para variáveis selecionadas em relação ao uso da água foram ultrapassadas ou o habitat aquático e biota foram significativamente modificados, a qualidade da água é geralmente definida como poluída.

4.1.3. Impactos das atividades antrópicas sobre a qualidade da água

As “causas antrópicas” referem-se às atividades humanas que provocam a contaminação. As formas de contaminação são diversas, envolvendo desde organismos patogênicos, até elementos químicos como os metais pesados e moléculas orgânicas e inorgânicas.

Conforme Chapman (1996), atividades como a irrigação agrícola ou refrigeração industrial exigem as maiores demandas de quantidade de água, mas o mínimo em termos de qualidade da água (ou seja, concentrações críticas definidas para uma ou duas variáveis); o contrário acontece com o abastecimento de água potável ou fábricas industriais especializadas que exigem demandas relativamente moderadas de quantidade de água, mas exercem as demandas mais sofisticadas quanto à qualidade.

Ainda conforme a autora, algumas atividades humanas como o uso descontrolado da terra para a urbanização ou o desmatamento, descarga de resíduos sem tratamento, liberação acidental (ou não autorizado) de substâncias químicas ou lixiviação de líquidos nocivos de depósitos de resíduos sólidos têm efeitos indiretos e indesejáveis, e às vezes até devastadores, sobre o meio aquático; em geral, cada uso de água provoca impactos na qualidade do meio aquático. A experiência mostra que a degradação ambiental resultante das intervenções estruturais no ciclo hidrológico natural (canalização ou represamento de rios, desvio de água no interior ou entre bacias hidrográficas, excesso de bombeamento de aquíferos, etc.) muitas vezes supera os benefícios que estas intervenções podem trazer.

A Tabela 4.1, apresenta um resumo dos impactos antrópicos mais importantes sobre a qualidade da água em uma escala global, bem como a severidade do prejuízo de utilização em diferentes tipos de corpos d'água.

Tabela 4.1 – Principais problemas de qualidade de água doce em escala global (Chapman, 1996)

Problema	Corpo d'água			
	Rios	Lagos	Reservatórios	Águas subterrâneas
Patógenos	xxx	x	x	x
Sólidos suspensos	xx	na	x	na
Matéria orgânica degradável ¹	xxx	x	xx	x
Eutrofização ²	x	xx	xxx	na
Nitrato como um poluente	x	0	0	xxx
Salinização	x	0	x	xxx
Oligoelementos	xx	xx	xx	xx ³
Micropoluentes orgânicos	xxx	xx	xx	xxx ³
Acidificação	x	xx	xx	0
Modificação dos regimes hidrológicos ⁴	xx	x		x

xxx Deterioração grave ou global encontrada

xx Deterioração importante

x Deterioração eventual ou regional

0 Deterioração rara

na Não aplicável

¹ À exceção do resultante da produção primária aquática

² Algas e macrófitas

³ Dos aterros, rejeitos de mina

⁴ Desvio de água, diques, extração excessiva, etc.

Devido à complexidade de fatores que determinam a qualidade da água, são encontradas grandes variações entre os rios ou lagos em diferentes continentes ou em diferentes zonas hidroclimáticas. Do mesmo modo, a resposta a impactos humanos é também altamente variável. Como consequência, não há um padrão universalmente aplicável que pode definir a linha de base química ou biológica da qualidade das águas. Na melhor das hipóteses, uma descrição geral de alguns tipos de rios, lagos e aquíferos pode ser dada.

4.2. Formas de contaminação do lençol freático

Os reservatórios de águas subterrâneas são chamados de lençóis (freático ou cativo) e decorrem da infiltração da água da chuva no solo nos chamados locais de recarga dos aquíferos (áreas aflorantes das formações geológicas).

Conforme Zimbres (2002), geralmente a água depositada no lençol freático é considerada própria para consumo e apresenta algumas vantagens em relação às águas superficiais:

- As águas subterrâneas são mais protegidas da poluição;
- O custo de sua captação e distribuição é muito mais barato;
- Não há necessidade de tratamento algum, o que proporciona que seja consumida sem riscos à saúde humana, como no caso das águas minerais; e,
- Quando a oferta de água aumenta na população é possível perfurar mais poços e dispensar grandes investimentos de capital.

A exploração intensiva de água e as fontes potenciais de poluição provenientes das atividades antrópicas são algumas das principais ameaças às águas subterrâneas; a falta de cuidado na proteção de poços é também muito comum e gera riscos de contaminação (IRITANI E EZAKI, 2012).

Geralmente os tipos de poluição resultam de ações antrópicas, mas também alguns decorrem de fenômenos naturais. Os efeitos da introdução de substâncias ou organismos nocivos na água são algumas das consequências da poluição que atribuem a denominação de contaminação aos casos particulares de poluição hídrica (ROCHA et. al., 2011).

Conforme Iritani e Ezaki (2012), quando os agentes contaminantes atingem o solo e percolam nele através da zona de aeração (zona não saturada) até atingir os aquíferos, ou são lançados diretamente nos aquíferos por meio de poços, ocorre poluição do lençol freático (ou poluição dos recursos hídricos subterrâneos).

Nas grandes cidades, ou mesmo no campo, a qualidade da água presente nos lençóis freáticos é muito prejudicada em decorrência de alguns fatores de poluição. A camada de solo sobrejacente nos depósitos de água subterrânea atua como filtro físico e químico e contribui a uma maior resistência aos processos poluidores. A facilidade de um poluente atingir a água subterrânea depende do tipo de aquífero, profundidade do nível estático (espessura da zona de aeração), permeabilidade da zona de aeração e do aquífero, teor de matéria orgânica existente sobre o solo, e tipo dos óxidos e minerais de argila existentes no solo (ZIMBRES, 2002).

4.2.1. Fontes de poluição dos lençóis freáticos

A contaminação do solo é a principal causa da deterioração das águas subterrâneas. Ele pode ser contaminado diretamente por aplicação de fertilizantes, pesticidas, lodo de estação de tratamento de esgoto, esterco, etc., ou indiretamente, por aerossóis de automóveis e indústrias, pela combustão de carvão, por disposição de resíduos e por incineração de lixo (BOSCOV, 2008).

Iritani e Ezaki (2012) indicam que as fontes de poluição das águas subterrâneas podem ser classificadas por tipo de atividade em: urbana, rural e de mineração.

4.2.1.1. Poluição urbana e doméstica

É provocada pela descarga de efluentes domésticos não tratados na rede hidrográfica, fossas sépticas e lixões (MIDÕES et. al., 2001). Dentre os mais comuns problemas de poluição urbana se destacam:

a) Lixões e aterros:

Quando o lixo depositado em lixões se descompõe gera um líquido denominado chorume que contém alta concentração de substâncias nocivas (orgânicas, inorgânicas ou patogênicas) (IRITANI E EZAKI, 2012)

Conforme Midões et. al. (2001), a circulação da água através dos lixões traslada substâncias ricas em amônio, ferro ferroso, manganês e zinco e apresentam valores elevados da dureza, do total de sólidos dissolvidos e da concentração de sulfato, sódio, bicarbonato, cloreto, potássio cálcio e magnésio.

Quando o aterro não possui impermeabilização na base, os lixiviados dos lixões se infiltrando no solo contaminam o aquífero, originando um aumento de mineralização, elevação de temperatura, aparecimento de cor e odor desagradáveis.

b) Lançamento de esgoto:

Quando os rios atuam como áreas de recarga dos aquíferos livres, o lançamento de esgoto, seja domiciliar ou industrial, em corpos d'água contamina o lençol freático (IRITANI E EZAKI, 2012).

c) Fossas sépticas mal construídas:

Os efluentes domésticos normalmente contêm matéria orgânica, restos de compostos não biodegradáveis, sais minerais, vírus e microrganismos fecais (MIDÕES et. al., 2001). Os contaminantes que se destacam são os microrganismos patogênicos que causam problemas como a diarreia e outras doenças, e o nitrato que quando em elevada concentração na água ingerida pode ocasionar uma doença chamada metahemoglobinemia que afeta a

capacidade de transporte de oxigênio no sangue dos bebês (IRITANI E EZAKI, 2012).

d) Postos de combustível:

Os principais contaminantes que atingem o solo e as águas subterrâneas são substâncias constituintes da gasolina e do óleo diesel (benzeno, tolueno, etilbenzeno, xileno, hidrocarbonetos policíclicos aromáticos, entre outros) que, em determinadas concentrações, podem ser tóxicas ao ser humano, causando doenças, inclusive câncer (IRITANI E EZAKI, 2012).

e) Resíduos industriais:

A eliminação de resíduos de produção através da atmosfera, do solo, das águas superficiais e subterrâneas e os derrames destes durante seu armazenamento e transporte (acidentes), representam uma grande preocupação de contaminação do lençol freático por substâncias perigosas provenientes dessas ações (MIDÕES et. al., 2001).

Ainda conforme os autores, as principais indústrias poluentes são as alimentares, metalúrgicas, petroquímicas, nucleares, mineiras, etc. No Estado de São Paulo, as atividades industriais com potencial para contaminar a água subterrânea necessitam de autorizações específicas (IRITANI E EZAKI, 2012).

4.2.1.2. Poluição rural

Esta poluição é a mais importante na deterioração da água subterrânea, porque ocorre a partir da superfície de extensas áreas (MIDÕES et. al., 2001). As principais fontes de poluição são a aplicação de fertilizantes e pesticidas e indiretamente as práticas de regadio (IRITANI E EZAKI, 2012).

a) Fertilizantes e pesticidas:

Após a aplicação de fertilizantes inorgânicos (amoníaco, nitrato de amônio, sulfato de amônio e carbonato de amônio) e orgânicos (ureia), o excedente se infiltra no solo através da irrigação ou da chuva, e incrementam o nitrato, nitrito e amônio nas águas subterrâneas (MIDÕES et. al., 2001).

Dentro dos pesticidas, existem alguns, como os organofosfatados e carbamatos, que se degradam rapidamente e não persistem no ambiente, mas podem ser altamente tóxicos em baixas concentrações; e existem outros, como os hidrocarbonetos (Ex.: DDT), que demoram muito tempo para se degradar e devido à sua persistência e elevada toxicidade se viram os mais perigosos (IRITANI E EZAKI, 2012).

b) Pecuária:

A pecuária intensiva é uma fonte de poluição quando os dejetos de animais não são armazenados corretamente, quer dizer, quando forem armazenados em tanques ou lagoas desprovidas de impermeabilização. A falta de impermeabilidade do tanque faz que o efluente se infiltre pela base até atingir o lençol freático, podendo elevar as concentrações de nitrogênio na água e outros componentes (IRITANI E EZAKI, 2012).

4.2.1.3. Poluição por mineração

Esta poluição ocorre quando há disposição inadequada dos resíduos da atividade mineradora, o que favorece a exposição destes, seu carreamento a corpos d'água e a infiltração no subsolo, contaminando o lençol freático. Como exemplo se tem os sulfetos que quando expostos ao ar e à água se oxidam e produzem ácidos que mudam as características naturais do meio e ocasionam o aumento de metais tóxicos dissolvidos na água. Também existe o risco de poluição na má utilização das cavas deixadas após terminar a mineração, pois podem ser utilizadas inadequadamente como lixões (IRITANI E EZAKI, 2012).

4.3. Legislação brasileira

A estreita relação entre a água e a saúde humana evidencia a necessidade de estabelecer padrões e regulamentar as condições da utilização da água em função da qualidade e regras de consumo, a fim de garantir que seja um fator efetivo de qualidade de vida e não um transmissor de doenças (IRITANI E EZAKI, 2012).

Ainda conforme as mesmas autoras, é necessário utilizar os padrões de potabilidade, que são estabelecidos pelo Ministério da Saúde (portaria nº 2914, de 12/12/2011) e são referências seguras de concentração de substâncias prejudiciais à saúde na água para consumo humano; isto é, que se referem às concentrações das substâncias consideradas aceitáveis na água e seguras à saúde humana, definidas a partir de evidências toxicológicas (estimativas de doses às quais o ser humano pode se expor sem prejuízos na saúde).

As águas dos aquíferos do Estado de São Paulo atendem aos padrões de potabilidade e têm boa qualidade; e para não comprometer as reservas subterrâneas dos aquíferos, devem se localizar e controlar as ocorrências de contaminação por substâncias de origem natural ou antrópica (IRITANI E EZAKI, 2012).

O Estado tem responsabilidades na proteção e gestão de recursos hídricos, repartindo as atribuições entre os diversos órgãos como são: Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo (SMA), Secretaria de Saneamento e Energia (SSE) e Secretaria da Saúde (SES).

Alguns instrumentos legais relacionados às águas subterrâneas e afines se apresentam no resumo na tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Legislação brasileira sobre águas subterrâneas e outros documentos relacionados

Instrumento Legal	Conteúdo
Portaria MS Nº 2914, de 12/12/2011.	Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade.
Resolução CONAMA Nº 430, de 13/05/2011; e Resolução CONAMA Nº 357, de 17/03/2005.	Dispõem sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes.
Resolução SMA Nº 14, de 05/03/2010.	Define as diretrizes técnicas para o licenciamento de empreendimentos em áreas potencialmente críticas para a utilização de água subterrânea.
Resolução CONAMA Nº 420, de 28/12/2009.	Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas.
Resolução CONAMA Nº 396, de 03/04/2008.	Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências.
Resolução Conjunta SMA/SERHS/SES Nº 3, de 21/06/2006.	Dispõe sobre procedimentos integrados para controle e vigilância de soluções alternativas coletivas de abastecimento de água para consumo humano proveniente de mananciais subterrâneos.
Resolução CRH Nº 52, de 15/04/2005.	Institui as diretrizes e procedimentos para a definição de áreas de restrição e controle da captação e uso das águas subterrâneas
Lei Federal Nº 9.433, de 08/01/1997.	Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos e cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos.
Portaria DAEE Nº 717, de 12/12/1996.	Aprova normas que disciplinam o uso dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos do Estado de São Paulo.
Lei Estadual Nº 6134, de 02/06/1988; e Decreto Estadual Nº 32.955, de 07/02/1991.	Dispõem sobre a preservação das águas subterrâneas do Estado de São Paulo.
Decreto-lei Nº 52.490, de 14/07/1970.	Dispõe sobre a proteção dos recursos hídricos no Estado de São Paulo contra agentes poluidores.

Os documentos legais de referência, mencionados na tabela 4.2, para a avaliação dos parâmetros preliminares estabelecidos nesta pesquisa são: Portaria do Ministério de Saúde Nº 2914/2011; Resolução CONAMA Nº 396/2008; e, Resolução CONAMA Nº 357/2005 e sua alteração 430/2011. Esses documentos dão valores

referenciais de qualidade de águas para consumo humano, bem como algumas definições e classificações importantes.

Assim, conforme as legislações brasileiras citadas e as observações da OMS, a tabela 4.3 apresenta os padrões de potabilidade de interesse para esta pesquisa.

Tabela 4.3 – Padrões de potabilidade conforme a Portaria MS Nº 2914/2011, a Resolução CONAMA Nº 357/2005 e a OMS

Parâmetros	Portaria 2914/2011	Resolução CONAMA 357/ 2005 (Classe 1)	OMS	
			VMR	VMP
pH	6 - 9,5	6 - 9	7 - 8,5	6,5 - 9,2
Cor aparente	≤ 15 UH	≤ 10 UH	≤ 5 UH	≤ 15 UH
Dureza total (mg CaCO ₃ /L)	≤ 500	-----	≤ 100	≤ 500

UH = Unidade Hazen (mg Pt-Co/L)
 VMR = Valor máximo recomendável
 VMP = Valor máximo permitido

Os parâmetros de condutividade elétrica e demanda química de oxigênio (DQO) não são considerados como parte dos padrões de potabilidade, pelo qual as comparações respectivas serão feitas com outras referências.

5. MATERIAIS E MÉTODOS

Esta pesquisa foi realizada no Laboratório de Mecânica dos Solos do Departamento de Geotecnia e Transportes (FEC) da Universidade Estadual de Campinas (Unicamp). A investigação experimental foi direcionada à caracterização da mistura solo - fibras dispersas de papel Kraft para fins de estabilização de solos, comparando os comportamentos das misturas com os solos sem fibra; sendo que para cada solo se adicionaram diferentes porcentagens de fibras dispersas de papel Kraft até encontrar a proporção adequada para cada solo estudado.

5.1. Amostras de solos

Optou-se por estudar uma amostra arenosa e outra argilosa.

5.1.1. Amostra 1

Coletada de escavações a 1m de profundidade de uma obra na Av. Juscelino Kubitschek do município de Paulínia, ao Sudeste do Estado de São Paulo. Encontra-se entre os meridianos 47°05' e 47°15'W e os paralelos 22°40' e 22°50'S.

O município de Paulínia localiza-se no limiar de duas regiões geológicas distintas, situando-se a leste os terrenos cristalinos do Planalto Atlântico e a oeste a bacia sedimentar do Paraná. O local da coleta está localizado na região sul, onde predominam os sedimentos da Cobertura Cenozoica.

A região de Paulínia é representativa da borda leste da Bacia do Paraná e constitui-se, basicamente, de rochas sedimentares do Subgrupo Itararé (Permo-

Carbonífero), diabásios do mesmo evento magmático gerador da Formação Serra Geral (Juro-Cretáceo) e depósitos Cenozoicos. Da mesma forma, os terrenos cristalinos são representados pelos granitos do Neoproterozóico e, localmente, por rochas pré-cambrianas de alto e médio grau metamórfico.

O solo em estudo apresenta uma textura composta por areia em sua maior parte (52%), mas também com proporções de argila (33%) e silte (15%) e uma coloração marrom-clara. Neste trabalho está referida como o solo arenoso pela porcentagem de areia.

5.1.2. Amostra 2

Coletada de escavações de obras próximas ao Campo Experimental para Estudos de Mecânica dos Solos e Fundações da Unicamp (Campus Campinas), localizado na FEC - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, município de Campinas, ao Sudeste do Estado de São Paulo. Encontra-se entre os meridianos 47°15' e 46°45'W e os paralelos 22°40' e 23°00'S.

O município de Campinas abrange três tipos de terrenos geológicos, situando-se a leste rochas pré-cambrianas metamórficas intrudidas por granitos e a oeste rochas sedimentares do Subgrupo Itararé e diabásios. O campo experimental está localizado na região norte, onde predominam solos de diabásio.

No trabalho executado pelo Instituto Geológico (2009) foram mapeadas no município de Campinas as seguintes unidades de evolução geológica: Proterozóico Médio (Complexo Itapira), Proterozóico Superior (Suíte Granítica Jaguariúna, Suíte Granítica Morungaba e rochas miloníticas), Permo-Carbonífero (Subgrupo Itararé), Juro-Cretáceo (diabásios da Formação Serra Geral) e Cenozóicos (sedimentos aluvionares).

O solo da Unicamp tem sido objeto de diversos estudos geotécnicos prévios no laboratório previamente citado. Este solo apresenta uma textura composta por argila em sua maior parte (37%), mas também com proporções de silte (32%) e areia (31%) e

uma coloração vermelha. Neste trabalho está referida como o solo argiloso, pela quantidade de argila.

A Figura 5.1 apresenta a localização dos dois municípios de onde foram coletadas as amostras de solos.

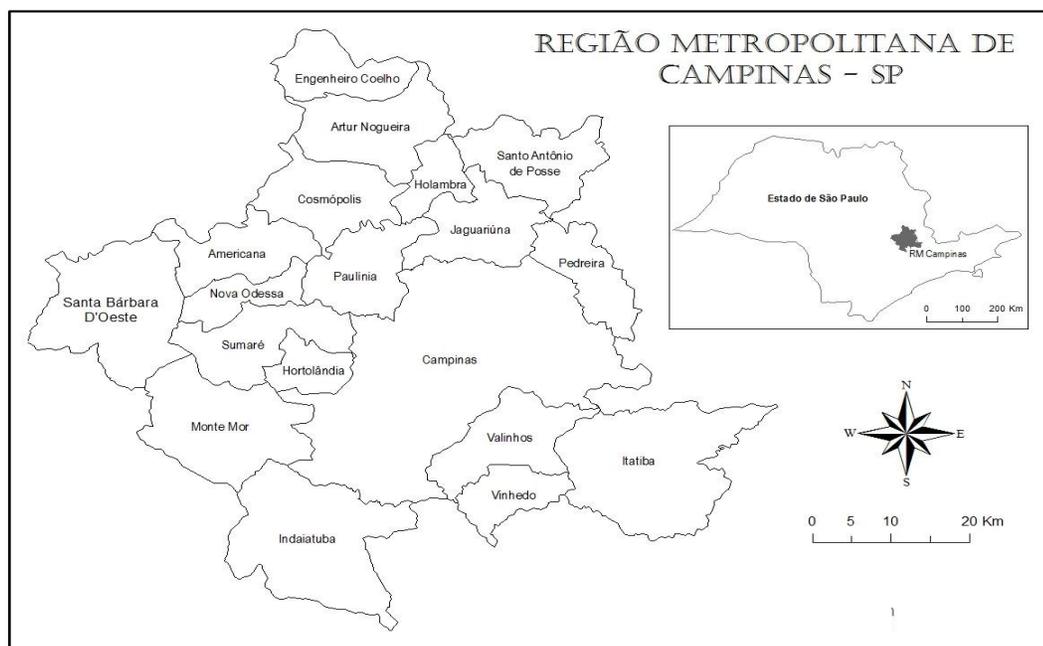


Figura 5.1 – Localização do Município de Campinas e de Paulínia no Estado de São Paulo

5.2. Reciclagem dos sacos de cimento

A coleta dos sacos de cimento foi realizada nas diversas obras atualmente em execução na Unicamp e nas imediações.

Com base no procedimento prescrito por Buson (2009) propõem-se os seguintes passos para a reciclagem dos sacos de cimento e obtenção da celulose destes no Laboratório:

- Limpeza dos sacos de cimento que normalmente são descartados com algum resto de cimento no fundo das embalagens, especialmente nas dobras de fechamento dos sacos, sendo esta limpeza mais cuidadosa nas embalagens que foram expostas à umidade excessiva ou tiveram contato com a água hidratando os restos de cimento e formando pedriscos ou até grandes placas rígidas no fundo do saco (este material sólido pode provocar danos ao equipamento de reciclagem). Esta limpeza foi feita com ajuda de uma escova abrindo completamente os sacos.
- Processo de transformação dos sacos de cimento em polpa de celulose, para o qual foi utilizado um liquidificador industrial com cuba de 4 litros e o procedimento foi o seguinte: 1) Fragmentação do papel em pedaços menores que 5 centímetros, Buson (2009) sugere que seja feita numa fragmentadora de papel, mas neste caso foi utilizada uma tesoura simples; 2) Em seguida se procede à imersão do papel fragmentado em água por algumas horas para amolecer as fibras; 3) Finalmente, procede-se à trituração do papel molhado no liquidificador industrial até a total separação das fibras do papel, chegando à consistência de polpa de celulose e obtendo assim a dispersão das fibras do papel Kraft natural multifolhado.
- Por cada saco de cimento foram necessários aproximadamente 3,250 litros de água no processo de produção da polpa de celulose. Portanto, devido ao elevado consumo de água e por questões ambientais reutilizou-se a água o maior número de vezes possível. Na figura 5.2 ilustra-se o equipamento utilizado e na figura 5.3 o processo de transformação dos sacos de cimento em polpa de celulose.



Figura 5.2 – Liquidificador industrial com cuba de 4 litros

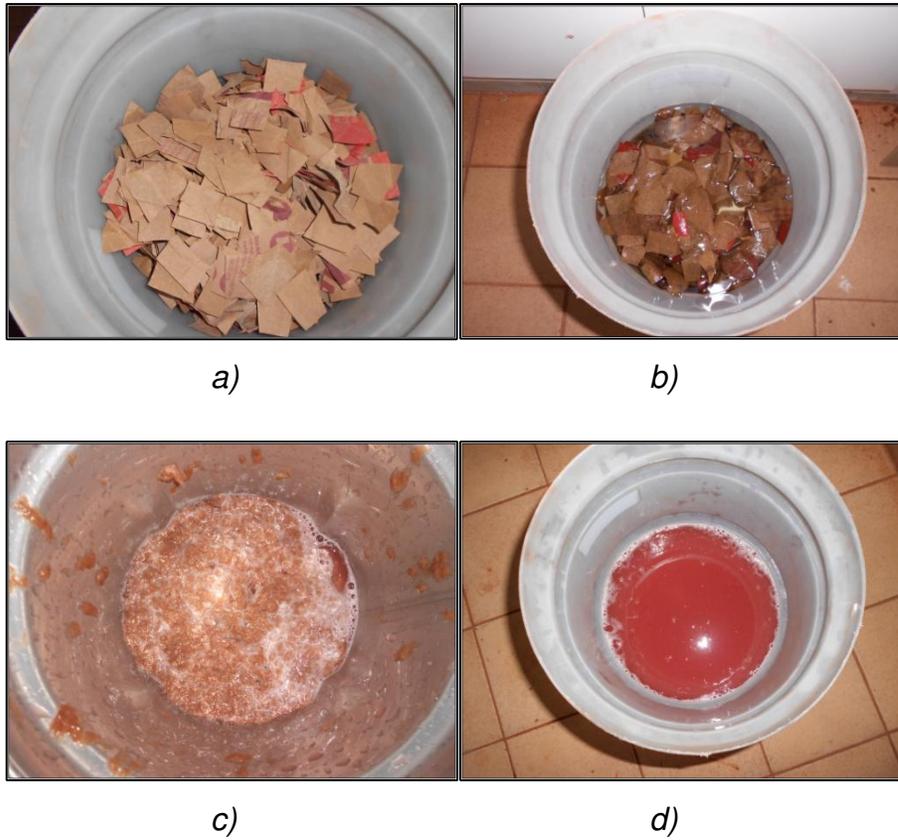


Figura 5.3 – Processo de transformação dos sacos de cimento em polpa de celulose: a) Kraft fragmentado; b) Kraft de molho; c) Polpa de celulose; d) Água para reutilizar

- Após a transformação dos sacos de cimento em polpa de celulose, se faz a retirada do excesso de água coando o material em um saco de algodão, conforme se ilustra na figura 5.4. A polpa de celulose com excesso de água é colocada dentro do saco de algodão e fazendo torção manual o excesso de água é retirado da polpa.



Figura 5.4 – a) Saco de algodão; b) Retirada do excesso de água com a torção manual do saco; c) Polpa sem o excesso de água

- É necessária a dispersão das fibras de papel Kraft após a retirada do excesso de água, para facilitar a incorporação destas ao solo e obter misturas mais homogêneas. Esta dispersão foi feita com o uso de uma argamassadeira pequena de movimento planetário (Figura 5.5a) no Laboratório de Estruturas e de Materiais de Construção do Departamento de Estruturas da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo (FEC) da Universidade Estadual de Campinas, Unicamp, SP. Então, a polpa de celulose sem o excesso de água foi batida na argamassadeira até as fibras ficarem soltas e serem facilmente visualizadas; este processo demandou aproximadamente de 2 a 4 minutos, dependendo da quantidade de fibra a ser dispersa.
- Cabe ressaltar que o processo de dispersão das fibras se torna mais fácil quando a retirada do excesso da água da polpa de celulose for mais eficiente. Entretanto,

deve-se evitar o ressecamento total da polpa porque isso dificulta o processo da mistura.

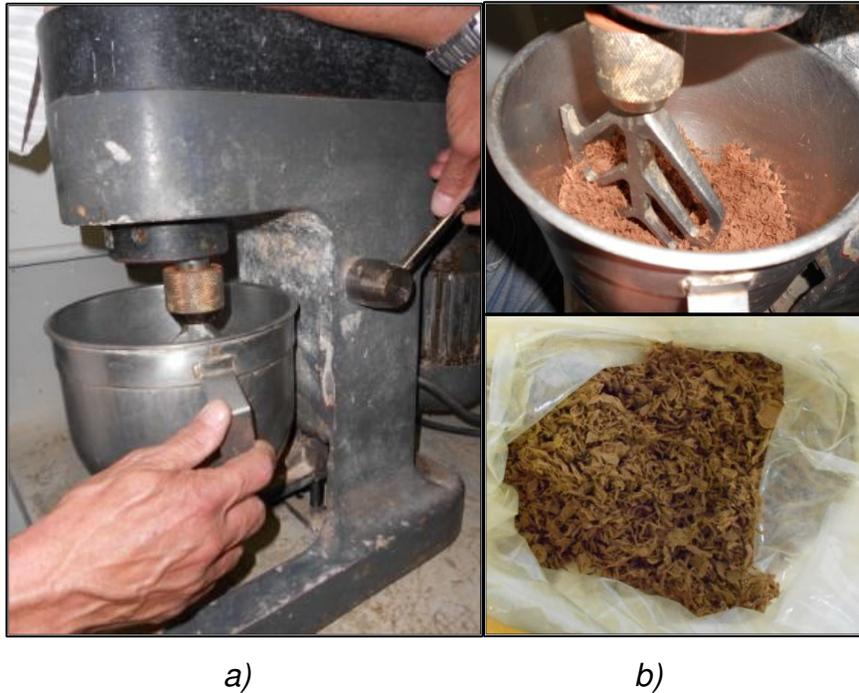


Figura 5.5 – a) Argamassadeira pequena; b) Dispersão das fibras na argamassadeira (acima) e Fibras dispersas (abaixo)

Durante as etapas da reciclagem foram feitas várias observações/modificações que se expõem a seguir:

- Nas primeiras tentativas de reciclagem se colocou a fibra após a torção diretamente na argamassadeira e se começou com a dispersão, mas ficaram muitas fibras sem ser dispersas totalmente o qual faria não obter uma mistura homogênea no momento de misturar com o solo. Portanto, nas próximas reciclagens optou-se por desfazer manualmente os pedaços maiores que resultaram após a torção para ter uma dispersão mais homogênea.

- Como foi mencionado, enquanto a polpa tiver menor quantidade de água a dispersão será mais eficiente e, portanto, a mistura ficará melhor homogeneizada; mas esse fator é muito difícil de controlar porque em cada reciclagem a maneira de fazer a torção influi grandemente no teor de umidade da polpa, gerando muitas variações. Para avaliar aquela variabilidade se pegaram pequenas amostras de fibras dispersas em cápsulas e se calcularam os teores de umidades de algumas reciclagens, obtendo uma variação de teores desde 168% até 217%, sendo que o maior teor pertence às primeiras reciclagens feitas. Isto se converte numa das principais limitações do método aplicado, pois em cada mistura a quantidade real de fibra depende da quantidade de água desta, o que influi nos resultados porque em alguns casos se terá maior quantidade de fibra real (menor teor de umidade da fibra) do que em outros (maior teor de umidade da fibra).
- Para minimizar o trabalho do processo da reciclagem foram feitas de uma só vez as reciclagens de 3 a 4 sacos de cimento guardando em sacolas plásticas as fibras não utilizadas no momento para evitar perda de umidade pelas razões expostas anteriormente.
- Durante as etapas de limpeza foram encontradas quantidades de restos de cimento em média de 10 g por saco o qual equivale a 0,02% da quantidade de cimento da embalagem, o qual é desprezível. Mas, a falta de cuidado no manuseio dos sacos de cimento nas obras poderia resultar em um grande desperdício.

Buson (2009) propõe também equipamentos para a realização da reciclagem dos sacos de cimento de maiores quantidades que são os seguintes:

- a) Para uma escala menor de reciclagem de sacos de cimento se precisa ainda do picotamento e molhagem prévia dos sacos de cimento para se evitar sobrecargas nos equipamentos descritos a seguir:

- Liquidificador industrial com copo reclinável de 25 litros.
 - Misturador com copo de 30 litros com dreno.
 - Bentoneira portátil com capacidade de 80 litros, que substitui à argamassadeira.
- b) Para uma escala maior de reciclagem de sacos de cimento várias etapas do processo no laboratório explicado previamente são eliminadas, os sacos são diretamente inseridos no tanque sem a necessidade da embalagem ser picotada ou previamente molhada. Os equipamentos utilizados são:
- Misturador/agitador com tanque de 1m³ e capacidade de receber até 50 kg de papel de uma só vez, que substitui o liquidificador e em poucos minutos consegue dispersar as fibras de mais de trezentos sacos de cimento.
 - Saco de lona crua (onde é colocada a polpa de celulose), que substitui a bobina geotextil ou saco de algodão utilizada em laboratório.
 - Centrífuga de eixo vertical, que substitui à torção manual, e após 3 minutos de centrifugação a polpa apresenta teor de água adequado.
 - Triturador de resíduos sólidos de 1,5 HP monofásico, que substitui a argamassadeira de movimento planetário utilizada no laboratório, é bastante utilizado para triturar pequenos galhos e folhas em serviços de jardinagem e se consegue uma excelente dispersão das fibras.

Ainda Buson (2009) desenvolveu e mencionou alguns protótipos de equipamentos para a viabilidade prática e econômica desta metodologia, embora eles tivessem que ser produzidos e testados para definir custos. Estes são:

- Misturador/agitador capaz de processar um volume de mistura de até 200 litros e 10 kg de sacos de cimento ao mesmo tempo. Este equipamento proposto consta de um tambor industrial metálico reutilizado de 220 litros

ao qual se pode acoplar um agitador com motor através de um suporte metálico desenhado. Este equipamento substituiria o liquidificador.

- Sistema de rotação utilizando uma bicicleta que faz girar o eixo de uma lavadora e secadora de roupas, a qual possui um tambor permeável; ao invés da bicicleta pode se utilizar um motor elétrico de baixa potência. Este equipamento substituiria a torção manual.

5.3. Preparo e mistura dos solos com as fibras dispersas de papel Kraft

O processo de mistura dos solos com as fibras dispersas de papel Kraft foi realizado com uma argamassadeira grande de movimento planetário no Laboratório de Estruturas da FEC (Figura 5.6a).

Para uma boa mistura do solo com as fibras, deve-se seguir uma ordem de colocação dos materiais, uma vez que este procedimento pode influenciar na eficiência e homogeneidade da mistura.

Buson (2009) apresenta um roteiro eficiente para a ordem de colocação dos materiais na mistura do solo com as fibras, tanto para as misturas realizadas no laboratório, como para as que foram realizadas em menor e maior escala. No trabalho dele além de ter solo e fibra tem cimento e a técnica de mistura é aplicada para fabricação de blocos de terra compactada (tipo tijolos), mas isso não influencia no roteiro porque no seu trabalho se coloca o solo previamente misturado ao cimento e neste trabalho somente se coloca o solo. Então, foram feitas algumas adaptações, conforme descrito a seguir:

- Primeiramente se colocaram as fibras dispersas na argamassadeira grande (equipamento misturador) e se iniciou o processo de rotação.

- Em seguida, acrescentou-se uma pequena quantidade de solo para cobrir uniformemente as fibras com uma fina camada, evitando que as mesmas se aglomerem.
- Acrescentou-se aos poucos, mantendo o misturador ligado, o solo restante à mistura alternando com a água necessária para se chegar à umidade ótima de compactação e para evitar a produção de poeira; a presença de poeira no processo significaria que a mistura está muito seca, o qual dificultaria a incorporação das fibras ao solo e a homogeneização da mistura. Assim, o misturador ficou ligado até a mistura ficar homogênea.
- Com a mistura homogênea, retirou-se esta do equipamento e iniciaram-se os ensaios respectivos.



Figura 5.6 – a) Argamassadeira grande; b) Fibra sendo misturada com solo em argamassadeira (acima) e Adição de água à mistura (abaixo)

No processo descrito se fizeram algumas observações/modificações expostas a seguir:

- Devido a que a metodologia proposta é nova e não existem muitos estudos sobre o comportamento da mistura, para cada porcentagem de fibra se fizeram algumas misturas teste sem adição de água, ou seja só se misturou solo e fibra, a fim de se determinar o teor de umidade que a fibra confere ao solo no processo de mistura e com esses dados calcular a quantidade de água para as misturas dos ensaios chegarem à umidade ótima.
- Cabe ressaltar que essas misturas teste não foram utilizadas nos ensaios, pois pelo fato de não conter água, a mistura não ficou bem homogênea, tal como se explicou no processo de preparo. Portanto, após um determinado tempo, as misturas teste foram retiradas do equipamento e se coletaram três amostras em cápsulas para determinar o teor de umidade. Dessas misturas se determinou que, os solos aumentam em média 2,8%; 5,8% e 8,5% seu teor de umidade com a adição de 5%, 10% e 15% de fibra, respectivamente.
- Mesmo com os dados obtidos das misturas teste, não foi possível controlar o aumento da umidade que a fibra confere ao solo no processo de mistura, porque depende da umidade da fibra após a reciclagem, ou seja, da torção feita no momento da retirada do excesso de água. Então, para os ensaios realizados, se colocou uma menor quantidade de água do que a necessária para a umidade ótima, sendo coletadas três amostras em cápsulas para determinar o teor de umidade. Após a determinação da umidade, a água faltante foi adicionada manualmente, homogeneizando-se ao máximo.
- Todas as misturas foram acondicionadas em sacolas plásticas fechadas por 24 horas a fim de se ter uma melhor homogeneização e hidratação.
- Buson (2009) sugere que o ideal é colocar a água com algum sistema de pulverização ou dispersão para evitar a saturação da mistura em pontos localizados; assim, para uma boa distribuição da umidade na mistura, a água deveria ser borrifada ou adicionada na forma de vapor. Mas, como se observou

na figura 5.6c, não foi possível adicionar a água com esse sistema e se optou por colocar água aos poucos durante o processo de mistura.

- Notou-se que o processo da mistura na argamassadeira por um tempo maior que o necessário para a homogeneização induz ao surgimento de “grumos” e isto faz com a que a massa fique menos homogênea.
- As amostras coletadas para avaliar os teores de umidade foram colocadas em cápsulas e levadas a uma estufa à temperatura da ordem de 105 °C.

5.4. Proporções

As variáveis da mistura (tipo de solo e percentuais de Kraft) foram introduzidas para que fossem definidas as proporções ideais ou mais adequadas para cada tipo de solo avaliado e poder realizar estabilizações com a mistura solo - fibras dispersas de papel Kraft.

Tratando-se do estudo de uma nova metodologia, sem caracterização definida ou normas específicas, optou-se pela análise comparativa entre o desempenho da mistura solo - fibras dispersas de papel Kraft e o solo sem fibra.

Assim, baseando-se no trabalho de Buson (2009), onde se indica que o melhor comportamento dos blocos de terra compactada foi quando adicionou-se 6% de cimento e 6% de fibras dispersas de papel Kraft, decidiu-se testar as porcentagens de 5%, 10% e 15% de papel Kraft, em relação ao peso de solo seco, e avaliar o desempenho nos dois solos estudados.

Das variáveis da mistura estudou-se inicialmente o solo e a influência de diferentes percentuais de argila e areia em sua composição nas misturas solo - fibras dispersas de papel Kraft. A primeira amostra de solo (arenoso) com que se trabalhou continha 52% de areia e 33% de argila e a segunda amostra de solo (argiloso) continha 31% de areia e 37% de argila. Em seguida estudou-se a variável papel Kraft.

5.5. Ensaio de caracterização física

As amostras descritas no item 5.1 foram submetidas a ensaios no Laboratório de Mecânica dos Solos do Departamento de Geotecnia e Transportes (FEC) da Unicamp a fim de caracterizar o solo e obter os parâmetros geotécnicos para a pesquisa.

A preparação das amostras dos solos para ensaios de caracterização (análise granulométrica, limites de Atterberg e densidade dos grãos) e compactação, foi feita de acordo com a norma ABNT NBR 6457/86.

Os teores de umidade do solo e das misturas solo - fibras dispersas de papel Kraft foram determinados pela estufa a aproximadamente 105 °C, durante 24 horas.

A análise granulométrica dos solos foi feita pela combinação dos ensaios de sedimentação e peneiramento conforme a norma da ABNT NBR 7181/84, sendo utilizada a fração do material passando na peneira N° 10 (2,0 mm de abertura de malha). A partir deste ensaio se determinou o diâmetro das partículas e a distribuição granulométrica. A escala granulométrica utilizada para a classificação textural dos solos foi conforme a norma da ABNT NBR 6502/95.

A determinação da massa específica dos grãos foi determinada pelo método do picnômetro, conforme a norma ABNT NBR 6508/84.

Os ensaios dos limites de Atterberg: Limite de Liquidez (LL), Limite de Plasticidade (LP) e Limite de Contração (LC) foram realizados de acordo com as especificações das normas ABNT, NBR 6459/84, NBR 7180/84 e NBR 7183/82, respectivamente. O Índice de Plasticidade (IP) foi calculado pela diferença numérica entre os valores dos limites de liquidez e de plasticidade, ou seja, $IP = LL - LP$.

5.6. Ensaio de compactação - Proctor Normal

Os ensaios de compactação foram executados nas duas amostras de solo natural e nas misturas dessas amostras com diferentes teores de fibras dispersas de

papel Kraft. As amostras foram secas ao ar, destorroadas e peneiradas pela peneira com abertura da malha de 4,76 mm no laboratório. Trabalhou-se com a energia de compactação do ensaio Proctor Normal sendo a amostra compactada em um cilindro metálico de aproximadamente $0,001 \text{ m}^3$ de volume, em três camadas de solo, cada uma recebendo 26 golpes de um soquete de 2,50 kg caindo de uma altura de 0,305 m de acordo com as recomendações da norma ABNT NBR 7182/86.

Os solos foram compactados em cinco teores de umidade a fim de se obter a curva de compactação e assim poder determinar a umidade ótima e o peso específico aparente seco máximo, sendo este procedimento também efetuado para as misturas solo - fibras dispersas de papel Kraft. Para o ensaio de compactação da mistura, procedeu-se de forma análoga à do solo-cimento, orientando-se pela norma ABNT NBR 12023/92, só modificando a etapa da mistura do solo com as fibras dispersas que se fez como indicado anteriormente. Cabe ressaltar que ao término da compactação de todas as camadas se retirou o excesso de material na parte superior do corpo de prova com ajuda de uma régua metálica, sendo que na compactação das misturas esse processo ficou muito difícil porque a mistura se aderiu à régua e impedia de fazer uma boa retirada do excesso, ficando, às vezes, a superfície rasada com depressões.

Para cada tipo de solo e mistura realizaram-se três ensaios de compactação a fim de aplicar estatística nos resultados obtidos e validá-los.

5.7. Ensaio de cisalhamento direto

Segundo Hachich et. al. (1998) e Pinto (2006), o ensaio de cisalhamento é o mais antigo procedimento para a determinação da resistência ao cisalhamento de um solo e se baseia diretamente no critério de Mohr-Coulomb, aplicando-se uma tensão normal em um plano e verificando-se a tensão cisalhante que provoca a ruptura. Assim, as duas amostras de solo e suas respectivas misturas foram submetidas aos ensaios de cisalhamento direto rápido no laboratório de acordo com as recomendações e os procedimentos prescritos na norma ASTM D3080/D3080M-11.

Para cada tipo de solo e as suas respectivas misturas foram realizados três ensaios de cisalhamento direto na umidade ótima (CDUO) para a avaliação estatística. Os corpos de prova foram moldados a partir de amostras deformadas com Energia Normal. A partir da amostra compactada foram talhados os corpos de prova como segue: um anel metálico padronizado colocou-se no topo da amostra compactada; pressionou-se levemente o anel obrigando-o a penetrar na amostra aos poucos; à medida que o anel foi penetrando se foi desbastando o solo ao redor do anel, com ajuda de uma ferramenta cortante, até que a penetração fosse suficiente para aparecer solo acima do anel; finalmente rasou-se com a ferramenta cortante o topo e a base do corpo de prova no anel. Os corpos de prova mediram aproximadamente 30 mm de altura e 63,5 mm de diâmetro, sendo que para as misturas essas medidas variaram um pouco por causa da aderência da fibra ao solo e se apresentaram dificuldades para talhar os corpos.

O ensaio, propriamente dito, consistiu em uma célula, ou caixa bipartida com os acessórios necessários (pedras porosas, placas metálicas com canais), onde o corpo de prova foi transferido a ela por força e colocada na prensa de cisalhamento direto, ajustando-se os extensômetros e colocando as cargas necessárias para a tensão requerida.

Os ensaios foram executados com tensões normais de 50, 100 e 205 kPa, com velocidade constante de 0,7 mm/min e nas condições de umidade ótima, inundado e com ruptura aos 28 dias na prensa de cisalhamento. A partir destes ensaios com as diversas tensões normais, pode-se plotar em um gráfico as tensões de ruptura para cada tensão normal, obtendo-se uma envoltória de resistência, a qual determinará os valores dos parâmetros de resistência, ângulo de atrito (ϕ) e coesão (c), dos solos e misturas em estudo, que é o objetivo principal deste ensaio.

O procedimento para os ensaios de cisalhamento direto inundado (CDI) foi o mesmo. Após serem talhados, os corpos de prova nos anéis foram colocados em uma vasilha, que continha um geotextil e um pouco água, deixando-os saturando por capilaridade por 24 h. Após a conclusão do tempo estabelecido, se colocou água no

suporte até cobrir a caixa de cisalhamento e finalmente se procedeu a ensaiar os corpos de prova com as respectivas tensões normais.

O procedimento para os ensaios de cisalhamento direto com ruptura aos 28 dias (CD28) variou um pouco. Não era possível deixar os corpos talhados nos anéis porque seriam necessários nove anéis (três ensaios de cada) por solo e por mistura, então se decidiu compactar as amostras para cada corpo e colocá-las em sacolas plásticas bem fechadas. Após isso foram levadas para a câmara úmida por 28 dias. Após a conclusão do tempo estabelecido talhou-se os corpos de prova para cada ensaio e se executaram as respectivas rupturas como detalhado previamente.

5.8. Ensaios de compressão simples ou de resistência à compressão não confinada

Realizaram-se estes ensaios em ambos os solos e nas respectivas misturas na umidade ótima (CSUO) e com ruptura aos 28 dias (CS28) seguindo as recomendações da norma ABNT NBR 12770/92.

A determinação da resistência à compressão não confinada foi realizada pela média das tensões de ruptura de três corpos de prova, admitindo uma tolerância de $\pm 10\%$ em torno da média. Se um dos três corpos de prova não atendesse esse intervalo, procedia-se à determinação de nova média com os dois restantes. Caso o fato voltasse a se repetir, abandonava-se esse ensaio e procedia-se novamente à moldagem de três novos corpos de prova.

Trabalhou-se com corpos de prova com 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura, mantendo-se, assim, a relação altura / diâmetro da base em valor próximo de dois. Os corpos de prova foram compactados dinamicamente em cinco camadas nos parâmetros ótimos de compactação ($w_{ót}$ e $\gamma_{dmáx}$), e com a quantidade de golpes necessários para que cada camada ficasse com espessura de 2 cm após compactação, realizando uma escarificação intermediária nos contatos para se garantir a homogeneidade e ligação entre as camadas. A quantidade de material por camada, para cada tipo de solo e

mistura, variou segundo os parâmetros ótimos obtidos na compactação (teor de umidade ótima e peso específico seco máximo). A variação de golpes e quantidade de solo por camada para cada tipo de solo e mistura se apresentam na tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Quantidade de golpes e quantidade de solo por camada para cada tipo de solo e mistura no ensaio de compressão simples

Tipo de Solo	Solo Arenoso				Solo Argiloso			
	0%	5%	10%	15%	0%	5%	10%	15%
Porcentagem de fibra								
Nº de golpes por camada	3	3	4	5	2	3	3	4
Quantidade de solo por camada (g)	80,66	77,63	75,89	73,55	78,84	77,02	74,60	73,04

Após o processo de compactação dos corpos de prova, procedeu-se à desmoldagem, medições de diâmetros e alturas dos corpos, para efeito dos cálculos e de verificação da relação 2:1 (altura:diâmetro), sendo em seguida levados até a prensa para os rompimentos respectivos.

Determinaram-se os teores de umidade dos corpos de prova rompidos, a fim de determinar a influência que os valores de umidade das misturas produzem no desempenho dos corpos de prova nos ensaios de resistência de compressão simples.

O procedimento de moldagem para os ensaios de compressão simples com ruptura aos 28 dias foi o mesmo. Após serem moldados, os corpos de prova foram colocados em sacolas plásticas e em seguida foram fechadas para serem guardadas em câmara úmida por 28 dias. Após a conclusão do tempo estabelecido, se procedeu às medições dos diâmetros e alturas e finalmente procedeu-se ao rompimento na prensa.

5.9. Ensaio de permeabilidade

O ensaio de permeabilidade é importante para se verificar o comportamento hídrico das misturas estudadas e compará-las com o comportamento dos solos. As duas amostras de solo e suas respectivas misturas foram submetidas aos ensaios de permeabilidade no laboratório de acordo com as recomendações da norma ABNT NBR 14545/00, que descreve a determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável, pelo qual foi utilizado o permeâmetro à carga variável do método A descrito na norma.

Head (1986) faz uma descrição detalhada deste ensaio e os diversos fatores que interferem nos resultados. Os corpos de prova foram compactados dinamicamente no cilindro do permeâmetro na energia do ensaio Proctor Normal, quando utilizado o cilindro grande e o disco espaçador. Nesta energia os corpos de prova foram moldados em cinco camadas, cada uma recebendo 12 golpes de um soquete de 4,536 kg caindo de uma altura de 0,457 m, segundo o indicado na norma ABNT NBR 7182/84 para compactação, realizando escarificação intermediária nos contatos para se garantir a homogeneidade e ligação entre as camadas. Da mesma forma que para a compactação, se retirou o excesso do solo da última camada com ajuda de uma régua, sendo que os corpos de prova mediram aproximadamente 11,5 cm de altura e 15,2 cm de diâmetro. Colocou-se o cilindro do permeâmetro na base dele e na parte superior a tampa, sendo que a base e a tampa continham um anel de vedação de borracha. No fundo e no topo foram colocadas telas que funcionaram como filtros para evitar o entupimento do dispositivo. Após o fechamento da tampa, procedeu-se à saturação do corpo de prova. Por fim, a descarga foi medida em uma bureta graduada de seção conhecida ($0,72 \text{ cm}^2$), medindo o tempo de percolação da água pelo corpo de prova, ou seja, o tempo que a água leva para baixar de uma altura inicial (h_0) até uma altura final (h_f). Com estes dados foi possível fazer o cálculo do coeficiente de permeabilidade (k) utilizando a Lei de Darcy, descrita por Pinto (2006), sendo que para carga variável o valor obtido foi corrigido para temperatura equivalente de $20 \text{ }^\circ\text{C}$ (k_{20°).

As leituras do tempo foram realizadas em intervalos de cargas inicial e final para $h_0 = 80 \text{ cm}$ e $h_f = 70 \text{ cm}$.

Como estes ensaios não são o escopo do trabalho, para cada tipo de solo e suas respectivas misturas foi moldado só um corpo de prova cilíndrico, com a finalidade de coletar a água e realizar estudos preliminares da composição físico-química da água percolada para poder determinar se a mistura contamina o solo ou o lençol freático através da infiltração.

5.10. Ensaios para análises físico-químicas das águas coletadas

Considerou-se necessário e importante fazer análises preliminares sobre a composição física e química das amostras de água coletadas a partir de ensaios de permeabilidade. Assim, estas amostras foram submetidas aos ensaios de determinação de pH, condutividade elétrica (CE), cor aparente, dureza total e demanda química de oxigênio (DQO) no Laboratório de Saneamento - LABSAN - do Departamento de Saneamento e Ambiente da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Unicamp, de acordo com a metodologia internacional prescrita no *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 22^a Edição (SMEWW, 2012).

As amostras foram coletadas em garrafas PET, previamente lavadas com água destilada para evitar a presença de resíduos. Coletou-se aproximadamente 500 ml de água no ensaio de permeabilidade. Imediatamente após a coleta, optou-se por realizar alguns ensaios no mesmo dia e outros no dia seguinte preservando as amostras com refrigeração a 4 °C e sob abrigo da luz para evitar a perda de compostos voláteis e minimizar o crescimento de microrganismos.

Para cada amostra de água os ensaios foram realizados duas vezes, a fim de se ter uma maior confiabilidade nos resultados.

Cabe ressaltar que a maioria das amostras não apresentou coloração, mas algumas tiveram uma coloração amarela clara.

5.10.1. pH

Conforme o SMEWW (2012), na química da água, um dos testes mais importantes e frequentemente utilizados é a medição do pH. Praticamente todas as fases de abastecimento de água e tratamento de águas residuais, por exemplo, a neutralização ácido-base, amaciamento de água, precipitação, coagulação, desinfecção e controle de corrosão, são dependentes do pH. O pH é utilizado em medições de dióxido de carbono e alcalinidade e muitos outros equilíbrios ácido-base. O pH indica a intensidade do carácter ácido ou básico de uma solução a uma temperatura dada. A alcalinidade e acidez são as capacidades neutralizantes ácidas e básicas da água e, geralmente, são expressos como miligramas por litro de CaCO_3 . Capacidade tampão é a quantidade de um ácido forte ou uma base forte, normalmente expressa em moles por litro, necessária para alterar o valor do pH de uma amostra de 1 L por 1 unidade.

A metodologia utilizada para a determinação do pH é a prescrita no SMEWW 4500-H⁺B: Método Eletrométrico, o qual tem como princípio básico da medição eletrométrica do pH a determinação da atividade dos íons de hidrogênio, por medição potenciométrica utilizando um eletrodo padrão de hidrogênio e um eletrodo de referência.

O equipamento utilizado foi o pHmetro (Figura 5.7a) que consiste de um potenciômetro, um eletrodo de vidro (bulbo de vidro especial contendo uma solução tamponada de cloreto ou concentração fixa de HCl), um eletrodo de referência (fornece um potencial de eletrodo constante) e um dispositivo de compensação de temperatura; um circuito é completado por meio do potenciômetro quando os eletrodos são imersos na solução de ensaio.

Antes de fazer as respectivas leituras das amostras o pHmetro foi calibrado utilizando duas soluções tampão de pH 7 e pH 4 na temperatura ambiente. A calibração foi feita com pH 7 que representa 0 mV (milivolts) na leitura, também chamado ponto isopotencial (0 mV/pH 7). Após a calibração se procedeu às leituras das amostras lavando o eletrodo com água destilada e enxugando-o com papel após cada leitura para retirar os resíduos.

5.10.2. Condutividade elétrica (CE)

A condutividade elétrica mede a capacidade de uma solução aquosa para levar uma corrente elétrica. Esta capacidade depende de dois fatores: a presença de íons (em sua concentração total, mobilidade e valência) e a temperatura de medição. As soluções da maioria dos compostos inorgânicos são relativamente bons condutores. Por outro lado, as moléculas de compostos orgânicos que não se dissociam em uma solução aquosa conduzem muito pouca corrente (SMEWW, 2012).

As unidades da CE são 1/ohm-cm ou mho por centímetro, embora seja geralmente indicada em micromhos por centímetro ($\mu\text{mho/cm}$). No Sistema Internacional de Unidades (SI), o inverso do ohm representa a Siemens (S) e a CE é reportada como miliSiemens por metro (mS/m), $1 \text{ mS/m} = 10 \mu\text{mhos/cm}$ e $1 \mu\text{S/cm} = 1 \mu\text{mho/cm}$. Para comparar condutividades, os valores de CE são reportados para eletrodos com $A = 1 \text{ cm}^2$ e $L = 1 \text{ cm}$, onde A é a área de superfície do eletrodo e L a distância entre os eletrodos.

Nesta pesquisa decidiu-se medir a condutividade para avaliar as variações na concentração de minerais dissolvidos das águas das amostras sem fibra (águas brutas) e das águas das amostras com diferentes porcentagens de fibra.

A metodologia utilizada para a determinação da CE é a prescrita no SMEWW 2510B: Condutividade - Método de Laboratório.

O equipamento utilizado foi o condutímetro (Figura 5.7b) que consiste de um instrumento de condutividade autônomo (capaz de medir a CE com um erro não superior a 1% ou $1 \mu\text{S/cm}$, o que for maior), sensor de temperatura automático e a célula de condutividade (tipo eletrodo-platina disponíveis em forma de pipeta). A constante interna da célula é ajustada com a solução de referência padrão (cloreto de potássio, KCl, $0,01 \text{ mol L}^{-1}$), que a 25°C , tem uma condutividade de $1412 \mu\text{mhos/cm}$.

O condutímetro utilizado indica a CE diretamente nas unidades especificadas anteriormente. Então, assim como se fez para o pH, realizaram-se as leituras das

amostras lavando o eletrodo com água destilada e enxugando-o com papel após cada leitura para retirar os resíduos.



Figura 5.7 – Equipamentos utilizados para determinar pH e CE: a) pHmetro e eletrodo, b) condutivímetro e eletrodo

5.10.3. Cor aparente

A presença de íons metálicos naturais (ferro e manganês), substâncias húmicas e fúlvicas, argilas e resíduos industriais podem conferir cor à água. É importante a sua remoção, a fim de se garantir a sua qualidade para fins domésticos e industriais. Águas residuais coloridas podem exigir a remoção da cor antes da descarga em cursos d'água (SMEWW, 2012).

Nas análises de águas o termo “cor” significa a cor verdadeira, isto é, a cor da água a partir da qual a turbidez foi removida. Mas também existe o termo “cor aparente” que além de incluir a cor devido às substâncias na solução inclui a cor devido ao material em suspensão. A cor aparente se determina diretamente na amostra original, ao passo que para a determinação da cor verdadeira se necessita prévia filtração (0,45 μm) ou centrifugação. Em algumas águas residuais altamente coloridas a cor é

principalmente atribuída ao material coloidal ou suspenso; nesses casos, tanto a cor verdadeira quanto a cor aparente devem ser determinadas.

Nesta pesquisa, decidiu-se avaliar simplesmente a cor aparente devido à pouca contribuição de partículas suspensas e a coloração clara das amostras.

A metodologia utilizada para a determinação da cor aparente é a prescrita no SMEWW 2120C: Método Espectrofotométrico, o qual tem como princípio básico que a cor de uma amostra filtrada é expressa em termos que descrevem a sensação percebida ao visualizar a amostra; o comprimento de onda dominante (matiz – vermelho, verde), a luminância (grau de brilho) e a pureza (saturação – pálido, pastel) são melhor determinados a partir das características de transmissão de luz da amostra filtrada por meio de um espectrofotômetro.

O espectrofotômetro (figura 5.8a) utilizado foi o da marca Hach que lê entre 190 e 1100 nm (nanômetro) de comprimento de onda; este equipamento tem um programa próprio para determinar a cor que lê a absorbância, utiliza uma curva analítica e a converte em concentração de platina-cobalto (Pt-Co) que são as unidades da cor. Para os ensaios foi utilizado esse programa utilizando o comprimento de onda (λ) de 465 nm.

Para fazer as leituras da cor utilizou-se uma cubeta de vidro com 2,5 cm de caminho óptico e capacidade de 25 mL. Após selecionar o programa no equipamento, realizou-se um branco analítico com água destilada. Após foram feitas as leituras das amostras, lavando-se a cubeta com água destilada entre as leituras e tomando cuidado de manter limpas as paredes desta para não interferir nos resultados.

É recomendável primeiro lavar as paredes internas da cubeta com a própria amostra, descartar essa água e em seguida colocar as amostras para ler. É recomendável iniciar as leituras com as amostras mais claras e em seguida as escuras.



a)

b)

Figura 5.8 – Leitura de cor aparente: a) espectrofotômetro, b) amostra pronta para ser lida

5.10.4. Dureza total

A dureza total é a soma das concentrações de cálcio e magnésio, ambos expresso como carbonato de cálcio, em miligramas por litro. A dureza pode variar de zero a centenas de miligramas por litro, dependendo da fonte e o tratamento a que a água tenha sido submetida (SMEWW, 2012).

A metodologia utilizada para medir a dureza é a prescrita no SMEWW 2340C: Método de Titulação de EDTA, que mede íons de cálcio e magnésio e pode ser aplicado a qualquer tipo de água. O princípio deste método é que quando o Ácido etilenodiaminotetracético e os seus sais de sódio (abreviadamente EDTA) são adicionados a uma solução de certos cátions metálicos formam um complexo solúvel de quelato; geralmente se utiliza um corante (Negro de Eriocromo T ou Calmagite) que é adicionado a uma solução contendo cálcio e magnésio e faz com que esta se torne vermelha, a um pH de $10,0 \pm 0,1$, e, além disso, se uma quantidade necessária do EDTA é adicionada, o cálcio e o magnésio são complexados e a solução se torna azul.

A unidade da dureza é em miligramas de carbonato de cálcio por litro ($\text{mg CaCO}_3/\text{L}$) por tecnicidade, devido a que a alcalinidade é também expressa nas mesmas

unidades e normalmente estes valores são comparados para determinar se a amostra tem uma dureza permanente (não carbonatada) ou temporária (de carbonatos), que é importante em águas industriais ou residuais.

Para realizar o ensaio foram utilizados: uma solução tampão composta por cloreto de amônio (NH_4Cl), hidróxido de amônio (NH_4OH) e EDTA; o indicador Negro de Eriocromo T (Erio T) em uma mistura sólida a 1% com NaCl; e o titulante EDTA dissódico diidratado em solução $0,01 \text{ mol L}^{-1}$. Se a amostra apresentar uma dureza alta seriam suficientes 25 ml de amostra diluída em água destilada, mas se a dureza for baixa se precisariam de 100 a 1000 ml de amostra, então como não se tem resultados prévios destas amostras optou-se por utilizar 100 ml para segurança. Nesta amostra de 100 ml foram adicionadas 5 gotas (2 ml) de solução tampão, embora 1 ml é suficiente para dar um pH de $10,0 \pm 0,1$, e com um indicador universal de pH se verificou o pH da amostra; a seguir se adicionaram duas pontas de espátula do Erio T em pó seco, tornando a solução vermelha (Figura 5.9a), o que significa a presença de cálcio e magnésio; daí se começou a adicionar o EDTA lentamente, através de uma bureta graduada, com agitação contínua da amostra até a última coloração avermelhada desaparecer e se tornar azul (Figura 5.9b), o que indica que todo o cálcio e magnésio foram complexados e é o ponto final da titulação. O volume de EDTA utilizado na titulação é o importante para calcular o resultado da dureza.

Quando a amostra começa a mudar de cor é recomendável adicionar as últimas gotas de EDTA em intervalos de 3 a 5 segundos. O tempo ideal de duração da titulação é que seja no máximo 5 min para minimizar a tendência para a precipitação de CaCO_3 . Cabe ressaltar que as amostras de coloração amarela clara ao olho nu apresentaram coloração laranja ao adicionar o Erio T e, portanto ao terminar a titulação apresentaram coloração verde.

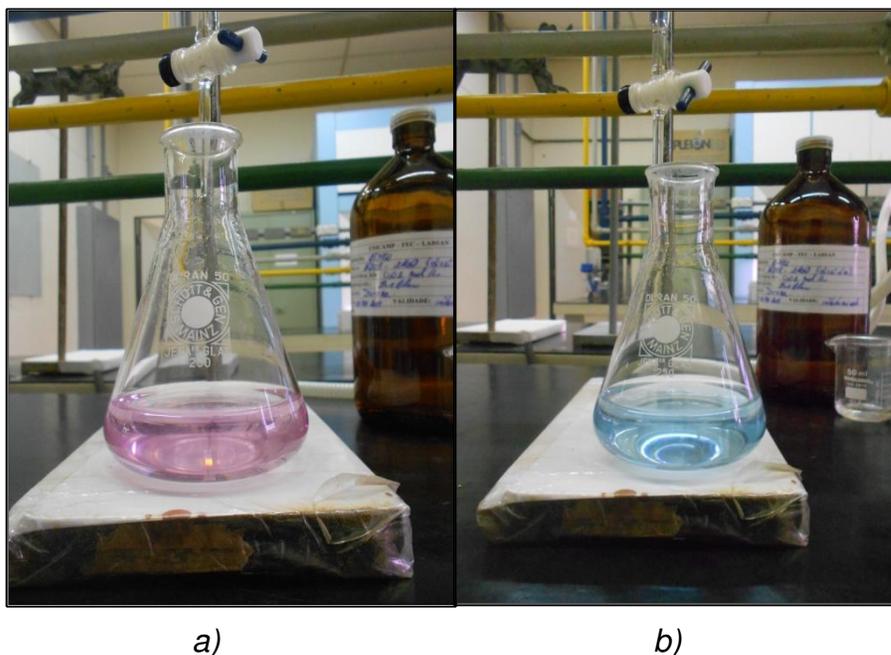


Figura 5.9 – Ensaio de dureza total: a) indicador Negro de Eriocromo T adicionado à amostra, b) ponto final da titulação com EDTA

5.10.5. Demanda química de oxigênio (DQO)

A quantidade de um oxidante especificado que reage com a amostra sob condições controladas é a conhecida como demanda química de oxigênio. Todas as amostras têm dois componentes, orgânico e inorgânico, ambos os componentes são sujeitos à oxidação, mas na maioria dos casos, o componente orgânico predomina e é de maior interesse. Neste teste, o grau de oxidação da amostra pode ser afetado por um período de digestão, a força do reagente e a concentração de DQO da amostra (SMEWW, 2012).

Geralmente o DQO serve para medir poluentes nas águas, tanto residuais como naturais. O problema é que numa análise de DQO podem se gerar resíduos perigosos de mercúrio, crômio hexavalente, ácido sulfúrico, prata e ácidos, mas também nos métodos de referência se mencionam formas para reduzir esses problemas.

Existem dois métodos para a determinação da DQO: o método de refluxo aberto que é adequado para uma vasta gama de resíduos e se precisa de uma amostra de maior volume; e, o método de refluxo fechado que gera pequenas quantidades de resíduos perigosos, mas requer homogeneização de amostras que contêm sólidos suspensos para obter resultados reprodutíveis, além de ser mais econômico na utilização de reagentes de sais metálicos.

A metodologia utilizada para determinar a DQO é a prescrita no SMEWW 5220D: Refluxo fechado, Método Colorimétrico. O princípio deste método é que a matéria orgânica é oxidada por uma mistura em ebulição (processo chamado digestão) de ácido sulfúrico e crômico (solução fortemente ácida); então a amostra se submete a refluxo por 2 horas (tempo padrão) nessa solução, com um excesso conhecido do oxidante dicromato de potássio ($K_2Cr_2O_7$) que após da digestão é possível determinar a quantidade consumida deste titulando o dicromato não reduzido remanescente com sulfato de amônio ferroso, e a matéria oxidável é calculada em termos de oxigênio equivalente; devido às suas propriedades químicas únicas, o íon dicromato ($Cr_2O_7^{2-}$) é reduzido para o íon de crômio (Cr^{3+}) após a digestão.

Foram utilizados tubos pequenos de vidro, sendo um tubo para cada amostra e mais um com água destilada que seria o zero das leituras. Nos tubos se colocaram 2,5 ml das amostras de água, 1,5 ml de solução digestora (dicromato de potássio + sulfato de mercúrio) e 3,5 ml de solução catalisadora (ácido sulfúrico concentrado + sulfato de prata) e se fez uma pequena agitação para misturar as soluções (Figura 5.10a). Na sequência, se submeteram estas amostras a refluxo por 2 horas no bloco digestor (Figura 5.10b) a 150 °C. Após esse período e com as amostras esfriadas procedeu-se às leituras respectivas de absorbância das amostras no espectrofotômetro utilizando um comprimento de onda (λ) de 600 nm (faixa verde); da mesma forma que se fez para a cor aparente, realizou-se um branco analítico que foi o tubo contendo água destilada mais as soluções digestora e catalisadora; após isto se fizeram as leituras das amostras, sempre tomando cuidado de manter limpas as paredes externas do tubo para não interferir nos resultados.

Cabe ressaltar que para valores de DQO entre 100 e 900 mg/L, o aumento do Cr^{3+} na região de 600 nm é determinado, devido a que o íon crômio absorve fortemente na região 600 nm do espectro; os valores DQO de 90 mg/L ou menos, podem ser determinados seguindo a diminuição do $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ a 420 nm.

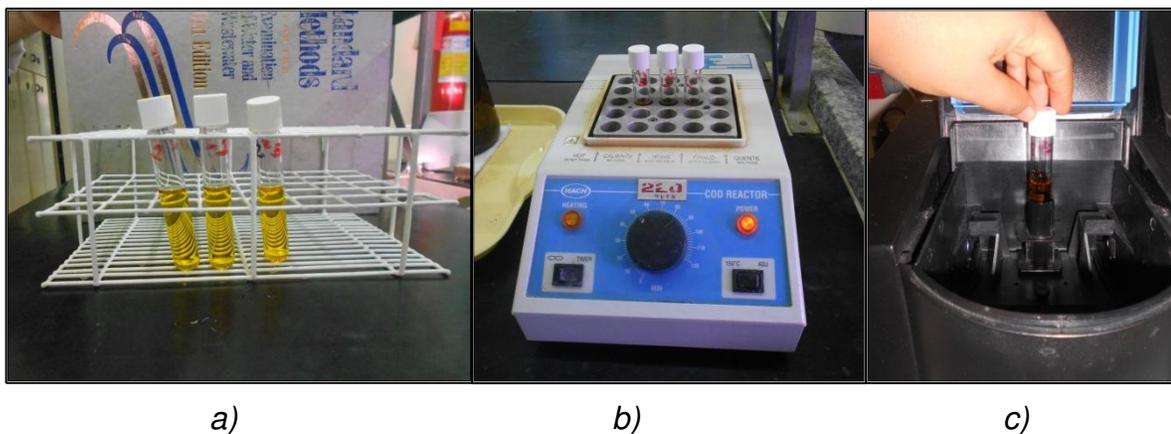


Figura 5.10 – DQO: a) amostras de água misturadas com dicromato de potássio e ácido sulfúrico concentrado, b) amostras em bloco digestor, c) amostra pronta para ser lida

5.11. Análise estatística dos dados experimentais

Dos vários testes de comparações múltiplas optou-se por aplicar o teste de Dunnett ao nível de significância de 5%, no qual, quando um controle está presente, as comparações de interesse preliminar podem ser as comparações de cada novo tratamento com o controle.

Nesta pesquisa o controle ou tratamento “padrão” são os parâmetros obtidos sem adição de fibra, e os novos tratamentos a serem testados e comparados com o controle seriam os parâmetros obtidos com diferentes teores de fibra.

Para a aplicação do teste de Dunnett nos resultados, foi utilizado o *software Action* que utiliza a plataforma *R* e o Excel de forma integrada, disponibilizado

gratuitamente no site <http://www.portalaction.com.br/content/download-action>. Assim, no capítulo 6 se apresentam as discussões sobre a aplicação do teste nos resultados.

6. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

Este capítulo apresenta e analisa os resultados dos ensaios de laboratório referentes à caracterização física, compactação, cisalhamento direto e compressão simples dos solos e misturas, bem como as análises físicas e químicas das águas coletadas por meio dos ensaios de permeabilidade.

6.1. Ensaio de caracterização física

6.1.1. Análise granulométrica

Os ensaios de granulometria conjunta foram realizados de acordo com a norma ABNT NBR 7181/84 utilizando o defloculante hexametáfosfato de sódio, e possibilitaram a classificação dos solos estudados conforme é possível observar nas figuras 6.1 e 6.2 e tabelas 6.1 e 6.2 para os solos arenoso e argiloso, respectivamente.

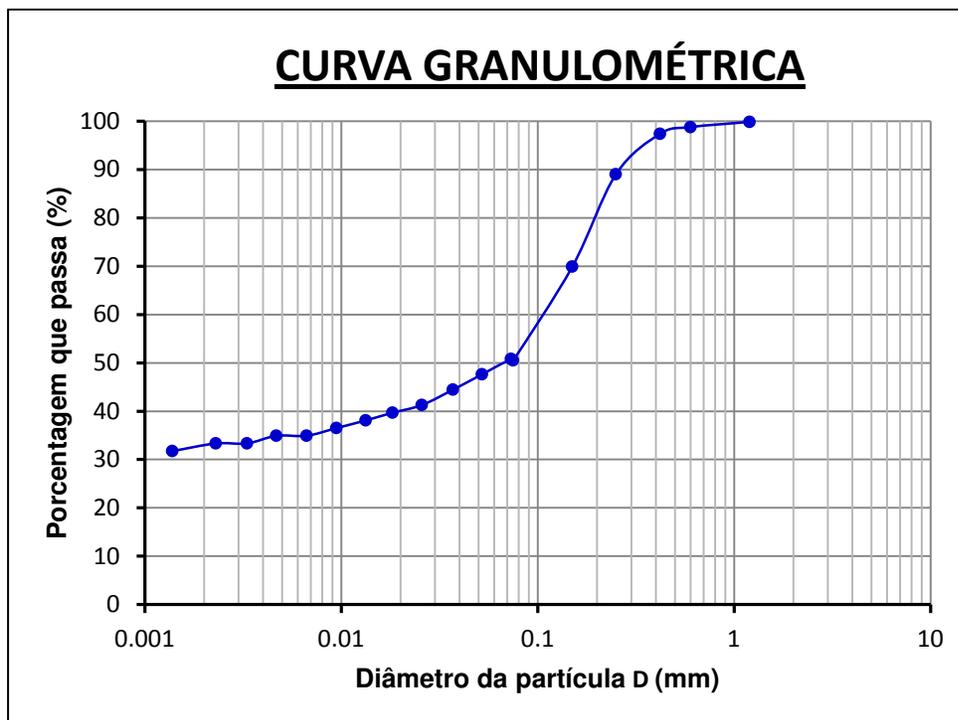


Figura 6.1 – Curva granulométrica do solo arenoso

Tabela 6.1 – Classificação do solo arenoso segundo NBR 6502/95

	% Solo	Classificação	
>2mm	0,0	pedregulho = 0%	
0,6 < D < 2 mm	1,2	areia grossa = 1,2%	areia=51,7%
0,2 < D < 0,6 mm	17,8	areia média = 17,8%	
0,06 < D < 0,2 mm	32,7	areia fina = 32,7%	
0,002 < D < 0,06 mm	15,3	silte = 15,3%	
D < 0,002 mm	33,0	argila = 33,0%	

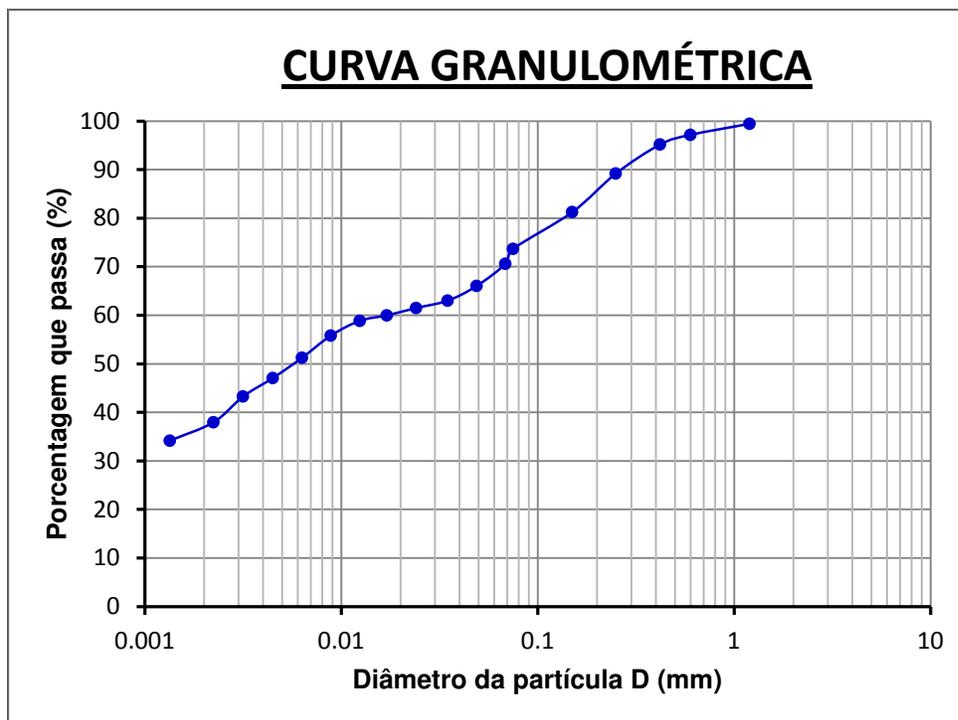


Figura 6.2 – Curva granulométrica do solo argiloso

Tabela 6.2 – Classificação do solo argiloso segundo NBR 6502/95

	% Solo	Classificação	
>2mm	0,0	pedregulho = 0%	
0,6 < D < 2 mm	2,8	areia grossa = 2,8%	areia=30,8%
0,2 < D < 0,6 mm	11,3	areia média = 11,3%	
0,06 < D < 0,2 mm	16,7	areia fina = 16,7%	
0,002 < D < 0,06 mm	32,3	silte = 32,3%	
D < 0,002 mm	36,9	argila = 36,9%	

A partir da curva granulométrica é possível determinar os parâmetros do diâmetro efetivo (D_{10}), o diâmetro 50 (D_{50}), o coeficiente de não uniformidade CNU e o coeficiente de curvatura CC. Não foi possível calcular todos estes parâmetros porque nas duas granulometrias apresentadas não tem massa de solo passante abaixo de 10%. Segundo o Sistema Unificado de Classificação dos Solos esses parâmetros auxiliam na classificação de solos de granulação grossa, como são pedregulhos e

areias grossas ou puras; e no caso de areias com finos, argilas e siltes a classificação é feita com ajuda dos Limites de Atterberg, como se apresenta no item seguinte 6.1.2.

Mesmo assim, a tabela 6.3 apresenta o D_{50} e D_{60} junto com o peso específico dos sólidos (γ_s) e as classificações dos solos segundo a NBR 6502/95.

Tabela 6.3 – Peso específico dos sólidos, D_{50} , D_{60} e granulometria NBR dos solos arenoso e argiloso

Solos	γ_s (kN/m ³)	Diâmetros (mm)		Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)	Classificação (NBR 6502)
		D_{50}	D_{60}				
Arenoso	27,0	0,0670	0,1052	33,0	15,3	51,7	Areia fina a média argilo – siltosa
Argiloso	29,3	0,0057	0,0172	36,9	32,3	30,8	Argila silto – arenosa

Segundo o estudo realizado por GON (2011), a textura argilo silto – arenosa do solo argiloso da UNICAMP, utilizando defloculante no ensaio de granulometria, se apresenta até uma profundidade de 2 metros.

6.1.2. Limites de Atterberg

Nos ensaios de Limites de Atterberg, obteve-se o limite de liquidez (LL), o limite de plasticidade (LP), o limite de contração (LC) e também se calculou o índice de plasticidade (IP) e o grau de contração (C) das duas amostras dos solos estudados. O índice de plasticidade é importante na classificação de solos granulares finos. A tabela 6.4 mostra os resultados encontrados nesses ensaios.

Tabela 6.4 – Valores de Limites de Consistência

Solos	LL (%)	LP (%)	LC (%)	IP (%)
Arenoso	35,0	21,2	17,9	13,8
Argiloso	45,5	32,3	15,3	13,1

Conforme descrito na tabela 6.4, a amostra do solo argiloso apresenta o índice de plasticidade muito próximo à amostra do solo arenoso, mesmo apresentando valores dos limites de liquidez e plástico muito maiores do que o solo arenoso. Segundo Burmister (1949), que classificou o índice de plasticidade de forma qualitativa, os dois solos apresentam plasticidade média por apresentar $10\% < IP < 20\%$ e segundo a proposição de Jenkins (Caputo, 1998), os dois solos são classificados como medianamente plásticos por apresentar $7\% < IP < 15\%$.

Comparando os valores deste trabalho para o solo argiloso com aqueles obtidos no estudo de Gon (2011), verificou-se que se assemelham ao solo coletado a 2 m de profundidade.

6.1.3. Classificação dos Solos

Com os resultados obtidos por meio dos ensaios de Limites de Atterberg e granulometria, foi possível classificar os solos de acordo com o Sistema Unificado de Classificação dos Solos – USCS (Unified Soil Classification System) proposta por Casagrande em 1942 e com o sistema de classificação da AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) desenvolvido pelo “Bureau of Public Roads” em 1929 para a utilização na área de estradas. Mas, também foi feita a classificação dos solos pela metodologia MCT, utilizando o método de ensaio da norma DNER-ME 258/94 – “*Solos compactados em equipamento miniatura Mini-MCV*” desenvolvido por Nogami e Villibor em 1981 a partir das limitações das classificações tradicionais (AASHTO, SUCS) para solos tropicais.

Para a classificação MCT (Miniatura Compactada Tropical), foram realizados ensaios de mini-MCV (Moisture Condition Value) e de perda de massa por imersão. A família de curvas de compactação, outros gráficos e o resumo dos resultados obtidos nos ensaios de mini-MCV, dos dois solos estudados, encontram-se no anexo A desta pesquisa.

Seguindo os respectivos procedimentos para as classificações citadas, na tabela 6.5 se apresenta a síntese das classificações encontradas.

Tabela 6.5 – Identificação dos solos pelas classificações NBR, USCS, AASHTO e MCT

Solos	Sistema de Classificação			
	NBR	USCS	AASHTO/HRB	MCT
Arenoso	Areia fina a média argilo - siltosa	SC com finos CL	A-6 (4)	NG'
Argiloso	Argila silto - arenosa	ML	A-7-5 (10)	LG'

A seguir descrevem-se as classes nas que se enquadram os solos pesquisados neste trabalho:

- O solo arenoso, pela classificação NBR é considerado de textura areno-argilo-siltosa; pela USCS, trata-se de uma areia argilosa com representação da fração fina na Carta de Plasticidade de Casagrande acima da linha A (CL - argila inorgânica de mediana plasticidade); pela AASHTO, é considerado como um solo argiloso, cujo comportamento como camada de pavimento é regular a mau e apresenta grandes variações de volume entre os estados seco e úmido; e, pela metodologia MCT, é um solo não-laterítico argiloso que apresenta características das argilas tradicionais muito plásticas e expansivas quando compactado nos parâmetros ótimos de compactação.
- O solo argiloso, pela classificação NBR é considerado de textura argilo-silto-arenosa; pela USCS, trata-se de um silte inorgânico de mediana compressibilidade com areia; pela AASHTO, é considerado como um solo

argiloso, cujo comportamento como camada de pavimento é regular a mau, apresenta grandes variações de volume entre os estados seco e úmido e elevado limite de liquidez; e, pela metodologia MCT, é um solo laterítico argiloso que apresenta resistência à erosão hidráulica quando compactados apropriadamente, mas possui colapsibilidade em estado natural por imersão em água e alta permeabilidade quando apresentam agregados bem desenvolvidos.

Convenciona-se em 12% a quantidade de finos necessária para que afete as propriedades de engenharia do solo (resistência ao cisalhamento, deformabilidade e permeabilidade), embora se sabendo que a influência dos finos no comportamento de um solo depende não somente de sua quantidade, mas também da atividade do argilo-mineral preponderante.

Skempton (1953) observou que o índice de plasticidade de um solo aumenta linearmente com a porcentagem da fração de argila presente. Com base nisso, definiu o índice chamado atividade, que avalia a atividade dos argilo-minerais (equação 6.1).

$$A = \frac{IP}{\% < 0,002mm} \dots \dots \dots (6.1)$$

Nesta equação, o termo %<0,002mm representa a porcentagem de partículas com diâmetro inferior a 2μ presentes no solo. Este índice indica maior ou menor influencia das propriedades mineralógicas e químico-coloidais da fração de argila das propriedades geotécnicas de um solo argiloso. Ainda segundo Skempton, os solos podem ser classificados de acordo com a sua atividade do seguinte modo:

- Solos inativos: $A < 0,75$
- Solos medianamente ativos: $0,75 < A < 1,25$
- Solos ativos: $A > 1,25$

Na tabela 5.6 apresentam-se os valores dos índices de atividade coloidal, determinados para os solos naturais. Como se observa na tabela, os valores são baixos.

Tabela 6.6 – Índice de Atividade das Argilas

Solos	%<0,002mm	A	Atividade
Arenoso	33,0	0,42	Inativa
Argiloso	36,9	0,36	Inativa

Pode-se verificar na tabela 6.3 e 6.5, que o solo arenoso mesmo tendo uma maior fração de areia e menor de argila, apresenta um comportamento de argila de mediana plasticidade (CL) segundo a carta de Casagrande, enquanto o solo argiloso apresenta um comportamento de silte de mediana compressibilidade (ML). Isto é, como citado previamente, devido a que a qualidade da argila presente no solo arenoso é pior do que a qualidade da presente no solo argiloso, indiferente da quantidade de argila; isso também se aprecia nos valores da atividade da argila na tabela 6.6, onde é maior para o solo arenoso do que para o solo argiloso.

6.2. Ensaio de compactação - Proctor Normal

Os fundamentos da compactação dos solos são relativamente novos e foram desenvolvidos por Ralph Proctor, que, na década de 20, postulou ser a compactação uma função de quatro variáveis: a) Peso específico seco, b) Umidade ótima, c) Energia de compactação e d) Tipo de solo (grosso, finos, etc.). A compactação dos solos tem uma grande importância para as obras geotécnicas, pois através do processo de compactação consegue-se promover no solo um aumento da sua resistência estável e uma diminuição da sua compressibilidade e permeabilidade. Como foi mencionado, o ensaio de Proctor foi padronizado no Brasil pela ABNT (NBR 7182/86). Em sua última revisão esta norma apresenta diversas alternativas para a realização do ensaio.

Este ensaio foi realizado para os dois solos em estudo utilizando a energia Proctor Normal. Na figura 6.3 apresentam-se as curvas de compactação do solo natural e do solo-fibras dispersas de papel Kraft para o solo arenoso e na figura 6.4 para o solo argiloso. Nas duas figuras observam-se as repetições feitas dos ensaios para a avaliação estatística.

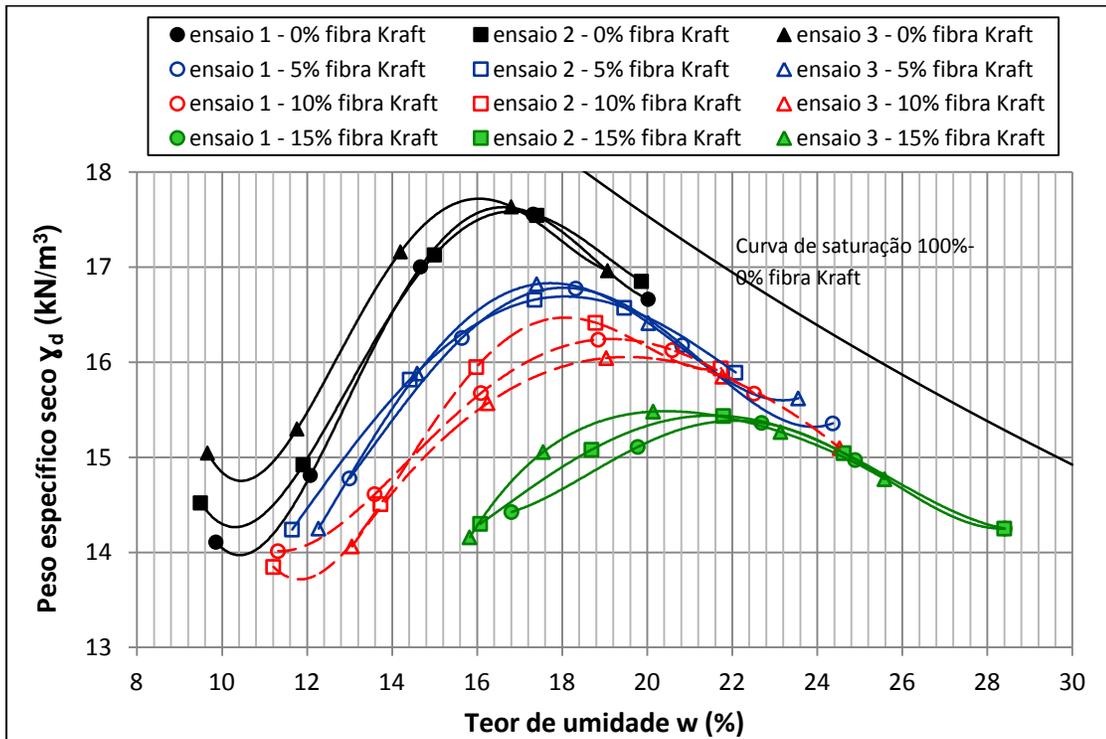


Figura 6.3 – Curvas de compactação das misturas solo arenoso - fibras dispersas de papel Kraft

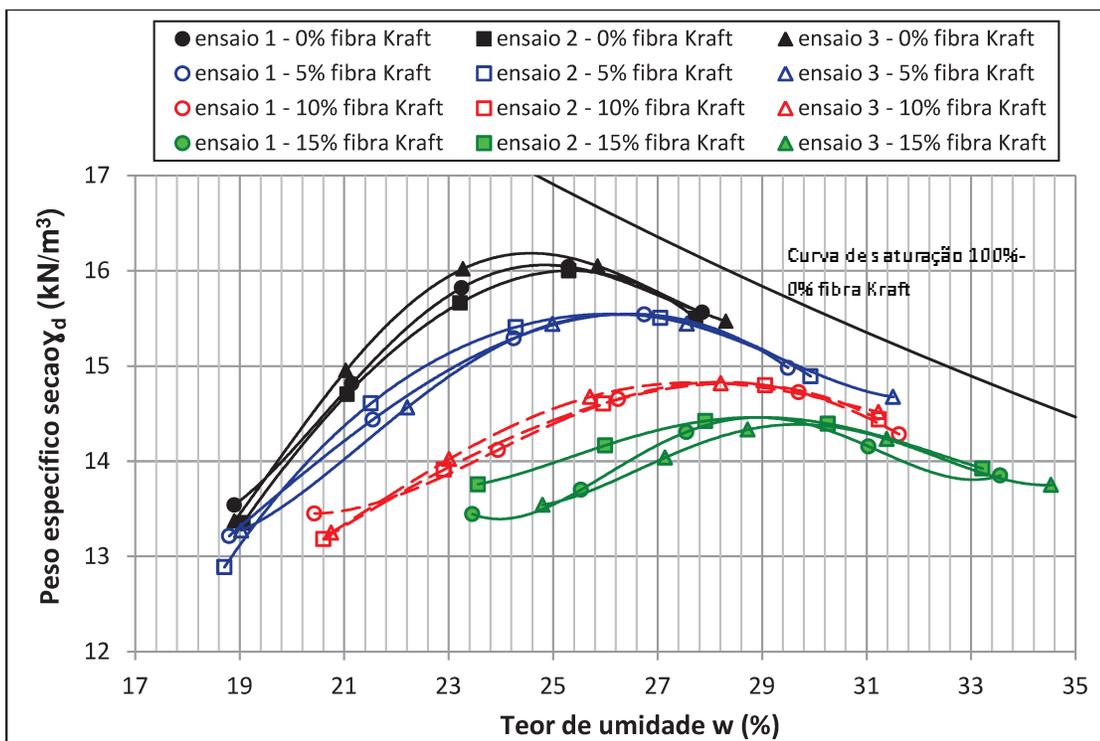


Figura 6.4 – Curvas de compactação das misturas solo argiloso - fibras dispersas de papel Kraft

Na tabela 6.7 encontram-se os resultados obtidos de teor de umidade ótima ($w_{ót}$) e de peso específico aparente seco máximo ($\gamma_{dmáx}$), na energia de compactação do ensaio Proctor normal, para os solos estudados e as suas misturas respectivas.

Tabela 6.7 – Peso específico seco máximo ($\gamma_{dm\acute{a}x}$) e teor de umidade 6tima (w_{6t}) dos ensaios de compacta66o das misturas solo – fibras dispersas de papel Kraft

Par6metros		Porcentagens de fibras dispersas de papel Kraft aplicadas ao solo arenoso				Porcentagens de fibras dispersas de papel Kraft aplicadas ao solo argiloso			
		0%	5%	10%	15%	0%	5%	10%	15%
$\gamma_{dm\acute{a}x}$ (kN/m ³)	A	17,6	16,8	16,2	15,4	16,1	15,6	14,8	14,4
	B	17,6	16,7	16,4	15,4	16,0	15,6	14,8	14,5
	C	17,7	16,8	16,1	15,5	16,2	15,5	14,8	14,4
	X	17,6	16,8	16,2	15,4	16,1	15,5	14,8	14,4
	Sd	0,059	0,072	0,195	0,050	0,086	0,012	0,006	0,049
	CV(%)	0,33	0,43	1,20	0,33	0,54	0,07	0,04	0,34
w_{6t} (%)	A	16,7	18,0	19,2	22,2	24,9	26,3	28,2	28,6
	B	16,8	18,1	18,2	21,6	25,2	26,1	28,3	28,9
	C	16,1	17,6	19,5	20,4	24,5	26,2	27,7	29,5
	X	16,5	17,9	19,0	21,4	24,9	26,2	28,1	29,0
	Sd	0,395	0,257	0,710	0,893	0,315	0,126	0,312	0,486
	CV(%)	2,4	1,4	3,7	4,2	1,3	0,5	1,1	1,7

A, B, C = Repeti66es

X = M6dia

Sd = Desvio padr6o

CV (%) = Coeficiente de varia66o

De acordo com Pinto (2006), de maneira geral, os solos argilosos apresentam densidades secas baixas e umidades 6timas elevadas da ordem de 14-15 kN/m³ e 25-30%, respectivamente; solos siltosos apresentam tamb6m valores baixos de densidade, frequentemente com curvas de laborat6rio bem abatidas; densidades secas m6ximas elevadas e umidades 6timas baixas, da ordem de 20-21 kN/m³ e 9-10% respectivamente, s6o representativas de areias com pedregulho, bem graduadas e pouco argilosas; areias finas argilosas later6ticas, ainda com a fra66o areia mal graduada, apresentam densidades seca m6ximas da ordem de 19 kN/m³ e umidades 6timas de 12-14%. Tendo em vista as curvas t6picas de diversos solos brasileiros, segundo o autor, pode-se caracterizar o solo de Paul6nia (arenoso) como arenoso later6tico fino tendo-se valores m6dios de $\gamma_{dm\acute{a}x}=17,6\text{kN/m}^3$ e $w_{6t}=16,5\%$; e o solo da

Unicamp (argiloso) como siltoso pouco argiloso tendo-se valores médios de $\gamma_{dm\acute{a}x}=16,1\text{kN/m}^3$ e $w_{\acute{o}t}=24,9\%$.

Como se pode observar nas figuras 6.3 e 6.4 e na tabela 6.7, a adição de 5%, 10% e 15% de fibras dispersas de papel Kraft conduziu a menores valores de peso específico seco máximo da ordem de 5%, 8% e 13%, respectivamente, no solo arenoso, e da ordem de 4%, 8% e 11% no solo argiloso. Verificaram-se também aumentos no teor de umidade ótima da ordem de 8%, 15% e 30% no solo arenoso e de 5%, 10% e 16% no solo argiloso, quando adicionados 5%, 10% e 15% de fibras, respectivamente. Esta variabilidade se observa melhor nas figuras 6.5 e 6.6.

Além disso, pode-se observar que os valores dos desvios padrão (Sd) e coeficientes de variação (CV), que representam o grau de variabilidade dos dados em relação  média, são bem pequenos para todos os ensaios realizados, sendo os menores valores (Sd=0,006; CV=0,04%) para o resultado de peso específico seco máximo do solo argiloso com 10% de fibras dispersas e os maiores valores (Sd=0,710; CV=3,7%) para o resultado de teor de umidade ótima do solo arenoso com 10% de fibras dispersas; esta variação não é significativa.

As figuras 6.5 e 6.6, como descrito previamente, apresentam a variação de peso específico seco máximo e teor de umidade ótima, respectivamente, das misturas em função da porcentagem de fibras dispersas de papel Kraft para os dois solos estudados.

O teste de Dunnett, ao nível de significância de 5%, mostrou que a adição de fibras dispersas de papel Kraft, independentemente da porcentagem, diminuiu significativamente o valor do peso específico aparente seco máximo nos dois solos. No que se refere à umidade ótima, a análise estatística indicou que houve aumento significativo nos dois solos, sendo que os maiores valores de umidade ótima foram alcançados pela aplicação de 15% de fibras, seguido de 10% e 5%.

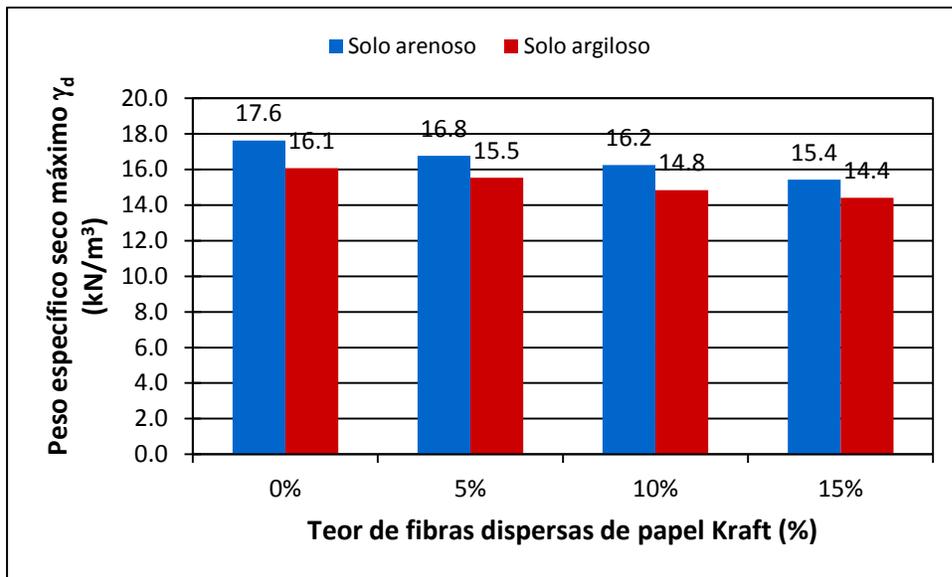


Figura 6.5 – Peso específico seco máximo em função da adição de fibras dispersas de papel Kraft aos dois solos

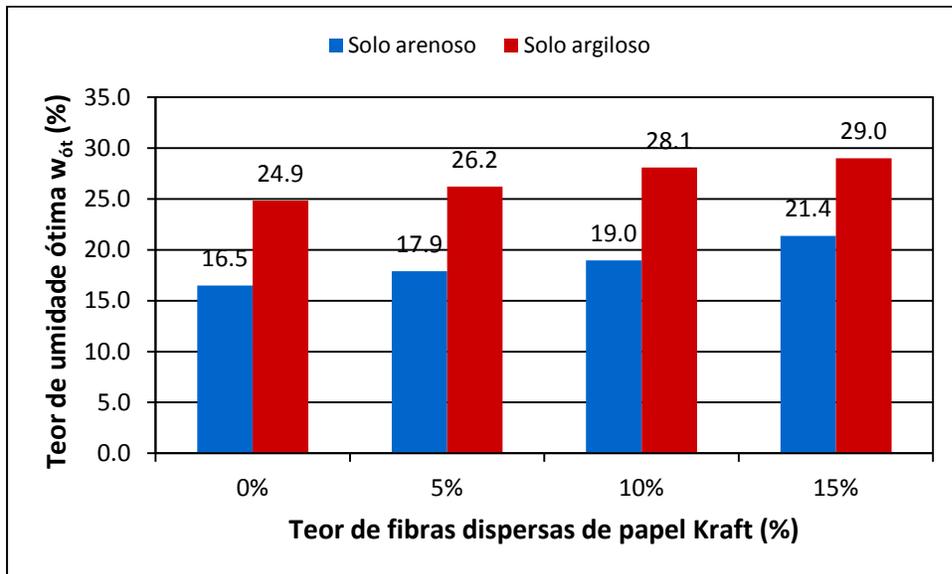


Figura 6.6 – Teor de umidade ótima em função da adição de fibras dispersas de papel Kraft aos dois solos

Acredita-se que o aumento do teor de umidade ótima com o acréscimo das fibras dispersas de papel Kraft nas misturas deve-se ao consumo de água das fibras, ou seja,

ao potencial de absorção. As reduções dos valores de peso específico aparente seco máximo podem ser atribuídas à formação de flóculos, estabelecendo-se ligações entre as partículas menores e favorecendo (pelo agrupamento desses agregados menores formados pela adição das fibras) a formação de agregados maiores que, conseqüentemente, produzem um material com estrutura com mais vazios.

É possível observar que a adição das fibras faz com que a mistura tenha o comportamento de uma argila, por isso o aumento da umidade ótima e a diminuição do peso específico seco máximo. Assim, outra possível causa da diminuição de $\gamma_{dm\acute{a}x}$ é o peso específico da fibra adicionada que é um material leve e produz o efeito de uma argila nas misturas.

Klock et. al. (2002), no seu estudo sobre as propriedades do papel Kraft feito à mão partir de dois tipos de madeira pino, indica que a gramatura de papel feito à mão a partir de celulose Kraft oscila na faixa de 57 a 62 g/m² e a densidade aparente na faixa de 0,59 a 0,69 g/cm³. Assim, considerando que a gramatura do papel Kraft natural para sacos multifoldados é de 80 a 90 g/m² poderia se deduzir que a densidade aparente do papel Kraft utilizado na pesquisa não passaria de 1 g/cm³, influenciando assim na diminuição do peso específico aparente seco máximo dos solos.

6.3. Ensaio de cisalhamento direto

Define-se resistência ao cisalhamento do solo como a máxima pressão de cisalhamento que o solo pode suportar sem sofrer ruptura, ou a tensão de cisalhamento do solo no plano em que a ruptura ocorre no momento da ruptura. Em Mecânica dos Solos, a resistência ao cisalhamento envolve duas componentes: atrito e coesão.

6.3.1. Cisalhamento direto na umidade ótima

A partir da realização dos ensaios de cisalhamento na umidade ótima (CDUO), conforme descrito em 5.7, obtiveram-se as envoltórias de resistência para cada tipo de solo e suas respectivas misturas.

Das repetições realizadas para os ensaios, optou-se por determinar a média das tensões cisalhantes máximas para cada tensão normal aplicada. Assim, as envoltórias médias para o solo arenoso e argiloso e suas respectivas misturas se apresentam nas figuras 6.7 e 6.8, respectivamente.

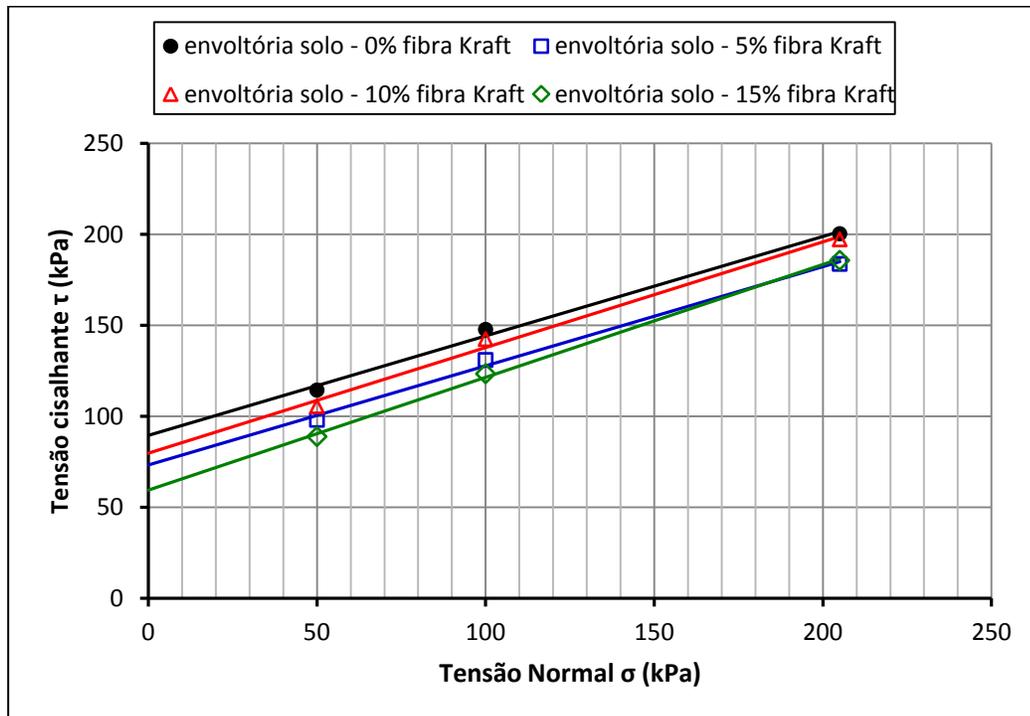


Figura 6.7 – Envoltórias médias de resistência das misturas solo arenoso - fibras dispersas de papel Kraft para ensaios de cisalhamento direto na umidade ótima

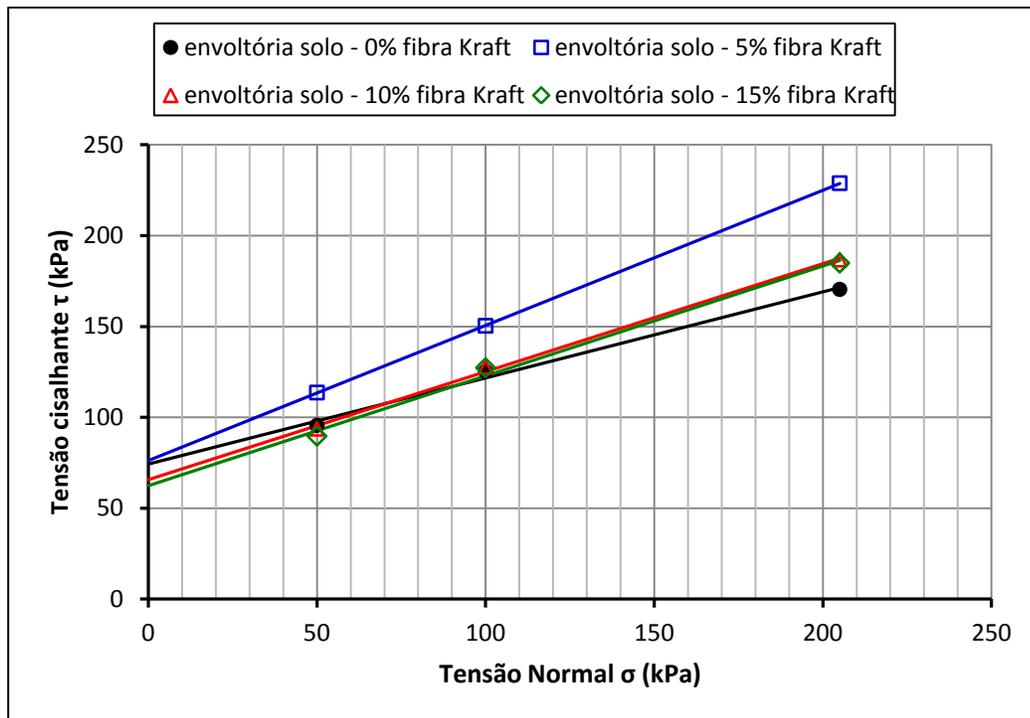


Figura 6.8 – Envoltórias médias de resistência das misturas solo argiloso - fibras dispersas de papel Kraft para ensaios de cisalhamento direto na umidade ótima

A partir das envoltórias médias de resistência obtiveram-se as respectivas equações destas apresentadas na tabela 6.8. Os valores numéricos dos ângulos de atrito e de interceptos de coesão para cada tipo de solo e suas respectivas misturas se apresentam na tabela 6.9.

Tabela 6.8 – Equações das envoltórias médias de resistência dos ensaios de cisalhamento direto na umidade ótima das misturas solo – fibras dispersas de papel Kraft

Solos	Porcentagens de fibras dispersas de papel Kraft aplicadas aos solos			
	0%	5%	10%	15%
Arenoso	$\tau = 90 + \sigma \tan 29^\circ$	$\tau = 73 + \sigma \tan 29^\circ$	$\tau = 80 + \sigma \tan 30^\circ$	$\tau = 59 + \sigma \tan 32^\circ$
Argiloso	$\tau = 74 + \sigma \tan 25^\circ$	$\tau = 76 + \sigma \tan 37^\circ$	$\tau = 66 + \sigma \tan 31^\circ$	$\tau = 62 + \sigma \tan 31^\circ$

Tabela 6.9 – Ângulo de atrito interno (ϕ) e coesão (c) dos ensaios de cisalhamento direto na umidade ótima das misturas solo – fibras dispersas de papel Kraft

Parâmetros		Porcentagens de fibras dispersas de papel Kraft aplicadas ao solo arenoso				Porcentagens de fibras dispersas de papel Kraft aplicadas ao solo argiloso			
		0%	5%	10%	15%	0%	5%	10%	15%
ϕ (°)	A	30	28	30	31	26	37	30	31
	B	28	28	29	32	25	36	30	33
	C	28	29	31	32	25	37	32	29
	X	29	29	30	32	25	37	31	31
	Sd	1,60	0,44	1,01	0,67	0,39	0,81	1,29	1,69
	CV(%)	5,6	1,5	3,3	2,1	1,5	2,2	4,2	5,4
c (kPa)	A	85	74	83	59	72	71	67	62
	B	92	71	78	59	75	85	67	59
	C	92	75	78	60	76	72	63	66
	X	90	73	80	59	74	76	66	62
	Sd	4,16	1,99	2,7	0,85	1,70	7,89	2,10	3,18
	CV(%)	4,6	2,7	3,4	1,4	2,3	10,3	3,2	5,1

A, B, C = Repetições

X = Média

Sd = Desvio padrão

CV (%) = Coeficiente de variação

Como se pode observar nas figuras 6.7 e 6.8 e na tabela 6.9, a adição de 5%, 10% e 15% de fibras dispersas de papel Kraft nos ensaios de CDUO conduziu a maiores valores de ângulo de atrito da ordem de 0%, 3% e 10%, respectivamente, no solo arenoso, e da ordem de 48%, 24% e 24% no solo argiloso. Verificaram-se também diminuição dos valores da coesão da ordem de 18%, 11% e 33% no solo arenoso, quando adicionados 5%, 10% e 15% de fibras, respectivamente; o solo argiloso apresentou aumento de coesão da ordem de 3% quando adicionados 5% de fibras e diminuição de coesão da ordem de 12% e 16% quando adicionados 10% e 15% de fibras, respectivamente. Esta variabilidade se observa melhor nas figuras 6.13 a 6.16.

Além disso, pode-se observar que os valores dos desvios padrão (Sd) e coeficientes de variação (CV), que representam o grau de variabilidade dos dados em relação à média, são aceitáveis para todos os ensaios realizados, sendo os menores

valores ($S_d=0,39$; $CV=1,5\%$) para o resultado de ângulo de atrito do solo argiloso com 0% de fibras dispersas e os maiores valores ($S_d=7,89$; $CV=10,3\%$) para os resultados de coesão do solo argiloso com 5% de fibras dispersas. Os coeficientes de variação apresentados não são significativos.

O teste de Dunnett, ao nível de significância de 5%, indicou que nos ensaios de CDUO não houve diferença significativa entre os valores de ângulo de atrito quando adicionados 5% e 10% de fibras no solo arenoso, mas indicou que a adição de 15% de fibras aumentou significativamente este valor no mesmo solo; no solo argiloso, o teste de Dunnett mostrou que a adição de fibras dispersas de papel Kraft nos ensaios de CDUO, independentemente da porcentagem, aumentou significativamente o valor do ângulo de atrito, sendo os maiores valores alcançados pela adição de 5%, seguido das adições de 10% e 15%, iguais entre si. No que se refere à coesão, a análise estatística indicou que houve diminuição significativa dos valores de coesão no solo arenoso, sendo que os menores valores foram alcançados pela adição de 15% de fibras, seguidos de 5% e 10%; no solo argiloso, não houve diferença significativa entre os valores de coesão nos tratamentos com 5% e 10%, mas houve diminuição significativa no tratamento com 15% de fibras.

6.3.2. Cisalhamento direto inundado

Seguindo o mesmo roteiro dos resultados de cisalhamento direto na umidade ótima, conforme descrito em 6.3.1, se apresentam as envoltórias médias de resistência nas figuras 6.9 e 6.10 para o solo arenoso e argiloso, respectivamente, e suas misturas na condição inundada (CDI).

Cabe ressaltar que conforme aumentou-se o teor de fibras nos solos, os corpos de prova, depois de imersos 24 h, apresentaram claras expansões, sendo as maiores apresentadas com 15% de fibras; esse fato está estreitamente ligado às deformações específicas horizontais dos corpos de prova, quer dizer, as deformações foram maiores quando os corpos de prova sofreram maiores expansões ao olho nu.

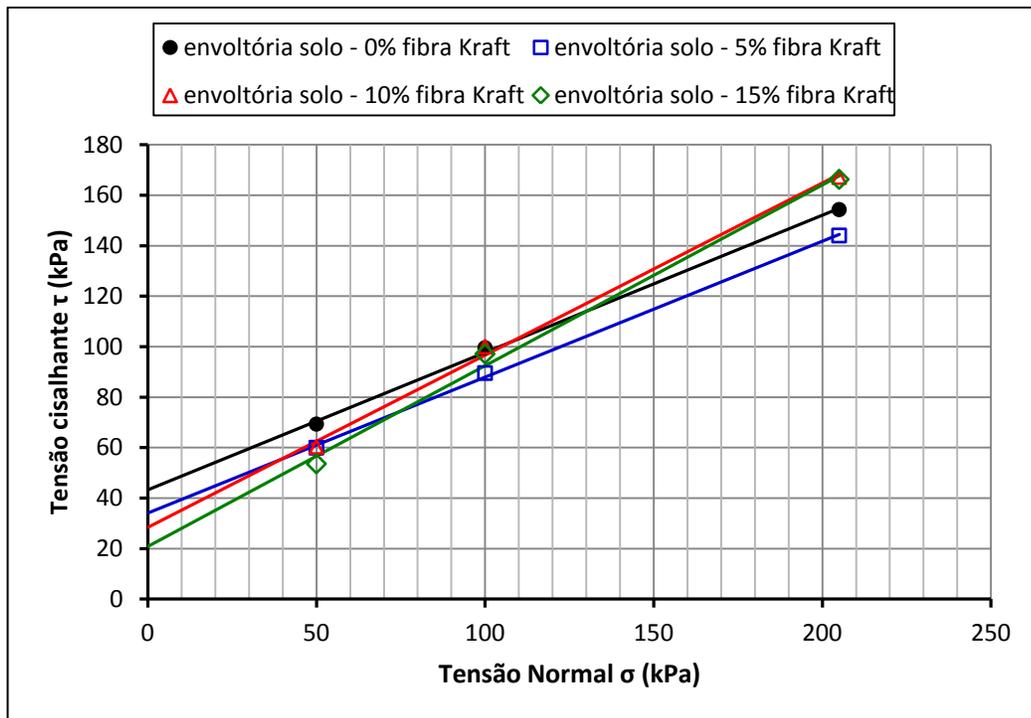


Figura 6.9 – Envoltórias médias de resistência das misturas solo arenoso - fibras dispersas de papel Kraft para ensaios de cisalhamento direto inundado

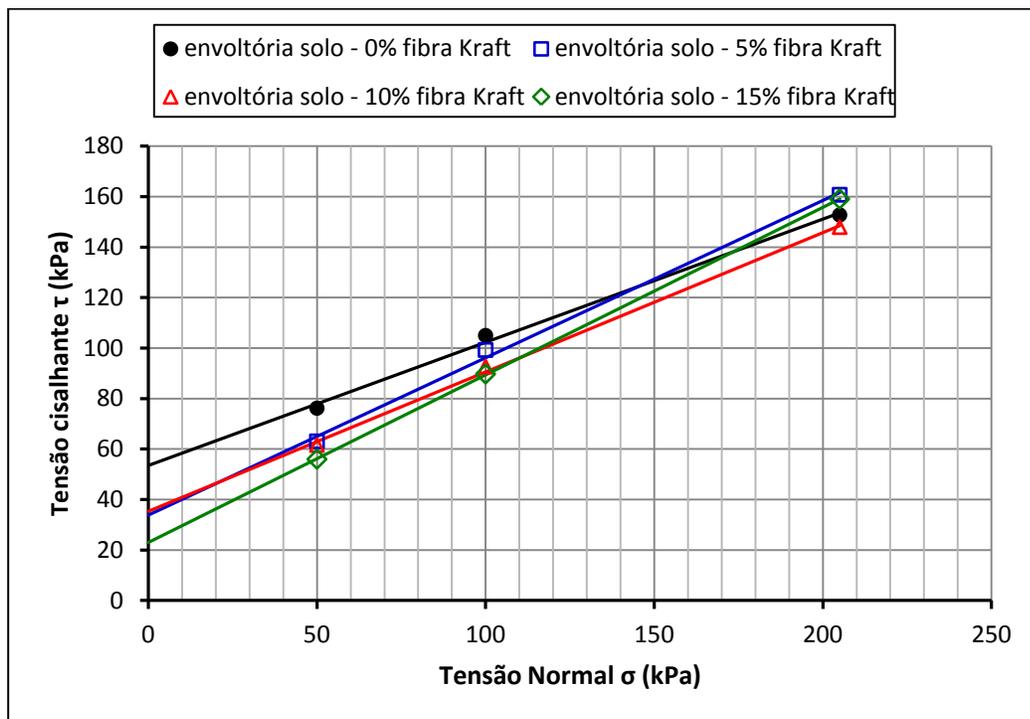


Figura 6.10 – Envoltórias médias de resistência das misturas solo argiloso - fibras dispersas de papel Kraft para ensaios de cisalhamento direto inundado

Do mesmo modo que para cisalhamento direto na umidade ótima, obtiveram-se as respectivas equações das envoltórias médias apresentadas na tabela 6.10. Os valores numéricos dos ângulos de atrito e de interceptos de coesão para cada tipo de solo e suas respectivas misturas na condição inundada se apresentam na tabela 6.11.

Tabela 6.10 – Equações das envoltórias médias de resistência dos ensaios de cisalhamento direto inundado das misturas solo – fibras dispersas de papel Kraft

Solos	Porcentagens de fibras dispersas de papel Kraft aplicadas aos solos			
	0%	5%	10%	15%
Arenoso	$\tau = 43 + \sigma \tan 29^\circ$	$\tau = 34 + \sigma \tan 28^\circ$	$\tau = 29 + \sigma \tan 34^\circ$	$\tau = 21 + \sigma \tan 36^\circ$
Argiloso	$\tau = 54 + \sigma \tan 26^\circ$	$\tau = 34 + \sigma \tan 32^\circ$	$\tau = 35 + \sigma \tan 29^\circ$	$\tau = 23 + \sigma \tan 34^\circ$

Tabela 6.11 – Ângulo de atrito interno (ϕ) e coesão (c) dos ensaios de cisalhamento direto inundado das misturas solo – fibras dispersas de papel Kraft

Parâmetros		Porcentagens de fibras dispersas de papel Kraft aplicadas ao solo arenoso				Porcentagens de fibras dispersas de papel Kraft aplicadas ao solo argiloso			
		0%	5%	10%	15%	0%	5%	10%	15%
ϕ (°)	A	29	28	36	35	25	32	28	34
	B	28	26	34	35	27	32	30	34
	C	28	31	33	37	26	32	29	33
	X	29	28	34	36	26	32	29	34
	Sd	0,88	2,42	1,41	0,81	1,29	0,26	0,89	0,73
	CV(%)	3,1	8,5	4,1	2,3	5,0	0,8	3,1	2,2
c (kPa)	A	46	34	29	18	51	35	35	25
	B	44	38	28	26	55	37	34	23
	C	40	30	28	18	55	29	37	21
	X	43	34	29	21	54	34	35	23
	Sd	3,23	4,33	0,85	4,66	2,67	4,07	1,52	2,03
	CV(%)	7,5	12,7	3,0	22,3	5,0	12,0	4,3	8,9

A, B, C = Repetições

X = Média

Sd = Desvio padrão

CV (%) = Coeficiente de variação

Como se pode observar nas figuras 6.9 e 6.10 e na tabela 6.11, a adição de 5% de fibras dispersas de papel Kraft nos ensaios de CDI conduziu a menores valores de ângulo de atrito da ordem de 3% e maiores valores da ordem de 17% e 24%, quando adicionados 10% e 15% de fibras, respectivamente, no solo arenoso; no solo argiloso se apresentaram maiores valores da ordem de 23%, 12% e 31% quando adicionados 5%, 10% e 15% de fibras, respectivamente. Verificaram-se também diminuição dos valores da coesão da ordem de 21%, 34% e 52% no solo arenoso, e da ordem de 37%, 34% e 57% no solo argiloso quando adicionados 5%, 10% e 15% de fibras, respectivamente. Esta variabilidade se observa melhor nas figuras 6.13 a 6.16.

Além disso, pode-se observar que os valores dos desvios padrão (Sd) e coeficientes de variação (CV), são aceitáveis para todos os ensaios realizados, sendo os menores valores (Sd=0,26; CV=0,8%) para o resultado de ângulo de atrito do solo argiloso com 5% de fibras dispersas e os maiores valores (Sd=4,66; CV=22,3%) para os resultados de coesão do solo arenoso com 15% de fibras dispersas. Mesmo tendo uma maior dispersão que conduzem aos maiores valores de Sd e CV, o coeficiente de variação apresentado entre os resultados não é significativo.

O teste de Dunnett, ao nível de significância de 5%, indicou que nos ensaios de CDI não houve diferença significativa entre os valores de ângulo de atrito quando adicionados 5% de fibras no solo arenoso, mas indicou que as adições de 10% e 15% de fibras aumentou significativamente este valor no mesmo solo; no solo argiloso, o teste de Dunnett mostrou que a adição de fibras dispersas de papel Kraft nos ensaios de CDI, independentemente da porcentagem, aumentou significativamente o valor do ângulo de atrito, sendo os maiores valores alcançados pela adição de 15%, seguido das adições de 5% e 10%. No que se refere à coesão, a análise estatística indicou que houve diminuição significativa dos valores de coesão no solo arenoso, sendo os menores valores alcançados pela adição de 15% de fibras, seguidos de 10% e 5%; no solo argiloso, também houve diminuição significativa dos valores de coesão, sendo os menores valores alcançados pela adição de 15% de fibras, seguidos de 5% e 10%, iguais entre si.

6.3.3. Cisalhamento direto com ruptura aos 28 dias

Seguindo ainda o mesmo roteiro dos resultados de cisalhamento direto na umidade ótima, conforme descrito em 6.3.1, se apresentam as envoltórias médias de resistência nas figuras 6.11 e 6.12 para o solo arenoso e argiloso, respectivamente, e suas misturas na condição de ruptura aos 28 dias (CD28).

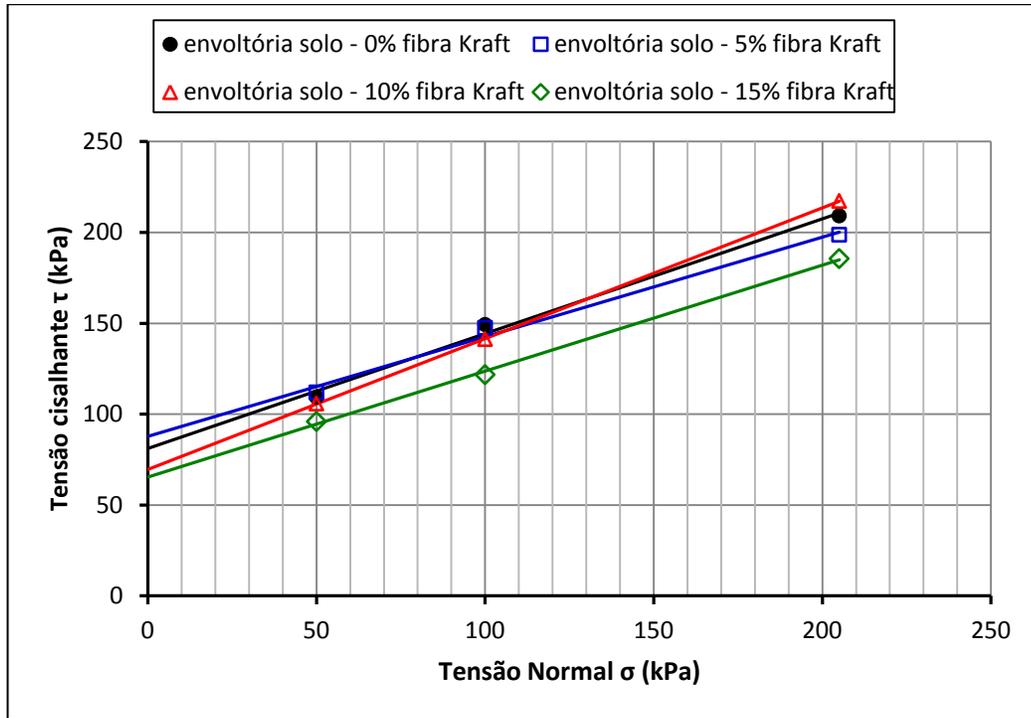


Figura 6.11 – Envoltórias médias de resistência das misturas solo arenoso - fibras dispersas de papel Kraft para ensaios de cisalhamento direto ruptura aos 28 dias

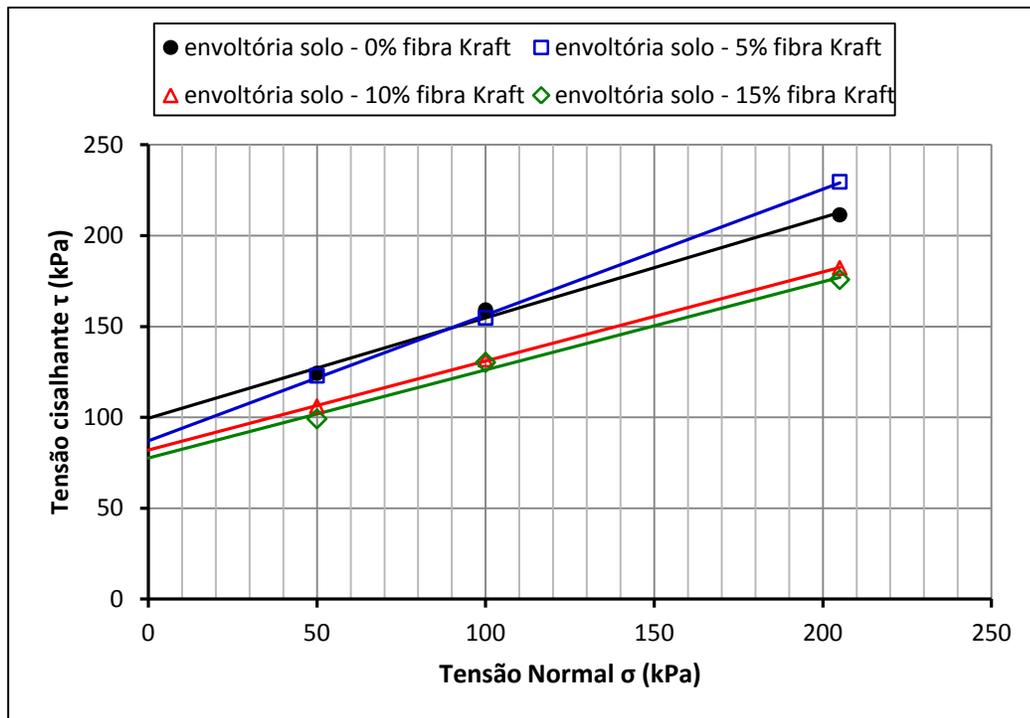


Figura 6.12 – Envoltórias médias de resistência das misturas solo argiloso - fibras dispersas de papel Kraft para ensaios de cisalhamento direto ruptura aos 28 dias

Do mesmo modo que para cisalhamento direto na umidade ótima, obtiveram-se as respectivas equações das envoltórias médias apresentadas na tabela 6.12. E, os valores numéricos dos ângulos de atrito e de interceptos de coesão para cada tipo de solo e suas respectivas misturas na condição de ruptura aos 28 dias se apresentam na tabela 6.13.

Tabela 6.12 – Equações das envoltórias médias de resistência dos ensaios de cisalhamento direto aos 28 dias das misturas solo – fibras dispersas de papel Kraft

Solos	Porcentagens de fibras dispersas de papel Kraft aplicadas aos solos			
	0%	5%	10%	15%
Arenoso	$\tau = 81 + \sigma \tan 32^\circ$	$\tau = 88 + \sigma \tan 29^\circ$	$\tau = 70 + \sigma \tan 36^\circ$	$\tau = 65 + \sigma \tan 30^\circ$
Argiloso	$\tau = 100 + \sigma \tan 29^\circ$	$\tau = 87 + \sigma \tan 35^\circ$	$\tau = 82 + \sigma \tan 26^\circ$	$\tau = 78 + \sigma \tan 26^\circ$

Tabela 6.13 – Ângulo de atrito interno (ϕ) e coesão (c) dos ensaios de cisalhamento direto com ruptura aos 28 dias das misturas solo – fibras dispersas de papel Kraft

Parâmetros		Porcentagens de fibras dispersas de papel Kraft aplicadas ao solo arenoso				Porcentagens de fibras dispersas de papel Kraft aplicadas ao solo argiloso			
		0%	5%	10%	15%	0%	5%	10%	15%
ϕ (°)	A	31	28	33	32	28	33	27	28
	B	33	30	36	29	28	35	26	24
	C	33	27	38	30	30	36	25	25
	X	32	29	36	30	29	35	26	26
	Sd	1,38	1,57	2,19	1,55	1,10	1,62	0,88	2,23
	CV(%)	4,3	5,5	6,1	5,1	3,8	4,7	3,4	8,6
c (kPa)	A	92	92	78	67	105	93	85	75
	B	76	85	70	66	99	88	79	80
	C	76	87	61	64	95	80	83	78
	X	81	88	70	65	100	87	82	78
	Sd	9,03	3,66	8,09	1,64	4,72	6,45	3,37	2,08
	CV(%)	4,2	4,2	11,6	2,5	4,7	7,4	4,1	2,7

A, B, C = Repetições

X = Média

Sd = Desvio padrão

CV (%) = Coeficiente de variação

Como se pode observar nas figuras 6.11 e 6.12 e na tabela 6.13, a adição de 5% e 15% de fibras dispersas de papel Kraft nos ensaios de CD28 conduziu a menores valores de ângulo de atrito da ordem de 9% e 6%, respectivamente, e a maiores valores da ordem de 13%, quando adicionado 10% de fibras no solo arenoso; no solo argiloso, a adição de 5% de fibras conduziu a maiores valores da ordem de 21%, e as adições de 10% e 15% conduziram a menores valores da ordem de 10%. Verificaram-se também aumento dos valores da coesão da ordem de 8% quando adicionado 5% de fibras no solo arenoso, e diminuição de coesão da ordem de 14% e 19% quando adicionados 10% e 15% de fibras, respectivamente; o solo argiloso apresentou diminuição de coesão da ordem de 12%, 17% e 22% adicionados 5%, 10% e 15% de fibras, respectivamente. Esta variabilidade se observa melhor nas figuras 6.13 a 6.16.

Além disso, pode-se observar que os valores dos desvios padrão (Sd) e coeficientes de variação (CV) são aceitáveis para todos os ensaios realizados, sendo os menores valores (Sd=0,88; CV=3,4%) para o resultado de ângulo de atrito do solo argiloso com 10% de fibras dispersas e os maiores valores (Sd=9,03; CV=11,6%) para os resultados de coesão do solo arenoso com 0% de fibras dispersas e coesão do solo arenoso com 10% de fibras dispersas. Como é possível observar, nesta condição se apresentaram os maiores valores de Sd e CV do que para as condições na umidade ótima e inundada, isto pode ser devido à mal homogeneização dos corpos na câmara úmida, podendo ter teores de umidade variáveis entre eles que afetam o comportamento do solo e misturas nos ensaios. Mas, mesmo tendo uma maior dispersão que conduzem aos maiores valores de Sd e CV, a variação apresentada entre os resultados não é significativa.

O teste de Dunnett, ao nível de significância de 5%, mostrou que a adição de fibras dispersas de papel Kraft nos ensaios de CD28, independentemente da porcentagem, não apresentou diferenças significativas entre os valores de ângulo de atrito no solo arenoso; no solo argiloso, o teste de Dunnett indicou que a adição de 5% de fibras nos ensaios de CD28 aumentou significativamente o valor do ângulo de atrito, mas também indicou que não houve diferenças nos valores quando adicionados 10% e 15% de fibras. No que se refere à coesão, a análise estatística mostrou que houve diminuição significativa dos valores de coesão no solo arenoso quando adicionado 15% de fibras, enquanto que para a adição de 5% e 10% não houve diferença nos valores; no solo argiloso, houve diminuição significativa dos valores de coesão, sendo os menores valores alcançados pela adição de 15% de fibras, seguidos de 10% e 5%.

As figuras 6.13 a 6.16 apresentam a variação de ângulo de atrito e coesão das misturas em função da porcentagem de fibras dispersas de papel Kraft para os dois solos estudados nas três condições estudadas no ensaio de cisalhamento direto que são: umidade ótima (CDUO), inundado (CDI) e com ruptura aos 28 dias (CD28).

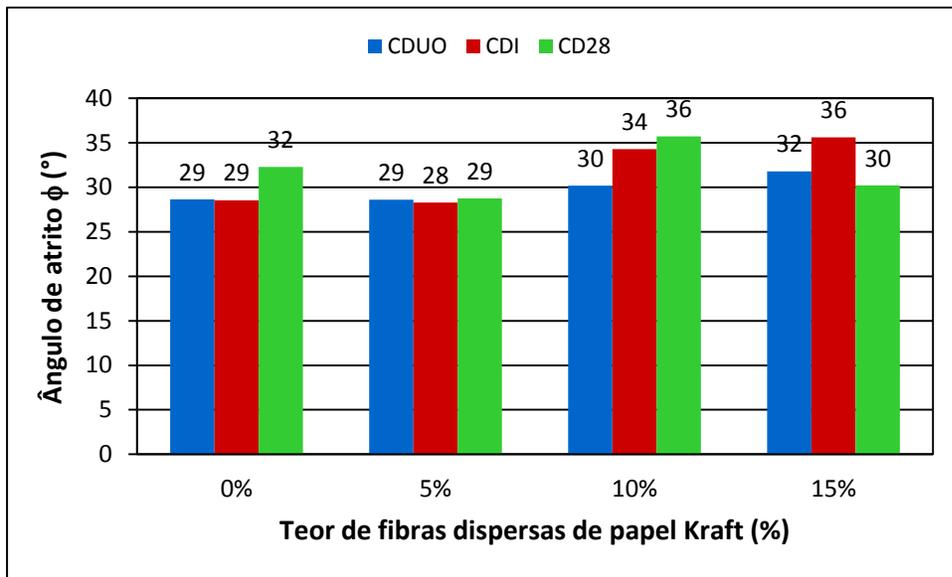


Figura 6.13 – Ângulo de atrito em função da adição de fibras dispersas de papel Kraft ao solo arenoso

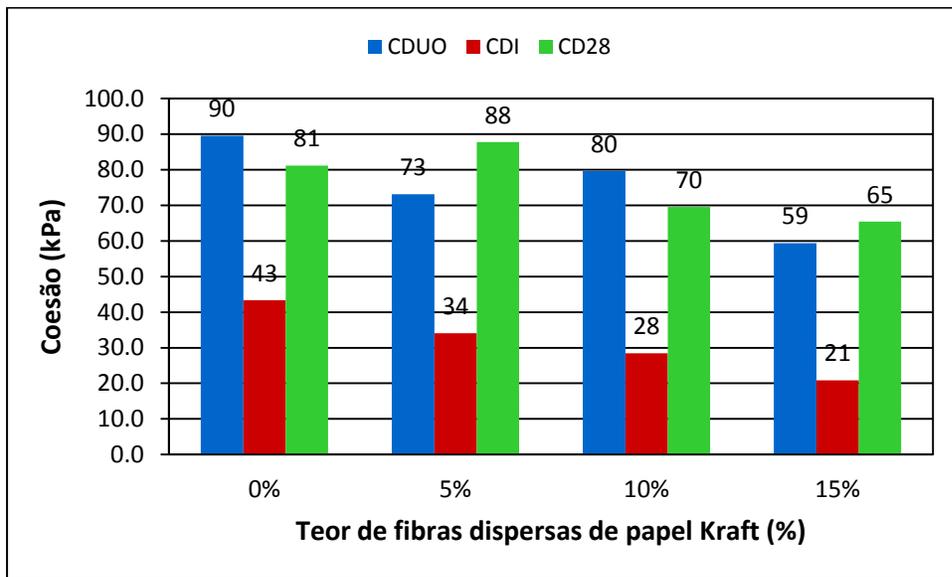


Figura 6.14 – Coesão em função da adição de fibras dispersas de papel Kraft ao solo arenoso

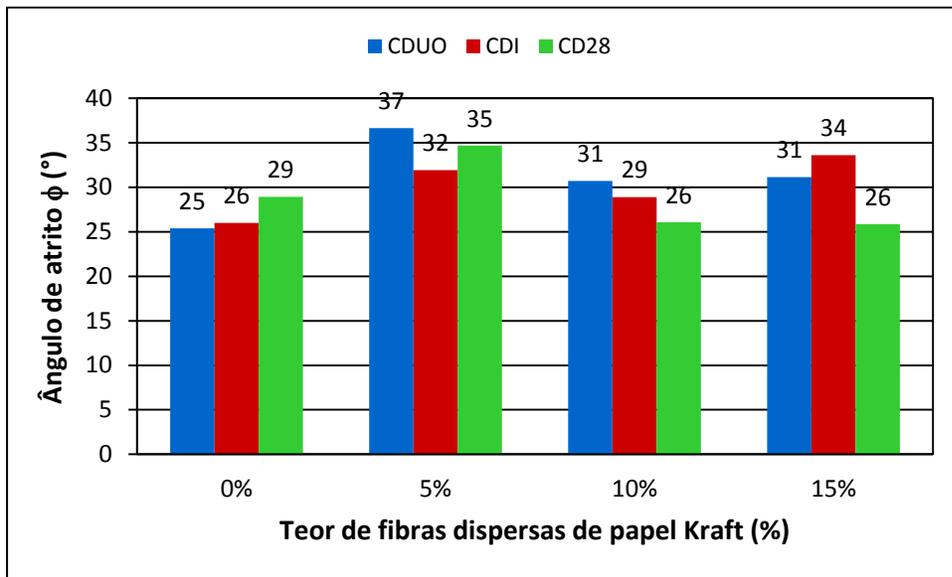


Figura 6.15 – Ângulo de atrito em função da adição de fibras dispersas de papel Kraft ao solo argiloso

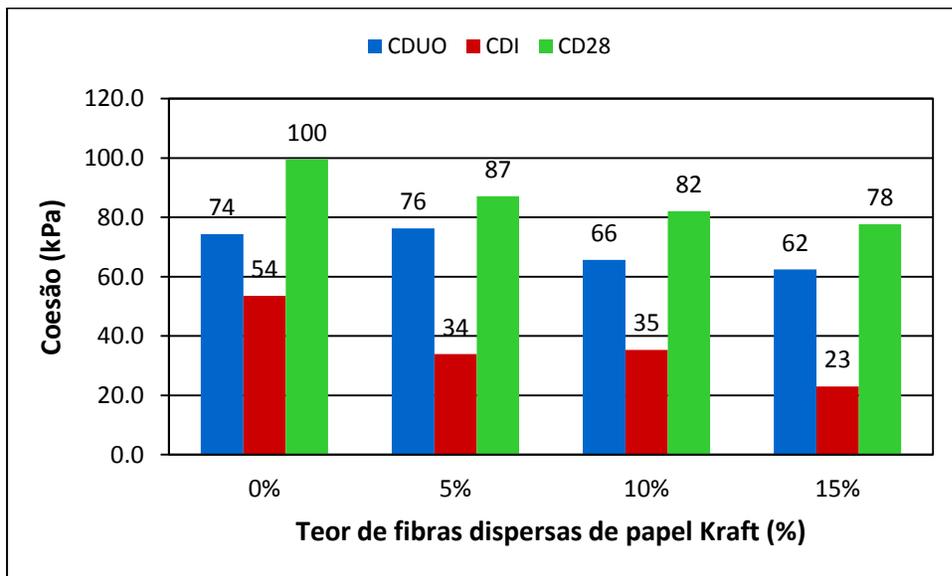


Figura 6.16 – Coesão em função da adição de fibras dispersas de papel Kraft ao solo argiloso

No caso particular da condição CD28 sem fibra pode se perceber que no solo arenoso houve um aumento de ângulo de atrito da ordem de 10% respeito da condição

CDUO sem fibra e no solo argiloso também houve um aumento, ainda maior, da ordem de 16% respeito da condição CDUO sem fibra, do que pode-se deduzir que o solo ganha resistência com o tempo quando compactado e deixado na câmara úmida; mesmo assim, quando as porcentagens de fibras foram adicionadas essa propriedade não foi refletida em todos os casos, sendo que no solo arenoso apenas se repetiu na condição CD28-10%fibra onde o ângulo de atrito aumentou 20% respeito da condição CDUO-10%fibra e no solo argiloso não houve mais essa propriedade, quer dizer que em todas as adições de fibras o ângulo de atrito da condição CDUO sempre foi maior do que CD28. Quanto à coesão, no solo arenoso houve uma diminuição na condição CD28 sem fibra, da ordem de 9% com relação da CDUO sem fibra, propriedade que se repetiu em CD28-10%fibra diminuindo 13% comparando-se com CDUO-10%fibra e nas outras duas porcentagens os valores de coesão da condição CD28 foram maiores do que na condição CDUO. O solo argiloso apresentou um comportamento diferente do arenoso quanto à coesão, sendo que a condição CD28 com e sem fibra apresentou aumento no valor deste parâmetro comparando-se com CDUO com e sem fibra, tendo o maior aumento na condição CD28-0%fibra da ordem de 34% com relação à CDUO-0%fibra.

Na comparação entre solos com mistura, o arenoso apresentou valores maiores de ângulo de atrito do que o solo argiloso em todas as condições com e sem fibra, exceto nas condições de 5%, na qual apresentou menores valores. Com respeito à coesão, o solo argiloso apresentou valores maiores do que o solo arenoso nas condições CDI e CD28 com e sem fibra, e menores valores na condição CDUO. Embora o solo arenoso apresente maiores valores de ângulo de atrito em algumas condições, não melhora as propriedades do solo ao nível desejado (ou seja, não melhora significativamente), a diferença do solo argiloso que melhora em torno de 48% para a condição CDUO, 23% para CDI e 21% para CD28 quando adicionado 5% de fibras dispersas de papel Kraft. Estas afirmações foram validadas com a aplicação do teste de Dunnett.

Segundo Pinto (2006) a resistência ao cisalhamento dos solos é essencialmente devida ao atrito entre as partículas; entretanto, a atração química entre estas partículas

pode provocar uma resistência independente da tensão normal atuante no plano e que constitui uma coesão real. Com base nisso e na comparação feita entre os solos com respeito à resistência ao cisalhamento, pode-se deduzir que o solo arenoso é mais resistente do que o solo argiloso; mas, quando se adiciona 5% de fibras aos dois solos a última afirmação se inverte, isto é o solo argiloso é mais resistente do que o arenoso com essa porcentagem de fibra ou mesmo sem fibra.

No anexo B deste trabalho apresentam-se as curvas da Tensão cisalhante (τ_i) vs. Deformação específica horizontal (ϵ_{hi}) para cada solo e mistura, e para cada tipo de ensaio de cisalhamento direto realizado (CDUO, CDI e CD28). Nessas figuras é possível observar que a deformação cisalhante específica horizontal aumenta conforme eleva-se a porcentagem de fibras nos dois solos estudados, indiferente do tipo de ensaio de cisalhamento realizado. Assim, na tabela 6.14 se apresentam as principais observações sobre estas curvas, ressaltando que os maiores valores de deformação foram obtidos quando aplicada a tensão normal de 205 kPa.

Tabela 6.14 – Deformações específicas referenciais dos valores pico das curvas tensão cisalhante vs. deformação específica horizontal dos ensaios de cisalhamento

Tipo de ensaio	Deformação específica horizontal atingida nos valores pico das tensões cisalhantes							
	no solo arenoso				no solo argiloso			
	0%	5%	10%	15%	0%	5%	10%	15%
CDUO	entre 4% e 5,5%	entre 4,5% e 7%	entre 7% e 14%	entre 7% e 16%	entre 4,5% e 8%	entre 5% e 12%	entre 9% e 20%	entre 9% e 19%
CDI	entre 4% e 6%	entre 5% e 8%	entre 10% e 20%	entre 9% e 18%	entre 5% e 8,5%	entre 4% e 13%	entre 9% e 20%	entre 9% e 18%
CD28	entre 3% e 4,5%	entre 4% e 8%	entre 6% e 15%	entre 6% e 16%	entre 3% e 7%	entre 4% e 9%	entre 5% e 15%	entre 5% e 15%

CDUO = Cisalhamento direto na umidade ótima

CDI = Cisalhamento direto inundado

CD28 = Cisalhamento direto com ruptura aos 28 dias

Segundo o descrito na tabela anterior, a adição de 5% de fibra aos solos não apresentou grandes variações nas deformações das três condições citadas; mas a adição de 10% e 15% acrescentam as deformações, quase ao dobro, nas três condições, sendo ainda deformações maiores na condição CDI. Pode-se, então, deduzir que a adição de fibra fornece ductilidade ao solo, que faz apresentar deformações maiores.

No anexo C apresentam-se as curvas de Variação volumétrica (ΔV_i) vs. Deformação específica horizontal (ϵ_{hi}) para cada solo e mistura, e para cada tipo de ensaio de cisalhamento direto realizado (CDUO, CDI e CD28). Nestas figuras é possível observar que a variação volumétrica também aumenta conforme aumenta a porcentagem de fibras, indiferente do tipo de ensaio de cisalhamento realizado. Também é possível observar que as variações volumétricas em alguns casos foram inicialmente de compressão e logo de expansão, e somente de compressão em outros quando aplicou-se a tensão normal de 205 kPa; assim, as maiores variações volumétricas foram apresentadas quando foi aplicada esta tensão normal nos três tipos de ensaios de cisalhamento e nos dois solos; estas variações se apresentam na tabela 6.15, a seguir.

Tabela 6.15 – Maiores variações volumétricas apresentadas nas curvas variação volumétrica vs. deformação específica horizontal dos ensaios de cisalhamento

Tipo de ensaio	Maior variação volumétrica atingida quando aplicada a tensão normal de 205 kPa							
	no solo arenoso				no solo argiloso			
	0%	5%	10%	15%	0%	5%	10%	15%
CDUO	0,5 cm ³	1,0 cm ³	1,7 cm ³	2,5 cm ³	1,2 cm ³	1,1 cm ³	3,1 cm ³	3,6 cm ³
CDI	1,6 cm ³	1,4 cm ³	2,3 cm ³	2,6 cm ³	1,5 cm ³	1,7 cm ³	2,6 cm ³	2,7 cm ³
CD28	0,6 cm ³	1,2 cm ³	1,5 cm ³	2,2 cm ³	0,6 cm ³	0,8 cm ³	2,2 cm ³	1,9 cm ³

CDUO = Cisalhamento direto na umidade ótima

CDI = Cisalhamento direto inundado

CD28 = Cisalhamento direto com ruptura aos 28 dias

Na tabela 6.15, claramente percebe-se que a variação volumétrica dos dois solos com 10% e 15% de fibra elevou a variação volumétrica dos solos sem fibra, sendo que os solos com 5% de fibra não apresentaram grandes diferenças quando comparados aos solos sem fibra.

As elevadas variações volumétricas quando aplicada a tensão normal de 205 kPa podem ser ocasionadas devido ao aumento da tensão normal sobre o solo que faz o volume dele diminuir e aumentar sua densidade (reduzir os vazios), e ainda no caso dos solos com fibra, que tem menores densidades, os vazios são maiores nos corpos de prova antes dos ensaios, pois quando se aplica a tensão normal faz com que o solo com fibras se comprima mais do que o solo sem fibra (que tem maior densidade), indiferente do teor de fibra e do tipo de ensaio.

Então, pode-se dizer que a adição excessiva de fibra contribui maiores deformações horizontais e variações volumétricas nos corpos de prova dos ensaios de cisalhamento.

6.4. Ensaios de compressão simples ou de resistência à compressão não confinada

Das (2011) define o ensaio de compressão não confinada como um tipo especial de ensaio não adensado e não drenado do ensaio triaxial, normalmente utilizado para corpos de prova de argila. Neste ensaio a pressão de confinamento σ_3 é nula. Uma carga axial é aplicada no corpo de prova para causar a ruptura.

Em Mecânica dos Solos, este ensaio é muito importante, pois permite obter um valor de carga última do solo, o qual se relaciona com a resistência ao cisalhamento do solo e fornece um valor de carga que pode ser utilizado em projetos que não necessitam de um valor mais preciso, pois o resultado é conservador. Envolve a resistência à compressão não confinada q_u , e indiretamente a resistência ao cisalhamento c_u .

Kondner (1963) relaciona tensões e deformações com base na teoria da elasticidade, onde as classifica como módulos de elasticidade, valores que, se não ultrapassados, possibilitam o retorno ao formato original do material após a deformação. Os módulos de elasticidade conhecidos são tangente, secante e tangente inicial; mas também, existem outros módulos em função de porcentagens da deformação da tensão máxima, para aplicações técnicas ou outros fins. Todos os módulos podem ser obtidos graficamente e para esta pesquisa foram determinados os módulos de elasticidade para 50% da deformação da tensão máxima (E_{50}).

6.4.1. Compressão simples na umidade ótima

A partir da realização dos ensaios de compressão simples, conforme descrito em 5.8, obtiveram-se as curvas Tensão vertical vs. Deformação específica para cada tipo de solo e suas respectivas misturas. Estas curvas se apresentam nas figuras 6.17 e 6.18 para o solo arenoso e argiloso, respectivamente, e suas misturas com as repetições realizadas para a avaliação estatística.

Cabe ressaltar que foram necessárias correções de algumas curvas de compressão por apresentarem ponto de inflexão, sendo necessário traçar a tangente à maior inclinação da curva até sua interseção com o eixo das abscissas e transferir a origem ao ponto de interseção; basicamente foi seguido o mesmo princípio de correção de curva no ensaio CBR (Índice de Suporte Califórnia).

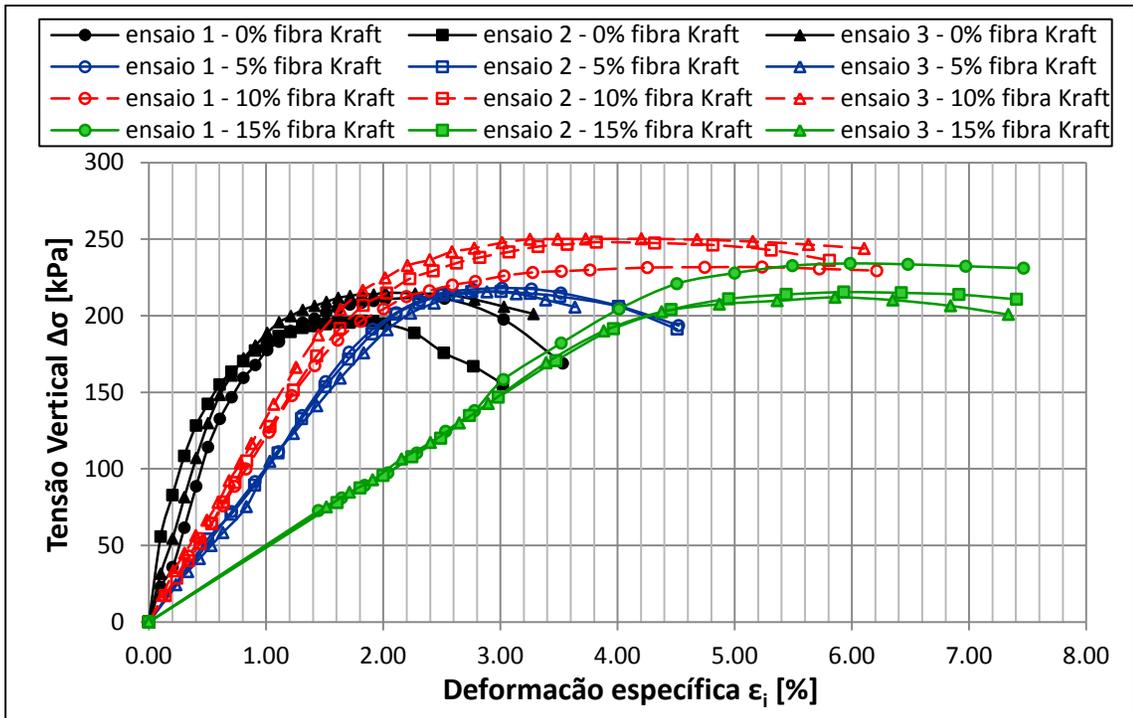


Figura 6.17 – Tensão vertical vs. Deformação específica das misturas solo arenoso - fibras dispersas de papel Kraft para ensaios de compressão simples

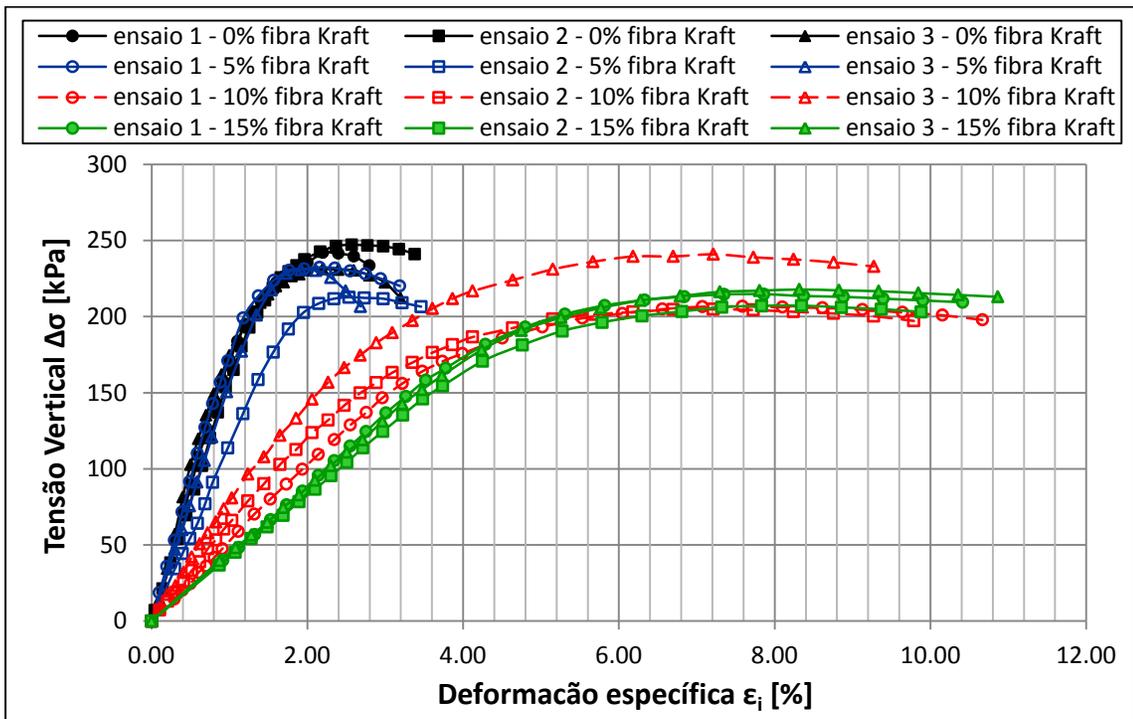


Figura 6.18 – Tensão vertical vs. Deformação específica das misturas solo argiloso - fibras dispersas de papel Kraft para ensaios de compressão simples

A tabela 6.16 apresenta os valores correspondentes à resistência à compressão simples e ao módulo de elasticidade E_{50} para cada tipo de solo e suas respectivas misturas, obtidos a partir das curvas Tensão vertical vs. Deformação específica.

Tabela 6.16 – Resistência à compressão simples (q_u) e Módulo de elasticidade (E_{50}) dos ensaios de compressão simples na umidade ótima das misturas solo – fibras dispersas de papel Kraft

Parâmetros		Porcentagens de fibras dispersas de papel Kraft aplicadas ao solo arenoso				Porcentagens de fibras dispersas de papel Kraft aplicadas ao solo argiloso			
		0%	5%	10%	15%	0%	5%	10%	15%
q_u (kPa)	A	211	218	232	234	242	232	207	215
	B	197	216	248	215	247	213	205	207
	C	215	216	250	212	231	231	241	218
	X	208	216	243	221	240	225	217	213
	Sd	9,64	1,33	10,09	11,87	8,13	10,92	20,30	5,50
	CV(%)	4,6	0,6	4,1	5,4	3,4	4,9	9,3	2,6
E_{50} (MPa)	A	15	11	8	5	17	17	5	4
	B	20	10	11	5	15	12	5	4
	C	19	10	11	5	17	16	6	4
	X	18	10	10	5	16	15	5	4
	Sd	2,25	0,52	1,46	0,16	0,90	2,89	0,60	0,16
	CV(%)	12,6	5,0	14,5	3,1	5,5	19,5	12,0	3,7

A, B, C = Repetições

X = Média

Sd = Desvio padrão

CV (%) = Coeficiente de variação

Das (2011) apresenta as consistências aproximadas de argilas com base nas suas resistências à compressão não confinada. Com base nisso e nos valores médios de q_u pode-se afirmar que tanto o solo arenoso bem como o argiloso e as suas misturas apresentam uma consistência muito rígida por apresentar valores de q_u entre 200 e 400 kPa.

Como se pode observar nas figuras 6.17 e 6.18 e na tabela 6.16, a adição de 5%, 10% e 15% de fibras dispersas de papel Kraft nos ensaios de CSUO conduziu a maiores valores de resistência à compressão simples da ordem de 3%, 17% e 6%, respectivamente, no solo arenoso; e no solo argiloso se apresentaram menores valores, da ordem de 6%, 10% e 11% quando adicionados 5%, 10% e 15% de fibras, respectivamente. Verificaram-se também diminuição dos valores do módulo de elasticidade E_{50} da ordem de 44%, 44% e 72% no solo arenoso, e de 6%, 69% e 75% no solo argiloso, quando adicionados 5%, 10% e 15% de fibras, respectivamente. Esta variabilidade se observa melhor nas figuras 6.21 a 6.24.

Além disso, pode-se observar que os valores dos desvios padrão (Sd) e coeficientes de variação (CV) são aceitáveis para todos os ensaios realizados, sendo os menores valores (Sd=0,16; CV=3,1%) para o resultado de módulo de elasticidade do solo arenoso com 15% de fibras dispersas e os maiores valores (Sd=20,30; CV=9,3%) para resultado de resistência do solo argiloso com 10% de fibras dispersas. A variação apresentada entre os resultados não é significativa.

O teste de Dunnett, ao nível de significância de 5%, indicou que nos ensaios de CSUO não houve diferença significativa entre os valores de resistência à compressão simples quando adicionados 5% e 15% de fibras no solo arenoso, mas indicou que a adição de 10% de fibras aumentou significativamente este valor no mesmo solo; no solo argiloso, o teste de Dunnett mostrou que a adição de fibras dispersas de papel Kraft nos ensaios de CSUO, independentemente da porcentagem, não apresentou diferenças significativas nos valores de resistência à compressão simples. No que se refere ao módulo de elasticidade E_{50} , a análise estatística indicou que houve diminuição significativa dos valores de módulo E_{50} no solo arenoso, sendo que os menores valores foram alcançados pela adição de 15% de fibras, seguidos de 5% e 10%, iguais entre si; no solo argiloso, não houve diferença significativa entre os valores de módulo E_{50} no tratamento com 5%, mas houve diminuição significativa nos tratamentos com 10% e 15% de fibras.

6.4.2. Compressão simples com ruptura aos 28 dias

Seguindo o mesmo roteiro dos resultados de compressão simples na umidade ótima, conforme descrito em 6.4.1, se apresentam as curvas Tensão vertical vs. Deformação específica nas figuras 6.19 e 6.20 para o solo arenoso e argiloso, respectivamente, e suas misturas com as repetições realizadas para a avaliação estatística na condição de ruptura aos 28 dias. Ressaltando, também, que algumas curvas foram corrigidas no início.

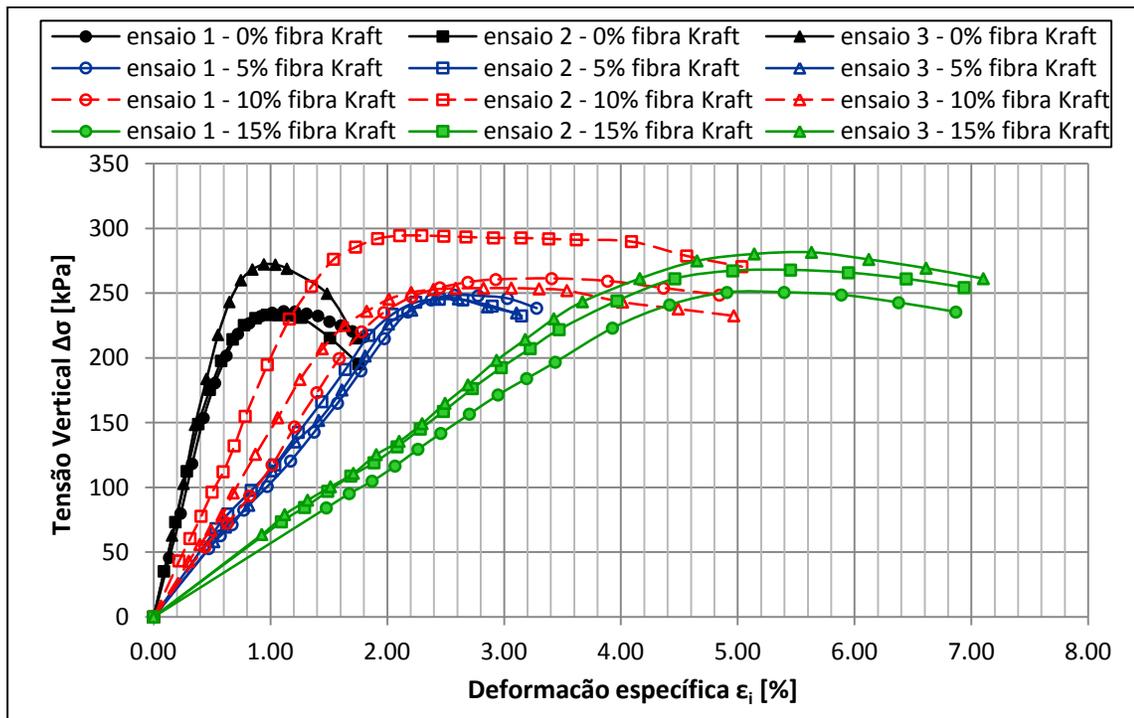


Figura 6.19 – Tensão vertical vs. Deformação específica das misturas solo arenoso - fibras dispersas de papel Kraft para ensaios de compressão simples com ruptura aos 28 dias

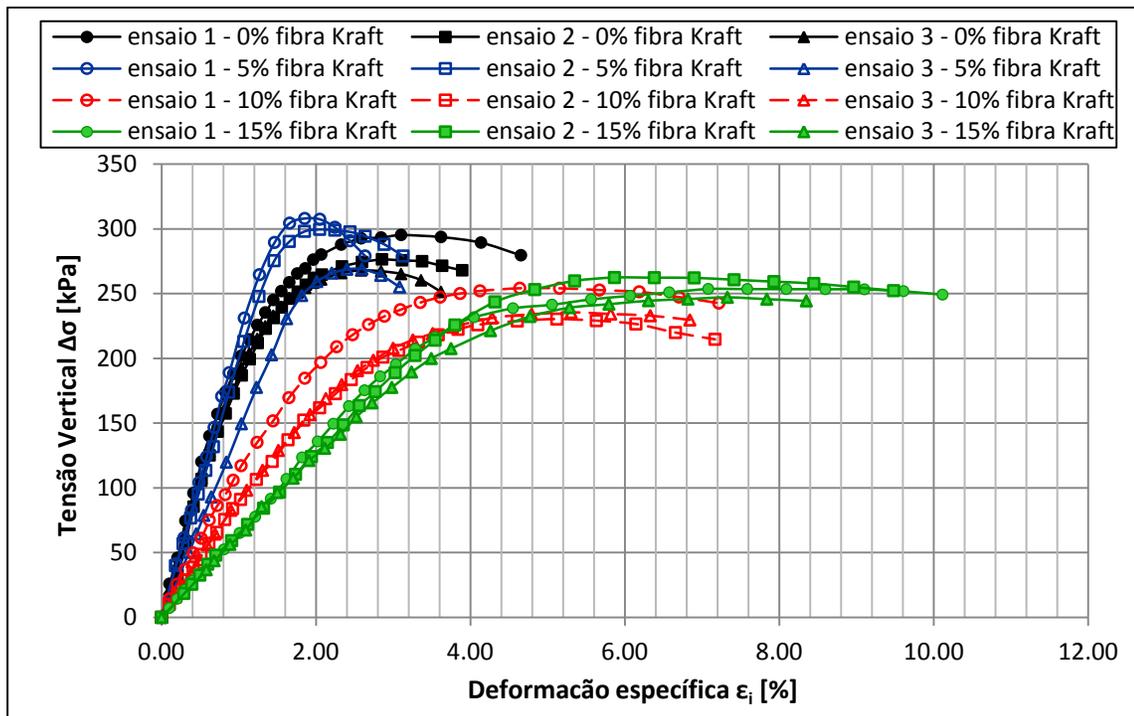


Figura 6.20 – Tensão vertical vs. Deformação específica das misturas solo argiloso - fibras dispersas de papel Kraft para ensaios de compressão simples com ruptura aos 28 dias

Do mesmo modo que para compressão simples na umidade ótima, obtiveram-se, a partir das curvas Tensão vertical vs. Deformação específica, os valores correspondentes à resistência à compressão simples e ao módulo de elasticidade E_{50} para cada tipo de solo e suas respectivas misturas na condição de ruptura aos 28 dias apresentados na tabela 6.17.

Tabela 6.17 – Resistência à compressão simples (q_u) e Módulo de elasticidade (E_{50}) dos ensaios de compressão simples com ruptura aos 28 dias das misturas solo – fibras dispersas de papel Kraft

Parâmetros		Porcentagens de fibras dispersas de papel Kraft aplicadas ao solo arenoso				Porcentagens de fibras dispersas de papel Kraft aplicadas ao solo argiloso			
		0%	5%	10%	15%	0%	5%	10%	15%
q_u (kPa)	A	236	249	261	251	295	308	254	254
	B	233	245	295	268	276	300	230	262
	C	272	246	254	282	268	269	235	247
	X	247	247	270	267	280	292	240	254
	Sd	21,79	1,63	21,66	15,52	14,03	20,57	12,54	7,68
	CV(%)	8,8	0,7	8,0	5,8	5,0	7,0	5,2	3,0
E_{50} (MPa)	A	34	10	12	6	16	22	9	6
	B	36	11	20	6	16	20	7	6
	C	40	11	14	7	17	14	7	6
	X	37	11	15	6	16	19	8	6
	Sd	3,39	0,60	3,86	0,47	0,52	3,72	1,05	0,39
	CV(%)	9,2	5,4	24,9	7,5	3,2	20,1	13,3	6,5

A, B, C = Repetições

X = Média

Sd = Desvio padrão

CV (%) = Coeficiente de variação

Da mesma forma que, para a compressão simples na umidade ótima, pode-se afirmar que tanto o solo arenoso como o argiloso e suas misturas, na condição de ruptura aos 28 dias, apresentam uma consistência muito rígida por apresentar valores de q_u entre 200 e 400 kPa, que além são superiores àqueles obtidos na condição de compressão simples na umidade ótima.

Como se pode observar nas figuras 6.19 e 6.20 e na tabela 6.17, a adição de 5%, 10% e 15% de fibras dispersas de papel Kraft nos ensaios de CS28 conduziu a maiores valores de resistência à compressão simples, da ordem de 0%, 9% e 8%, respectivamente, no solo arenoso. No solo argiloso, a adição de 5% de fibras conduziu maiores valores, da ordem de 4%, e, as adições de 10% e 15% conduziram menores valores da ordem de 14% e 9%, respectivamente. Verificaram-se também diminuição

dos valores do módulo de elasticidade E_{50} , da ordem de 70%, 59% e 84% no solo arenoso, quando adicionados 5%, 10% e 15% de fibras, respectivamente. O solo argiloso apresentou aumento do módulo de elasticidade E_{50} , da ordem de 19% quando adicionados 5% de fibras e diminuição do módulo de elasticidade E_{50} , da ordem de 50% e 63% quando adicionados 10% e 15% de fibras, respectivamente. Esta variabilidade se observa melhor nas figuras 6.21 a 6.24.

Além disso, pode-se observar que os valores dos desvios padrão (Sd) e coeficientes de variação (CV) são aceitáveis para todos os ensaios realizados, sendo os menores valores (Sd=0,39; CV=6,5%) para o resultado de módulo de elasticidade E_{50} do solo argiloso com 15% de fibras dispersas e os maiores valores (Sd=21,79; CV=8,8%) para resultado de resistência do solo arenoso sem fibra. Os coeficientes de variação dos resultados não são significativos.

O teste de Dunnett, ao nível de significância de 5%, mostrou que a adição de fibras dispersas de papel Kraft nos ensaios de CS28, independentemente da porcentagem, não apresentou diferenças significativas nos valores de resistência à compressão simples no solo arenoso; no solo argiloso, o teste de Dunnett indicou que nos ensaios de CS28 não houve diferença significativa entre os valores de resistência à compressão simples quando adicionados 5% e 15% de fibras no solo arenoso, mas mostrou que a adição de 10% de fibras diminuiu significativamente este valor no mesmo solo. No que se refere ao módulo de elasticidade E_{50} , a análise estatística indicou que houve diminuição significativa dos valores de módulo E_{50} no solo arenoso, sendo que os menores valores foram alcançados pela adição de 15% de fibras, seguidos de 5% e 10%; no solo argiloso, não houve diferença significativa entre os valores de módulo E_{50} no tratamento com 5%, mas houve diminuição significativa nos tratamentos com 10% e 15% de fibras.

As figuras 6.21 a 6.24 apresentam a variação da resistência à compressão simples e do módulo de elasticidade E_{50} das misturas em função da porcentagem de fibras dispersas de papel Kraft para os dois solos estudados nas duas condições estudadas no ensaio de compressão simples que são: umidade ótima (CSUO) e com ruptura aos 28 dias (CS28).

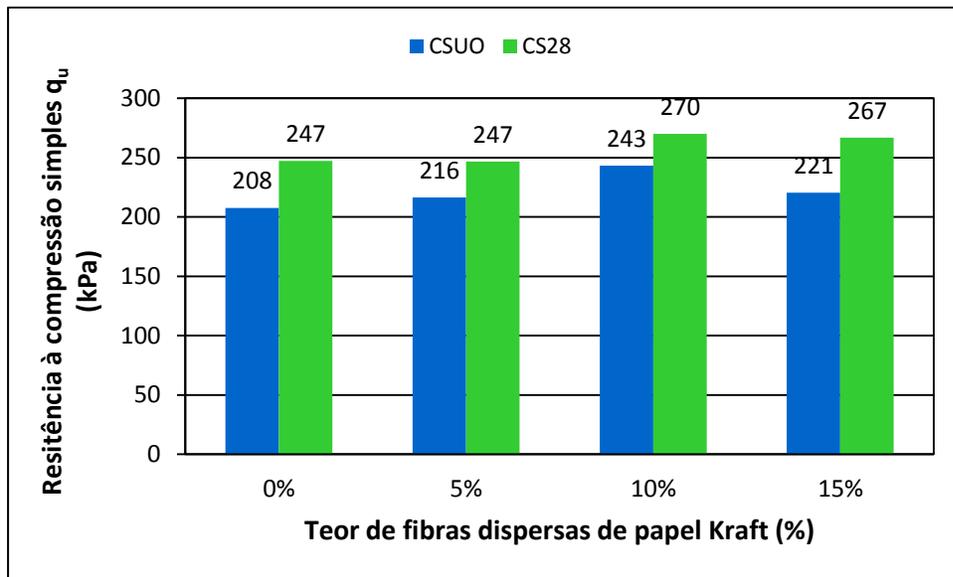


Figura 6.21 – Resistência à compressão simples em função da adição de fibras dispersas de papel Kraft ao solo arenoso

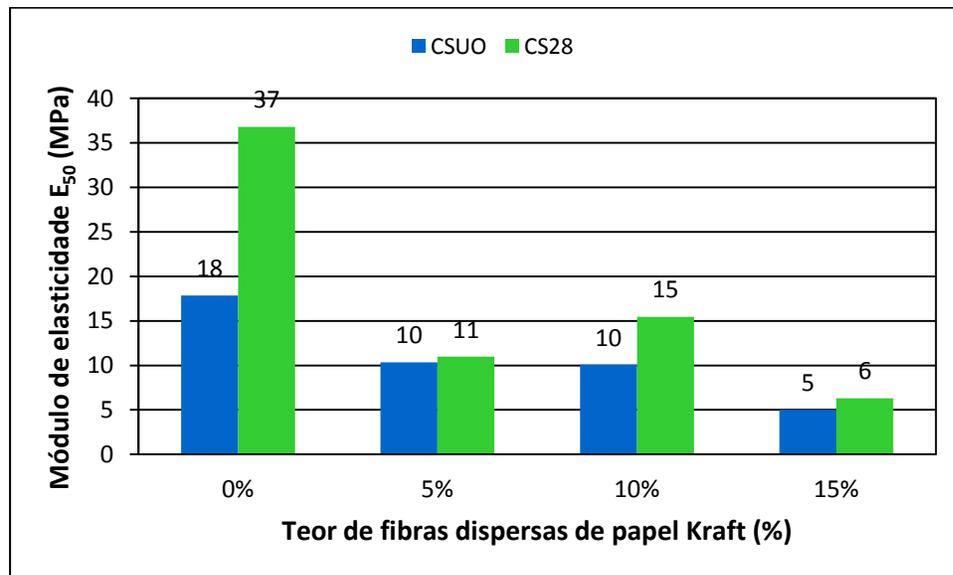


Figura 6.22 – Módulo de elasticidade E_{50} em função da adição de fibras dispersas de papel Kraft ao solo arenoso

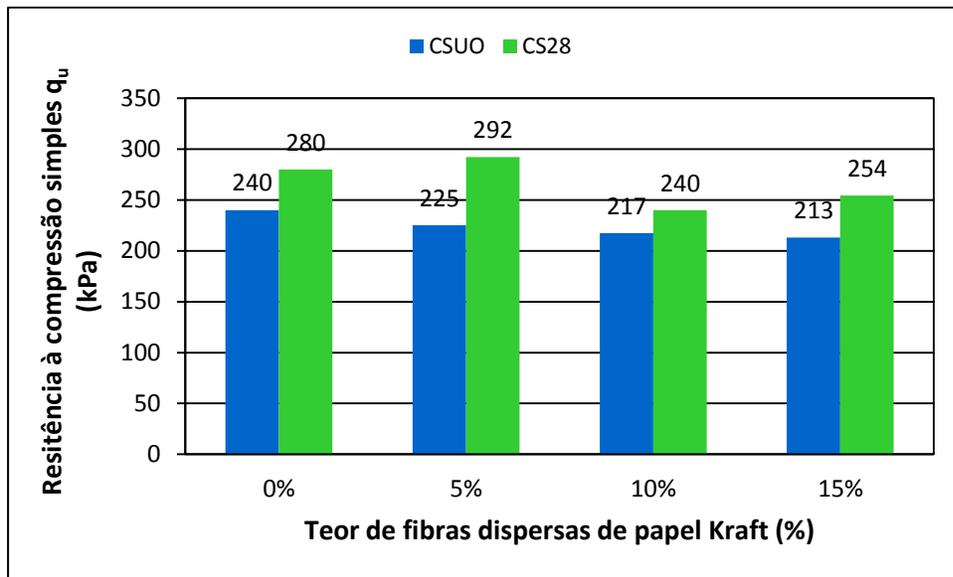


Figura 6.23 – Resistência à compressão simples em função da adição de fibras dispersas de papel Kraft ao solo argiloso

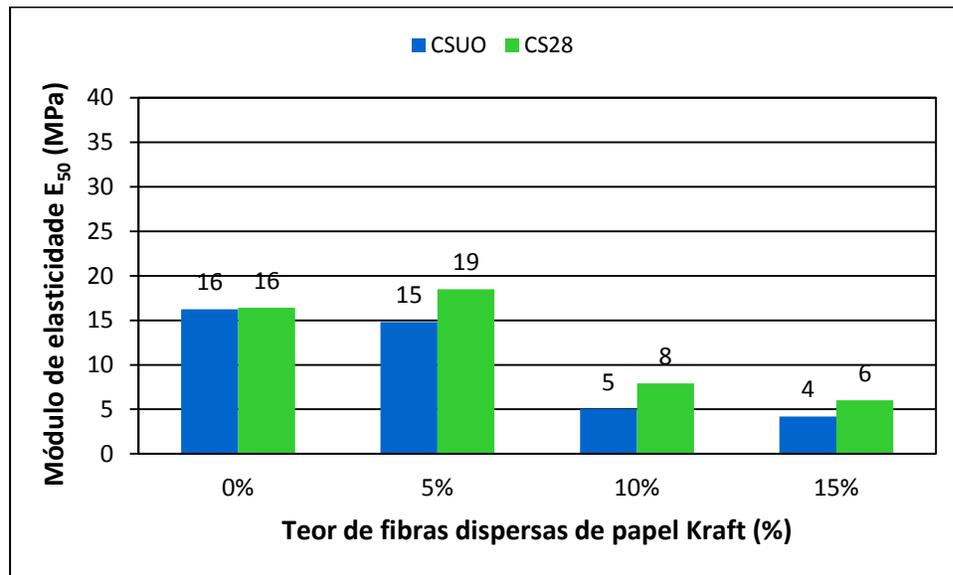


Figura 6.24 – Módulo de elasticidade E_{50} em função da adição de fibras dispersas de papel Kraft ao solo argiloso

Fazendo comparações entre CS28 e CSUO sem fibra, percebe-se que houve um aumento de resistência à compressão simples na condição CS28, da ordem de 19% e 17% nos solos arenoso e argiloso, respectivamente, com relação à condição CSUO, podendo-se dizer que o solo ganha resistência com o tempo quando compactado e deixado na câmara úmida. Estas características foram refletidas em todos os casos nos dois solos, mesmo diminuindo a resistência à compressão simples conforme o aumento de teor de fibra; quer dizer que em todas as adições de fibras a resistência à compressão simples da condição CS28 sempre foi maior do que CSUO. Quanto ao módulo E_{50} , nos dois solos houve aumento do módulo na condição CS28 com respeito à CSUO, essa propriedade foi refletida em todos os casos de adição de fibra, com variações diferentes de aumentos para cada solo e teor de fibra. Em geral, a condição de ruptura aos 28 dias apresentou maiores valores de q_u e E_{50} do que na condição de umidade ótima.

Na comparação entre solos, o solo arenoso apresentou menores valores de resistência à compressão simples do que o solo argiloso nas duas condições (CSUO, CS28) com 0% e 5% de fibra, mas apresentou maiores valores nas duas condições com 10% e 15% de fibra. Com respeito ao módulo E_{50} , o solo arenoso apresentou maiores valores do que o solo argiloso nas duas condições com 0%, 10% e 15% de fibra, sendo que na mistura com 5% o solo arenoso apresentou menores valores.

O que se esperava destes ensaios era a melhoria da resistência com a adição das fibras dispersas de papel Kraft, que foi conseguido em todas as misturas do solo arenoso nas duas condições e no solo argiloso apenas na condição de ruptura aos 28 dias. Mas, mesmo assim, essas melhorias nos dois solos não foram significativas; estas afirmações foram validadas com a aplicação do teste de Dunnett.

Como foi possível observar nas figuras 6.17 a 6.20 de Tensão vertical vs. Deformação específica, no solo arenoso, a deformação específica aumentou conforme se aumentou a proporção de fibra, indiferente do tipo de ensaio de compressão simples realizado (CSUO ou CS28), apresentando-se deformações de até 6% no caso da mistura com 15% de fibra. No solo argiloso a deformação específica com 0% e 5% de fibra é praticamente a mesma, indiferente do tipo de ensaio de compressão simples

realizado, aumentando apenas para as misturas com 10% e 15% de fibra chegando até 9% de deformação.

Assim, pode-se dizer que a adição excessiva de fibra contribui maiores deformações nos corpos de prova, tanto nos ensaios de cisalhamento, bem como nos ensaios de compressão simples.

6.4.3. Compressão simples com ruptura aos 60 dias

Com o objetivo de se ter uma visão da decomposição da fibra com o tempo e sua influência na resistência à compressão simples nos solos estudados, foram moldados três corpos de prova com 5% de fibra para cada tipo de solo e condicionados na câmara úmida por 60 dias.

Na tabela 6.18 são apresentados os resultados obtidos com as idades de rompimento de 0 dias, 28 dias e 60 dias quando adicionado 5% de fibra. Nas comparações não foram considerados os resultados dos ensaios CS28 sem fibra, quer dizer que os resultados para 28 e 60 dias de ruptura com 5 % de fibras foram comparados apenas com os resultados de CSUO (ou ao 0 dia) sem fibra.

É possível verificar que, conforme a idade de rompimento aumentou, os valores da resistência se elevaram quando se comparou às rupturas ao 0 dia sem fibra e com fibra. Assim, a adição de 5% de fibras com ruptura aos 60 dias contribui com aumentos consideráveis da resistência da ordem de 43% no solo arenoso e da ordem de 39% no solo argiloso, quando comparados aos valores de CSUO (0 dia) sem fibra. Mesmo comparando com os valores de CSUO-5% fibra, os aumentos de resistência são da ordem de 38% e 48% nos solos arenoso e argiloso, respectivamente. Esta variabilidade se observa melhor nas figuras 6.25 e 6.26

Tabela 6.18 – Resistência à compressão simples (q_u) com idades de rompimento de 0, 28 e 60 dias das misturas solo – fibras dispersas de papel Kraft

Idade de rompimento		Porcentagens de fibras dispersas de papel Kraft aplicadas ao solo arenoso		Porcentagens de fibras dispersas de papel Kraft aplicadas ao solo argiloso	
		0%	5%	0%	5%
Ao 0 dia	A	211	218	242	232
	B	197	216	247	213
	C	215	216	231	231
	X	208	216	240	225
Aos 28 dias	A		249		308
	B		245		300
	C		246		269
	X	208	247	240	292
Aos 60 dias	A		316		298
	B		277		368
	C		300		334
	X	208	298	240	333

A, B, C = Repetições

X = Média

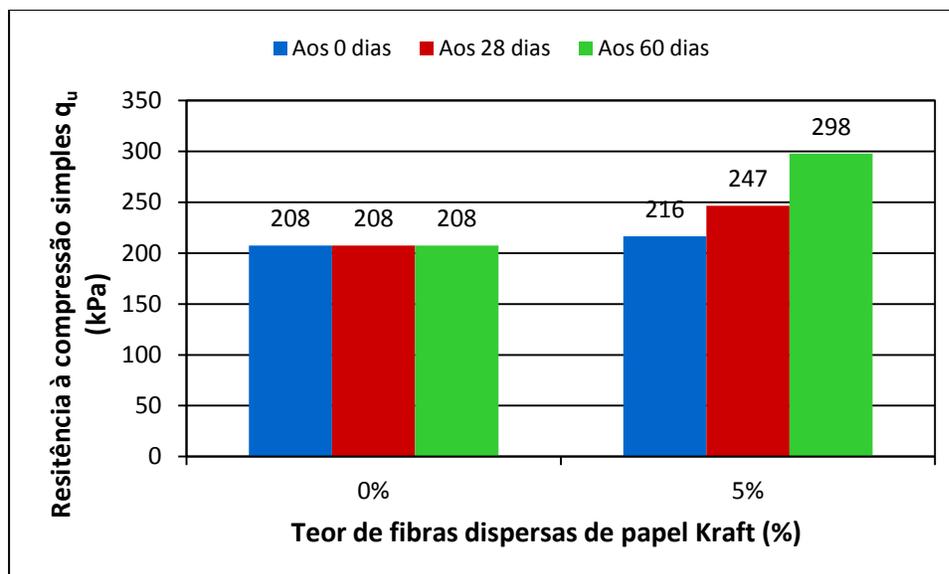


Figura 6.25 – Resistência à compressão simples em função da adição de 5% de fibras dispersas de papel Kraft ao solo arenoso quando aplicadas idades de rompimento de 0, 28 e 60 dias

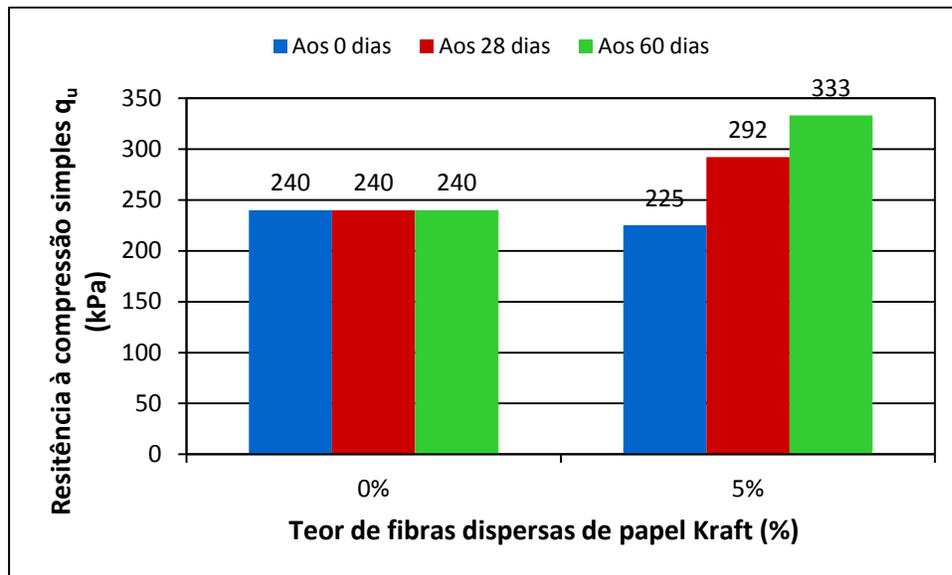


Figura 6.26 – Resistência à compressão simples em função da adição de 5% de fibras dispersas de papel Kraft ao solo argiloso quando aplicadas idades de rompimento de 0, 28 e 60 dias

Pode-se então dizer que, a fibra adquire maior resistência quanto maior for o a idade de rompimento; sendo que os resultados obtidos apenas representam uma análise preliminar do comportamento da fibra com o tempo, podendo ser avaliadas diferentes idades de rompimento em futuros trabalhos, tanto para ensaios de compressão simples, bem como ensaios de cisalhamento direto, para obter, assim, melhores conclusões.

6.5. Ensaio de permeabilidade

Os solos são permeáveis devido à existência de espaços vazios interconectados, através dos quais a água consegue fluir de pontos de alta energia para pontos de baixa energia. O estudo do fluxo de água em solos permeáveis é importante para a mecânica dos solos. Tal estudo é necessário para estimar a quantidade de fluxo subterrâneo sobre diversas condições hidráulicas, a fim de investigar problemas envolvidos no bombeamento de água em construções subterrâneas e realizar análises de estabilidade

de barragens e estruturas de contenção de terra sujeitas a forças de percolação (DAS, 2011).

A partir da realização dos ensaios de permeabilidade, conforme descrito em 5.9, obtiveram-se os coeficientes de permeabilidade, também chamados de condutividade hidráulica, para cada tipo de solo e suas respectivas misturas. Mas, como foi mencionado, apenas se realizou um ensaio para cada mistura com o objetivo de coletar a água passando pelas misturas.

Assim, a adição de fibras dispersas de papel Kraft (5%, 10% ou 15%) não apresentou mudanças significativas na permeabilidade dos solos avaliados, mantendo-se na faixa de 10^{-5} cm/s nos dois solos.

Conforme Pinto (2006), coeficientes de permeabilidade na ordem de 10^{-5} cm/s indicam um grau de permeabilidade médio para uma areia argilosa, e, para uma argila indica um grau de permeabilidade baixo; o qual poderia se ajustar aos solos estudados nesta pesquisa.

6.6. Ensaio para análises físico-químicas das águas coletadas

O processamento dos resultados dos ensaios realizados nas águas coletadas variou segundo o tipo de ensaio. Assim, para os ensaios de pH, CE e Cor aparente não foi preciso fazer nenhum tipo de cálculo adicional, pois os equipamentos utilizados forneceram diretamente os valores nas unidades corretas de avaliação; porém, para os ensaios de Dureza total e DQO se fizeram os cálculos respectivos a partir dos dados obtidos, como se descreve nos próximos parágrafos.

Como mencionado em 5.10.4, os ensaios de Dureza total foram realizados conforme o método de titulação de EDTA, a partir do qual os dados obtidos dos ensaios são justamente os volumes de EDTA utilizados na titulação. Assim, com base na metodologia SMEWW 2340C (2012), o cálculo da dureza total está diretamente

relacionado ao volume de EDTA utilizado e outros fatores, como se apresenta na equação 6.2.

$$Dureza (mg CaCO_3/L) = \frac{V_{EDTA} \times B \times 1000}{V_{am}} \dots \dots \dots (6.2)$$

Onde, V_{EDTA} = volume do titulante EDTA utilizado [ml]

B = mg $CaCO_3$ equivalente a 1 ml de EDTA = massa molar de $CaCO_3$ x concentração de EDTA

Massa molar de $CaCO_3$ = 100

Concentração de EDTA = 0,01 mol/L

V_{am} = volume de amostra utilizada [ml] = 100 ml

Como mencionado em 5.10.5, nos ensaios de DQO se fizeram as leituras respectivas de absorvância das amostras no espectrofotômetro utilizando um comprimento de onda (λ) de 600 nm (faixa verde). Assim, com base na metodologia SMEWW 5220D (2012), utilizou-se uma curva analítica em função da absorvância e DQO para os cálculos correspondentes nas amostras, apresentada na equação 6.3; ressaltando que esta curva foi feita utilizando biftalato de potássio.

A curva analítica utilizada para o cálculo de DQO, com $\lambda = 600$ nm, abrange valores de DQO de 10 a 800 mg/L e tem como equação de regressão lineal:

$$A = 4.10^{-4} \times DQO \dots \dots \dots (6.3)$$

Onde, A = absorvância [mg/L]

DQO = demanda química de oxigênio [mg/L]

Os valores obtidos de DQO abaixo de 90 mg/L deveriam ter sido calculados com um comprimento de onda (λ) de 420 nm (faixa laranja) e com outras quantidades de reagentes conforme com a informação da metodologia, mas como a curva analítica utilizada abrange valores desde 10 mg/L os resultados são válidos. Se as leituras de DQO tivessem sido feitas utilizando $\lambda = 420$ nm, os resultados apenas tivessem sido

mais precisos, mas sem apresentar diferença significativa dos resultados obtidos quando utilizado $\lambda = 600 \text{ nm}$.

Assim, a partir da realização dos ensaios de análise preliminar físico-química das águas percoladas, conforme descrito em 5.10, e as equações 6.2 e 6.3, são apresentados todos os resultados obtidos dos ensaios na tabela 6.19 a seguir.

Tabela 6.19 – Resultados das análises físico-químicas das águas percoladas

Parâmetros	Porcentagens de fibras dispersas de papel Kraft aplicadas ao solo arenoso				Porcentagens de fibras dispersas de papel Kraft aplicadas ao solo argiloso				
	0%	5%	10%	15%	0%	5%	10%	15%	
Coloração ao olho nu	clara	amarela clara	amarela clara	amarela clara	clara	clara	clara	amarela	
pH	A	6,0	6,2	6,1	6,1	7,1	7,3	7,2	7,1
	B	6,0	5,7	6,1	6,1	7,1	7,3	7,3	7,1
	X	6,0	6,0	6,1	6,1	7,1	7,3	7,2	7,1
CE ($\mu\text{S/cm}$)	A	244	355	398	574	139	168	237	259
	B	254	360	394	587	143	163	235	261
	X	249	358	396	581	141	166	236	260
Cor aparente (UH)	A	23	27	111	124	31	25	7	88
	B	22	30	111	98	27	15	15	87
	X	23	29	111	111	29	20	11	88
Dureza total ($\text{mg CaCO}_3/\text{L}$)	A	61	122	142	225	43	59	76	86
	B	58	120	139	228	42	51	75	87
	X	60	121	141	227	43	55	76	87
DQO (mg/L)	A	13	108	53	95	15	25	33	85
	B	23	100	60	100	18	25	30	83
	X	18	104	56	98	16	25	31	84

CE = Condutividade elétrica

DQO = Demanda química de oxigênio

UH = Unidade Hazen (mg Pt-Co/L)

A, B = Repetições

X = Média

A partir da tabela 6.19, foram realizados gráficos mostrando a variabilidade dos resultados quando adicionados diferentes teores de fibras e se apresentam nas figuras 6.27 a 6.31, a seguir.

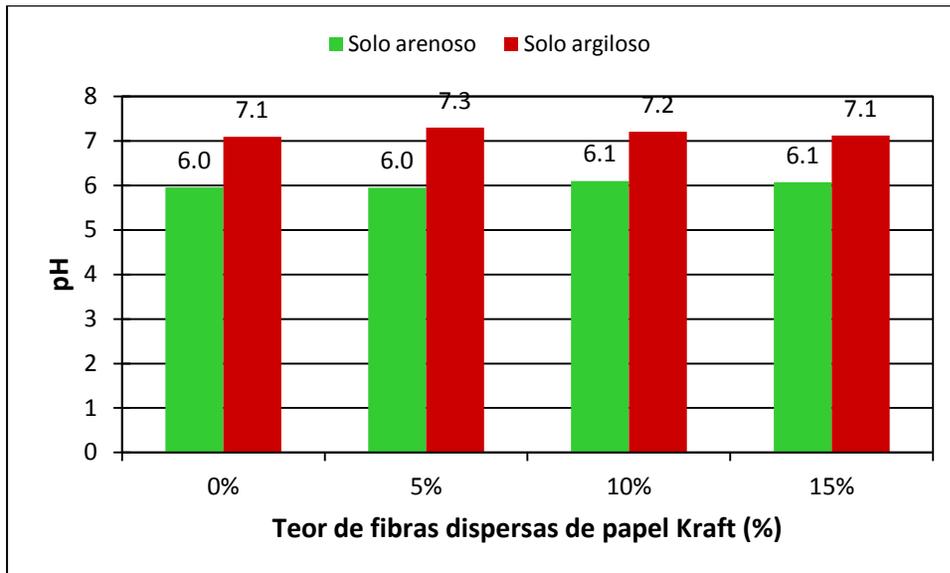


Figura 6.27 – pH das águas percoladas em função da adição de fibras dispersas de papel Kraft aos dois solos

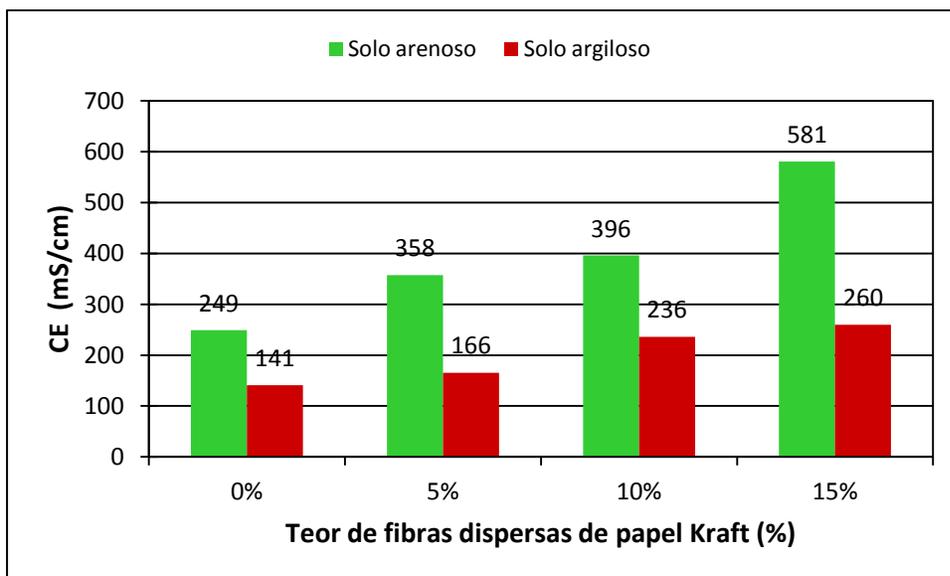


Figura 6.28 – Condutividade elétrica das águas percoladas em função da adição de fibras dispersas de papel Kraft aos dois solos

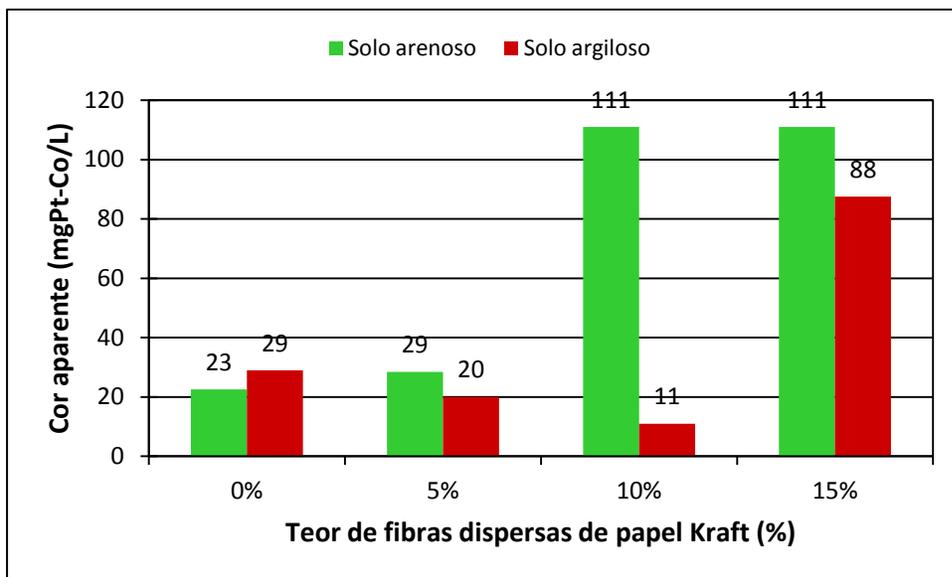


Figura 6.29 – Cor aparente das águas percoladas em função da adição de fibras dispersas de papel Kraft aos dois solos

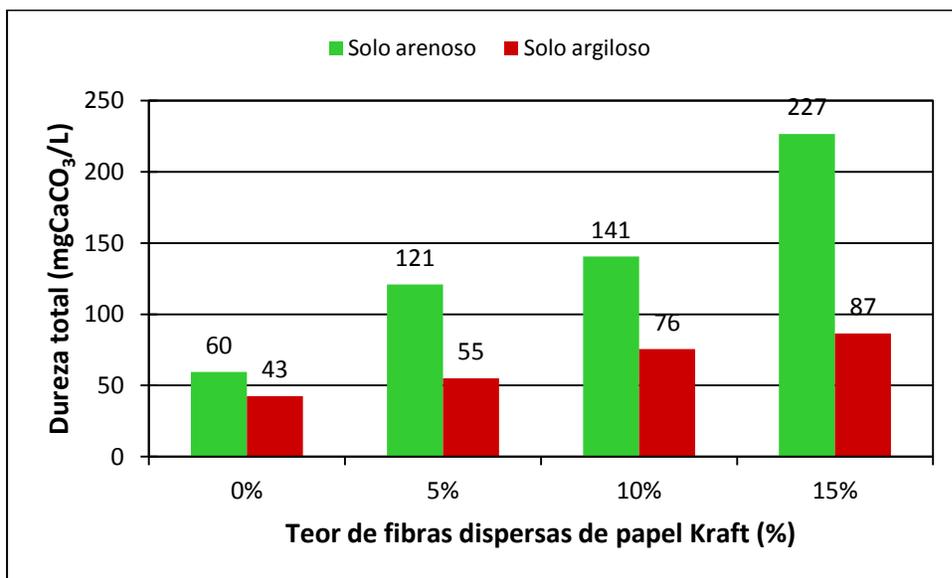


Figura 6.30 – Dureza total das águas percoladas em função da adição de fibras dispersas de papel Kraft aos dois solos

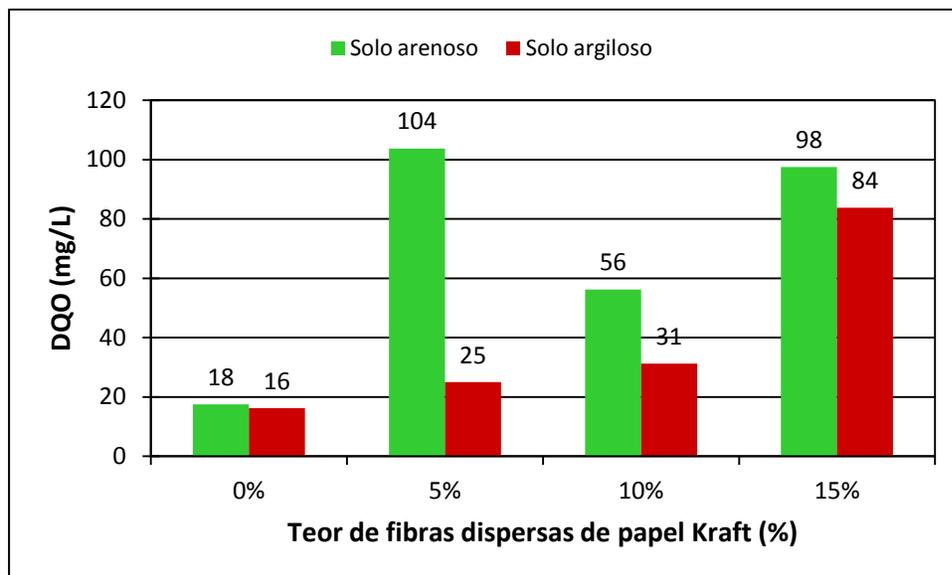


Figura 6.31 – Demanda química de oxigênio (DQO) das águas percoladas em função da adição de fibras dispersas de papel Kraft aos dois solos

Os padrões de potabilidade fixam valores para os parâmetros mais representativos da qualidade de uma água para que seja considerada adequada ao consumo humano (RICHTER, 2009); assim, a seguir se apresentam as observações dos resultados obtidos, quando comparados aos padrões de potabilidade (tabela 4.3) avaliados nesta pesquisa.

a) pH:

Segundo a Portaria MS Nº 2914/2011 os valores de pH da água potável devem estar na faixa de 6 a 9,5; conforme a Resolução CONAMA Nº 357/2005 os valores de pH da classe 1 (águas doces destinadas ao abastecimento para consumo humano após tratamento; à proteção das comunidades aquáticas; à recreação de contato primário, tais como natação; à irrigação de hortaliças, plantas frutíferas e de parques, jardins, campos de esporte e lazer, com os quais o público possa vir a ter contato direto; e à aquicultura e atividade de pesca) devem estar na faixa de 6 a 9.

Os valores obtidos nas águas dos dois solos com fibra e sem ela estão dentro das faixas estabelecidas pelas legislações citadas; portanto, a adição de fibras torna as águas estudadas aptas a essa categoria.

b) Condutividade elétrica (CE):

A condutividade elétrica não é parâmetro para a potabilidade da água; mas é de extrema importância para águas utilizadas na indústria, por exemplo.

Diversos autores citam valores permitidos de CE segundo a utilização da água. Assim, Da Silva (2012) cita que a condutividade da água varia de 10 – 100 $\mu\text{S/cm}$ e em ambientes poluídos pode chegar a 1000 $\mu\text{S/cm}$; Richter (2009) cita alguns valores de condutividade à temperatura de 25 °C: água pura = 0,04 $\mu\text{S/cm}$, água destilada = 1 $\mu\text{S/cm}$, e água bruta varia desde 20 $\mu\text{S/cm}$ até mais de 2000 $\mu\text{S/cm}$; de acordo com Tebbut (1998), as normas de abastecimento de água potável no Reino Unido indicam o máximo valor de condutividade da água para consumo humano como sendo 1500 $\mu\text{S/cm}$ a 20 °C; AYERS e WESTCOT (1991) citam que valores normais de condutividade elétrica nos mananciais e que servem para a irrigação, devem ter um limite de 0 a 30 $\mu\text{S/cm}$ para se tomarem aptos a tal uso.

Segundo a utilização da água, os valores permitidos de CE variam; assim, os valores obtidos nas águas dos dois solos com e sem fibra apenas se encaixam nas normas do Reino Unido não ultrapassando os 400 $\mu\text{S/cm}$. A adição de fibras altera a condutividade elétrica conforme aumenta o teor, especialmente no solo arenoso.

Geralmente a CE é associada à permeabilidade, assim, condutividades maiores se associam permeabilidades maiores; é também conhecido que um aumento de condutividade representa aumento de sais na água, e dependendo do uso da água pode se tornar desfavorável.

c) Cor aparente:

A cor geralmente não tem significado sanitário, porém afeta esteticamente a qualidade de uma água, podendo estimular o consumo de outra fonte mais atraente que pode ser mais perigosa, por esse motivo é conveniente a sua redução a um nível aceitável. O limite aceitável de cor na maioria dos regulamentos foi fixado em 15 UH, sendo desejável um valor inferior a 5 UH. Água para uso industrial, como parte da fabricação de papel de alta qualidade e tecidos, pode exigir uma qualidade mais elevada para esse parâmetro (RICHTER, 2009).

Em geral, os valores obtidos nas águas passando pelos dois solos com e sem fibra apresentaram valores acima dos limites permitidos pelos regulamentos citados na tabela 4.3, sendo que atingem até 111 UH no solo arenoso com 15% de fibra e até 88 UH no solo argiloso com 15% de fibra.

d) Dureza total:

Conforme Richter (2009), as águas podem ser classificadas em termos do grau de dureza assim: águas moles ou brandas (dureza ≤ 50), com dureza moderada (de 50 - 100), duras (de 150 - 300) e muito duras (> 300). Do ponto de vista da saúde pública, não há objeções ao consumo de águas duras; pelo contrário, alguns pesquisadores encontraram uma correlação entre águas moles e certas doenças cardíacas, verificando um maior número de pessoas com problemas cardiovasculares em áreas de águas moles do que em áreas de águas duras. Para uso industrial, geralmente se requer água de baixa dureza ou mole.

Assim, a água passando pelo solo arenoso sem fibra apresenta uma dureza moderada e quando adicionados 5% e 10% de fibras também, apenas a adição de 15% fez com que a água se torne dura. A água passando pelo solo argiloso sem fibra representa uma água mole, mas com a adição das fibras, independentemente da porcentagem, se tornou uma água com dureza moderada.

Todos os resultados não ultrapassaram dos valores máximos permitidos pelos regulamentos mencionados; sendo que, as águas passando pelos dois solos

sem fibra não ultrapassaram os valores máximos recomendados (VMR) pela OMS, ressaltando ainda que, quando adicionados os teores de fibra ao solo argiloso, as águas passando pelas misturas também não ultrapassaram os VMR pela OMS.

e) DQO:

As legislações brasileiras utilizadas de referência (Portaria MS Nº 2914/2011 e Resolução CONAMA Nº 357/2005) não estabelecem limites para a concentração de DQO nas águas superficiais.

A DQO é um fator importante em sistemas de reuso, onde o circuito da água é curto e a circulação rápida nos pontos de consumo.

Conforme Chapman (1996), as concentrações de DQO observadas em águas superficiais variam desde 20 mg/L O₂ (ou menos em águas não poluídas) até maior que 200 mg/L O₂ em efluentes de águas tratadas. Águas residuais industriais podem ter valores de DQO na faixa de 100 mg/L O₂ até 60.000 mg/L O₂. Tebbut (1998) indica que as normas da Comunidade Europeia para utilizar as águas superficiais como água bruta na água potável, estabelecem que o valor limite de DQO seja de 30 mg/L O₂ em águas com tratamento físico-químico intensivo e desinfecção.

Os resultados das águas passando pelos dois solos sem fibra não ultrapassaram os valores de 20 mg/L de DQO, encaixando-se na categoria de águas não poluídas, e ainda, são consideradas como aptas para água potável. Após a adição de fibras ao solo arenoso, os valores de DQO aumentaram consideravelmente atingindo valores de até 104 mg/L; no solo argiloso a adição das fibras também levou a maiores valores de DQO, mas com variações bem menores do que no solo arenoso, sendo que quando adicionados 5% e 10% de fibras, a DQO das águas se mantiveram no limite de 30 mg/L podendo ser ainda aptas para água potável, e no teor de 15% atingiu valores de 88 mg/L.

Valores altos de DQO indicam altos teores de matéria orgânica e, portanto, menores permeabilidades, devido a que a matéria orgânica retém a água no solo e diminui a permeabilidade dele.

Como se pode observar na tabela 6.19 e nas figuras 6.27 a 6.31, a adição de fibras dispersas de papel Kraft, independentemente da porcentagem, não apresentou mudanças significativas no pH das águas, mantendo-se na faixa de 6 no solo arenoso e de 7 no solo argiloso. A adição de 5%, 10% e 15% de fibras dispersas de papel Kraft conduziu a maiores valores de CE da ordem de 44%, 57% e 133%, respectivamente, no solo arenoso, e da ordem de 18%, 67% e 84% no solo argiloso. No que se refere à cor aparente, houve aumentos dos valores de cor da ordem de 26%, 383% e 383% no solo arenoso, quando adicionados 5%, 10% e 15% de fibras, respectivamente; no solo argiloso, houve diminuição de cor aparente da ordem de 31% e 62% quando adicionados 5% e 10% de fibras, respectivamente e quando adicionado 15% de fibras houve aumento de cor da ordem de 203%. Verificaram-se também aumento dos valores de dureza total da ordem de 101%, 135% e 278% no solo arenoso, e da ordem de 37%, 34% e 57% no solo argiloso quando adicionados 5%, 10% e 15% de fibras, respectivamente. Finalmente, a adição de 5%, 10% e 15% de fibras dispersas de papel Kraft conduziu a maiores valores de DQO da ordem de 478%, 211% e 444% no solo arenoso, e da ordem de 56%, 94% e 425% no solo argiloso, respectivamente.

Os resultados obtidos também podem se relacionar entre si para entender melhor o comportamento da fibra no solo. Pode-se verificar que, os valores de DQO aumentam proporcionalmente aos valores de dureza total e condutividade elétrica e com o aumento do teor de fibras. Estes aspectos podem estar relacionados ao fato que quanto maior seja o teor de fibras nos solos, maior será a matéria orgânica arrastada pela água passada por eles, tornando-a mais salina (aumento de CE), com maior teor de matéria orgânica (aumento de DQO) e maior presença de metais (aumento de dureza total), mas, desde que os resultados não ultrapassem os valores permitidos, os aumentos não apresentam prejuízos.

Mesmo tratando-se de análises preliminares nas águas, pode-se dizer que, em geral, os parâmetros avaliados aumentam seus valores conforme aumenta o teor de fibras dispersas de papel Kraft nos dois solos.

A adição de fibras no solo arenoso eleva os parâmetros avaliados, com variações de até 478% (na DQO) quando se compara com o solo sem fibra, o que leva a concluir que a adição de fibras piora as características físico-químicas das águas se infiltrando pelo solo, o que proporciona riscos à saúde humana, se consumidas.

No solo argiloso, os parâmetros mudaram em níveis bem menores do que no solo arenoso, sofrendo apenas grandes alterações quando adicionado 15% de fibras e menores alterações quando adicionado 5% de fibras, o que leva pensar que a adição de fibras neste solo não é tão desfavorável quanto à contaminação de solo ou lençol freático, devido a seus resultados estarem dentro da faixa permitida pelos regulamentos.

Pode-se perceber que, a adição excessiva de fibras altera as características físico-químicas das águas que passam pelo solo. Embora, estes resultados não foram validados estatisticamente, por falta de um número adequado de ensaios (no mínimo três ensaios de permeabilidade), as afirmações anteriores podem ser consideradas como referências sobre a influência da adição de fibra no solo e no lençol freático quanto à contaminação, bem como subsídios para futuros trabalhos.

6.7. Síntese das análises dos resultados

As análises estatísticas mostraram que a adição de 5% de fibras dispersas de papel Kraft no solo argiloso contribuiu a uma melhoria significativa nos valores de ângulo de atrito dos ensaios de cisalhamento direto nas três condições avaliadas (CDUO, CDI, CD28), quando comparado com o solo sem fibra. As análises também mostraram que o solo argiloso com 5% de fibras não apresentou diferenças significativas nos valores de resistência à compressão simples e módulo E_{50} nos ensaios de compressão simples (CSUO, CS28); ademais, apresentou variações pouco

significativas nos parâmetros de compactação ($w_{ót}$, $\gamma_{dmáx}$). A mistura do solo argiloso com 5% de fibra não apresentou alteração na deformação dos corpos de provas dos ensaios de cisalhamento direto e compressão simples, sendo que o contrário aconteceu no solo com 10% e 15%. Nas análises físico-químicas das águas percoladas o solo com 5% de fibra também não apresentou grandes mudanças nos parâmetros com respeito ao solo sem fibra. Todas essas observações indicam que houve melhoria na mistura sem grandes prejuízos de contaminação do solo, afirmação que permite otimizar o teor adequado de fibra (provavelmente encontra-se entre 0% e 5%).

No solo arenoso as análises estatísticas mostraram que não houve diferença significativa nos parâmetros obtidos nos ensaios de cisalhamento direto (ϕ , c), nem nos valores de q_u da compressão simples, tendo ainda diminuição significativa do E_{50} , quando adicionado 5% de fibras. As análises também indicaram que a adição de 5% de fibras apresentou variações pouco significativas nos parâmetros de compactação ($w_{ót}$, $\gamma_{dmáx}$) no solo arenoso. Apenas houve melhorias significativas nos valores de " ϕ " dos ensaios CDI com 10% e 15% e nos valores de " q_u " do ensaio CSUO com 10%, mas como foi mencionado, com a adição de 10% e 15% as deformações dos corpos de prova são bem maiores, desfavorecendo a possível aplicação da mistura como estabilizante de solo.

Portanto, conforme as análises estatísticas realizadas por meio do teste de Dunnett e as observações detalhadas dos ensaios, optou-se por fazer a otimização dos resultados apenas para os ensaios de cisalhamento direto (CDUO, CDI e CD28) por ser o principal interesse desta pesquisa, e apenas para o solo argiloso por apresentar melhorias significativas quanto ao ângulo de atrito.

O ideal é que tanto o ângulo de atrito quanto a coesão apresentem elevação concomitantemente, mas nem sempre isso foi verificado. Se o ângulo de atrito se elevar e a coesão não apresentar diminuição significativa (ou pouco significativa) com o tratamento, além de não apresentar mudanças significativas em outras propriedades (como parâmetros de compactação, permeabilidade e composição físico-química da água percolando pelas misturas), pode se considerar que a adição de fibras dispersas

de papel Kraft pode ser um tratamento aceitável para ser aplicado; isto foi o que aconteceu no solo argiloso com 5% de fibras.

Assim, tendo em conta o comportamento do gráfico de ângulo de atrito vs. teor de fibra para os ensaios de CDUO, CDI e CD28 no solo argiloso (Figuras 6.13), constatou-se geometricamente que o polinômio de interpolação (vide BURDEN E FAIRES, 2010, cap. 3) se assemelha razoavelmente ao comportamento do ângulo de atrito nesses gráficos. Portanto, foi usado o método de diferenças divididas para determinar tal polinômio de interpolação, sendo possível otimizar o teor de fibra, isto é determinar o máximo ângulo de atrito e o teor de fibra onde ele é atingido, obtendo uma proposta de teor ótimo de fibra. Para tal, se realizaram algoritmos no software Matlab 7.0.

A tabela 6.20 apresenta os resultados obtidos da otimização no solo argiloso.

Tabela 6.20 – Variáveis otimizadas no solo argiloso

Tipo de ensaio	Teor ótimo de fibra (%)	Ângulo de atrito ótimo atingido (°)
CDUO	4,7	37
CDI	4,3	32
CD28	3,5	36

CDUO = Cisalhamento direto na umidade ótima

CDI = Cisalhamento direto inundado

CD28 = Cisalhamento direto com ruptura aos 28 dias

Como se observa na tabela 6.20, os teores ótimos nos ensaios de cisalhamento ficam perto de 4%, pelo qual poderia se considerar como o valor ótimo de fibra para o solo argiloso melhorar as suas propriedades geotécnicas significativamente.

7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A presente pesquisa avaliou a adição de vários teores de fibras dispersas de papel Kraft, analisando o comportamento mecânico das misturas para determinar o teor ideal de fibra para cada solo, de maneira a obter o melhor comportamento da mistura.

O uso das fibras dispersas de papel Kraft está diretamente ligado com a preocupação ambiental do tema proposto. Entretanto, a contribuição deste trabalho não é unicamente a possibilidade de utilizar este material tão farto na sociedade, tendo em consideração que este uso também contribui significativamente na melhoria das propriedades físicas e mecânicas do solo argiloso.

Verificou-se que a transformação do papel Kraft em polpa de celulose consome pouca energia, sendo necessário apenas o uso de água para a realização do processo de reciclagem. Este fator justifica ainda mais o estudo das misturas com estas fibras.

Notou-se que é possível uniformizar o teor umidade da fibra após o processo de reciclagem a partir do emprego de equipamentos de maior porte, em que é possível utilizar um volume maior de sacos com a finalidade de se ter uma maior quantidade de fibras centrifugadas para as misturas mantendo o mesmo teor de umidade.

Independentemente do tipo de solo, a inclusão das fibras dispersas de papel Kraft reduziram significativamente os valores de peso específico aparente seco máximo e aumentaram significativamente os valores de teor de umidade ótima.

O solo argiloso respondeu melhor ao tratamento com fibras dispersas de papel Kraft do que o solo arenoso, no que se refere à resistência ao cisalhamento; sendo que, independentemente do teor de fibras, seus valores de ângulo de atrito se elevaram significativamente nas três condições avaliadas de cisalhamento direto, salientando os

resultados benéficos da mistura na situação mais desfavorável, que é a do material inundado. Os melhores resultados foram apresentados quando adicionado 5% de fibras dispersas de papel Kraft.

Em geral, nos dois solos a inclusão das fibras conduziu significativamente a menores valores de coesão nas condições estudadas nos ensaios de cisalhamento direto, exceto na condição de umidade ótima do solo argiloso onde os valores não diferiram estatisticamente entre si.

Independentemente do tipo de solo, os valores de resistência à compressão simples nas condições estudadas não diferiram estatisticamente entre si, quando adicionados os teores de fibras.

A inclusão das fibras dispersas de papel Kraft reduziram significativamente os valores de módulo de elasticidade E_{50} nos dois solos, exceto quando foi adicionado 5% de fibras ao solo argiloso, onde os valores não diferiram estatisticamente entre si.

Foi observada certa aleatoriedade nos ensaios de compressão simples com ruptura aos 28 dias, fato esse possivelmente gerado em função da homogeneização da fibra com o solo na câmara úmida, tendo teores de umidade variáveis entre eles que afetam o comportamento do solo e misturas nos ensaios.

A fibra adquire maior resistência quanto maior for o a idade de rompimento, tendo assim uma visão preliminar do comportamento e decomposição da fibra com o tempo e podendo se avaliar diferentes idades de rompimento em futuros trabalhos, tanto para ensaios de compressão simples como para ensaios de cisalhamento direto.

Independentemente do tipo de solo, a inclusão das fibras dispersas de papel Kraft não apresentou mudanças significativas na permeabilidade, mantendo-se na faixa de 10^{-5} cm/s nos dois solos. O mesmo pode-se dizer ao respeito dos valores de pH.

Os parâmetros de cor, condutividade elétrica, dureza total e demanda química de oxigênio aumentaram consideravelmente seus valores em função do aumento do teor de fibras dispersas de papel Kraft nos dois solos. Porém, a adição de fibras no solo

argiloso não foi desfavorável quanto à contaminação de solo ou lençol freático, devido a seus resultados estarem dentro da faixa permitida pelos regulamentos.

A adição excessiva de fibra contribuiu para maiores deformações horizontais e variações volumétricas nos corpos de prova, tanto nos ensaios de cisalhamento, como nos ensaios de compressão simples, pois mesmo depois de apresentar as primeiras fissuras de ruptura, as tensões de resistência continuavam aumentando, apresentando-se grandes esmagamentos nos corpos de prova. Este excesso de fibras também contribuiu com grandes mudanças nas características físico-químicas das águas percoladas pelos solos.

Após os ensaios laboratoriais e as análises comparativas entre os solos sem fibra e com fibra, se concluiu que o solo argiloso apresenta melhor desempenho da mistura solo – fibras dispersas de papel Kraft, sendo que o possível teor ótimo de fibra para este solo melhorar as suas propriedades geotécnicas significativamente é próximo de 4%.

Considera-se, portanto, a mistura solo - fibras dispersas de papel Kraft como sendo mais uma alternativa para a estabilização de solos, desde que sejam feitas as análises respectivas das propriedades físicas e mecânicas dos solos.

Embora os estudos e análises tenham procurado abordar ao máximo os aspectos relativos às propriedades físicas e mecânicas das misturas solo - fibras dispersas de papel Kraft, considera-se que ainda existem fatores para se analisar como: a avaliação de outros tipos de solos com esta metodologia e outros teores de fibra; a reutilização prática dos resíduos de cimento após a limpeza dos sacos de cimento e da água onde os sacos foram submergidos para amolecer as fibras; a investigação profunda da decomposição da fibra com o tempo, realizando diversos ensaios de cisalhamento e compressão simples com diferentes idades de rompimento; análises mais profundas e detalhadas das águas percoladas para determinar a influência da adição de fibras no solo e no lençol freático quanto à contaminação; e, a análise do ciclo de vida das misturas a fim de se minimizar os impactos ambientais.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ÂNGULO, Sérgio C.; ZORDAN, Sérgio E.; JOHN, Vanderley M. Desenvolvimento sustentável e a reciclagem de resíduos na construção civil. In: Seminário Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na construção civil - materiais reciclados e suas aplicações, CT206 - IBRACON, 4, São Paulo - SP, 2001.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION; AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION; WATER ENVIRONMENT FEDERATION. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (SMEWW), 22th ed., Washington DC, 2012.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM International (2011): D3080/D3080M-11 – Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND – ABCP (2013): Solo – cimento. Disponível em <http://www.abcp.org.br/conteudo/basico-sobre-cimento/aplicacoes/solo-cimento>. Acesso em 07/2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DISTRIBUIDORAS DE ASFALTOS – ABEDA (2013): Emulsão asfáltica. Disponível em <http://www.abeda.org.br/>. Acesso em 07/2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT: NBR 6457 – Amostras de Solos – Preparação para Ensaios de Compactação e Ensaios de Caracterização. Rio de Janeiro, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT: NBR 6459 – Solo – determinação de limite de liquidez, método de ensaio. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT: NBR 6502 – Rochas e solos. Rio de Janeiro, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT: NBR 6508 – Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT: NBR 7180 – Solo – determinação de limite de plasticidade, método de ensaio. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT: NBR 7181 – Solo – análise granulométrica, método de ensaio. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT: NBR 7182 – Solo – Ensaio de Compactação. Rio de Janeiro, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT: NBR 7183 – Determinação do limite e relação de contração de solos. Rio de Janeiro, 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT: NBR 10004 – Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT: NBR 12023 – Solo – Cimento – Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT: NBR 12770 – Solo coesivo – determinação da resistência à compressão não confinada. Rio de Janeiro, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT: NBR 14545 – Solo – determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável. Rio de Janeiro, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS PRODUTORES DE CAL – ABPC (2013): A Cal e suas Aplicações. Disponível em <http://www.abpc.org.br/frame.htm>. Acesso em 07/2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA E CELULOSE E PAPEL - BRACELPA (2013): Relatório Estatístico 2011/2012. Disponível em <http://www.bracelpa.org.br/bra2/sites/default/files/estatisticas/rel2011.pdf>. Acesso em 07/2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA E CELULOSE E PAPEL - BRACELPA (2013): Relatório De Sustentabilidade 2010. Disponível em http://www.bracelpa.org.br/bra2/sites/default/files/public/relsustenta/Bracelpa_PDF_Navegavel_PORT_Final.pdf. Acesso em 09/2013.

AYERS, R. S.; WESTCOT, D. W. A qualidade da água na agricultura. Tradução de H.R. Gheyj, J.F. de Medeiros, F.A.V. Damasceno. Campina Grande, UFPB, 1991, 218p.

BARTRAM, Jamie; BALLANCE, Richard. [Eds.] Water quality monitoring: Practical guide to the design and implementation of freshwater quality studies and monitoring

programmes, published on behalf of World Health Organization (WHO) and United Nations Environment Programme (UNEP), Chapman & Hall, London, 1996, 383 p.

BEHAK, Leonardo. Estabilização de um solo sedimentar arenoso do Uruguai com cinza de casca de arroz e cal. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007, 150p.

BENTO, Priscila Fiochi. Uso de cal e fibras na melhoria de materiais para utilização em estruturas de pavimentos. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, 2006, 116p.

BLUMENSCHHEIN, Raquel Naves. Gerenciamento de resíduos sólidos oriundos da IC, Artigo. In: Encontro Nacional Da Ecoeco, 4, Belém (PA), 2001, mesa 4, Pará, 2001, 17p. Disponível em http://www.ecoeco.org.br/conteudo/publicacoes/encontros/iv_en/mesa4/7.pdf. Acesso em 07/2013.

BLUMENSCHHEIN, Raquel Naves. A sustentabilidade na cadeia produtiva da Indústria da construção. Tese (Doutorado) – Centro de Desenvolvimento Sustentável, Universidade de Brasília, Brasília, 2004, 249p.

BOSCOV, Maria Eugenia Gimenez. Geotecnia ambiental. São Paulo: Oficina de Textos, 2008, 248p.

BURDEN, Richard L.; FAIRES, J. Douglas. Numerical Analysis, 9th edition, Books/Cole, Boston, USA, 2010, cap. 3.

BUSON, Márcio Albuquerque. KRAFTERRA: Desenvolvimento e análise preliminar do desempenho técnico de componentes de terra com a incorporação de fibras de papel Kraft provenientes da reciclagem de sacos de cimento para vedação vertical. Tese

(Doutorado) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília, 2009, 135p.

CALDERONI, Sabetai. Os Bilhões Perdidos no Lixo, 4ª ed., Humanitas Editora, FFLCH/USP. São Paulo, 2003, 346p.

CAPUTO, Homero Pinto. Mecânica dos solos e suas aplicações – Fundamentos, Volume 1. LCT – Livros Técnicos e Científicos Editora. 6ª ed., Rio de Janeiro, 1998, 234p.

CARPINETTI, Luiz C.R. Planejamento e análise de Experimentos, Apostila – Departamento de Engenharia de Produção, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2009, 217p.

CHAPMAN, Deborah [Ed.] Water quality assessments: A guide to use of biota, sediments and water in environmental monitoring, 2nd edition, published on behalf of World Health Organization (WHO), United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO) and United Nations Environment Programme (UNEP), Chapman & Hall, London, 1996, 651 p.

CONAMA. Resíduos da Construção Civil – Resolução N° 307 de 05/07/2002. Ministério do Meio Ambiente, Brasília, 2002. Disponível em <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=307>, com suas respectivas alterações. Acesso em 07/2013.

CRISTELO, Nuno. Estabilização de solos residuais graníticos através da adição de cal. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Lisboa, 2001.

DAS, Braja M. Fundamentos de Engenharia Geotécnica, Tradução EZ2Translate, revisão técnica: Leonardo Fagundes Rosembach Miranda - São Paulo: Cengage Learning, 2011, 610p.

DA SILVA, Florilda Vieira. Avaliação da contaminação das águas subterrâneas por atividade cemiterial na cidade de Maceió. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento, Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Alagoas, UFAL, Maceió, 2012, 150p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER-ME 258/94 – Solos compactados em equipamento miniatura Mini-MCV. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER-ME 256/94 – Solos compactados em equipamento miniatura-determinação da perda de massa por imersão. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER-CLA 259/94 – Classificação de solos tropicais para finalidade rodoviárias utilizando corpos-de-prova compactados em equipamento miniatura. Rio de Janeiro, 1996.

FERRAZ, Roberto Lopes. Contribuição ao estudo de estabilização de solos para fins rodoviários e habitacionais. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, 1994, 180p.

FERREIRA, Cristiane Arantes. Estudo do comportamento mecânico de solos reforçados com fibras através do método de elementos discretos. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010, 118p.

FEUERHARMEL, Marcos Roberto. Comportamento de solos reforçados com fibras de polipropileno. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000, 133p.

FRANÇA, Fabrício Carlos. Estabilização química de solos para fins rodoviários: estudo de caso com o produto “RBI Grade 81”. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, 2003, 104p.

GON, Fernanda dos Santos. Caracterização geotécnica através de ensaios de laboratório de um solo de diabásio da região de Campinas/SP. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 2011, 157p.

GUERRA, Mauri José; DONAIRE, Denis. Estatística Indutiva: teoria e aplicações, Livraria Ciência e Tecnologia Editora, São Paulo, 1991, 311 p.

GUIMARÃES, José Epitácio Passos. A Cal – Fundamentos e aplicações na Engenharia civil, 2ª ed., São Paulo: PINI, 2002, 341p.

HACHICH, Waldemar et. al. Fundações: teoria e prática, 2ª ed. São Paulo: PINI, 1998, 751p.

HEAD, K. H. Manual of Soil Laboratory Testing, Volume 2: Permeability, shear strength and compressibility, John Wiley & Sons, London, 1986, 440 p.

HENDRIKS, Ch. F.; NIJKERK, A. A.; VAN KOPPEN, A. E. O ciclo da construção. Tradução: Cláudia Naves, David Amorim e Rosana Stockler Campos Clímaco. Editora Universidade de Brasília, Brasília, 2007, 250p.

HIWATASHI, Erica. O processo de reciclagem dos resíduos sólidos inorgânicos domiciliares em Porto Alegre. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Administração – PPGA, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1998, 136p.

IRITANI, Mara Akie; EZAKI, Sibebe. As águas subterrâneas do Estado de São Paulo – Cadernos de Educação Ambiental, 3ª edição, Secretaria de Estado do meio Ambiente (SMA) / Instituto Geológico (IG), São Paulo, 2012, 104p.

JOHN, Vanderley M.; AGOPYAN, Vahan. Reciclagem de Resíduos da Construção. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. In: Seminário – Reciclagem de resíduos sólidos domésticos, São Paulo – SP, 2000. Disponível em <http://www.reciclagem.pcc.usp.br/ftp/CETESB.pdf>. Acesso em 07/2013.

JOHN, Vanderley M.; ÂNGULO, Sérgio Cirelli. Metodologia para desenvolvimento de reciclagem de resíduos. In: Coletânea Habitare, Volume 4 – Utilização de Resíduos na Construção Habitacional, 2003, p. 8-71.

JOHN, Vanderley M.; ÂNGULO, Sérgio C.; e AGOPYAN, Vahan. Sobre a necessidade de metodologia de pesquisa e desenvolvimento para reciclagem. In: Fórum das Universidades Públicas Paulistas - Ciência e Tecnologia em resíduos, 1, Lindóia – SP, 2003. Disponível em http://recycled.pcc.usp.br/ftp/necessidade%20metodologia_john%20et%20al.PDF. Acesso em 07/2013.

KLOCK et. al. Propriedades do papel Kraft feito a mão a partir de madeira de Pinus maximinoi H. E. Moore e Pinus taeda L. In: Congresso Iberoamericano de investigación em celulosa y papel, CIADICYP, 2, Campinas, São Paulo - SP, 2002. Disponível em http://www.riadicyp.org.ar/index.php?option=com_phocadownload&view=category&id=7%3Apapel&Itemid=100033&lang=es#. Acesso em 07/2013.

LOAIZA, Carlos Fernández. Mejoramiento y Estabilización de Suelos, Editorial Limusa, México, 1991, 352p.

MANHÃES, Adriana Pellegrini. Caracterização da cadeia produtiva do bambu no Brasil: abordagem preliminar. Monografia (Graduação) – Curso de Engenharia Florestal, Instituto de Florestas, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008, 32p.

MANSOR et. al. Resíduos sólidos – Cadernos de Educação Ambiental, Secretaria de Estado do meio Ambiente (SMA) / Coordenadoria de Planejamento Ambiental (CPLA), São Paulo, 2010, 147p.

MATEOS, Manuel. Los Residuos - Su uso ecológico en la construcción. Disponível na página do Colégio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos – CICCPC, 2006. Disponível em: <http://www.ciccp.es/imgweb/sede%20nacional/colaboraciones/residuos.pdf>. Acesso em 07/2013.

MIDÕES, Carla; FERNANDES, Judite; COSTA, Cristina Gomes da. Água subterrânea: conhecer para proteger e preservar . Instituto Geológico e Mineiro, IGM, Portugal, 2001. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10400.9/488>. Acesso em 07/2013.

MOREIRA, Evandro Dias. Desempenho de dois trechos de solo emulsão em vias de baixo volume de tráfego. Dissertação (Mestrado) – Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010, 136f.

MORENO, Rafael Gracia. Empleo de la cal en el mejoramiento de los suelos arcillosos. Tesis de graduación, Universidad de Sonora, México, 1996, 118p. Disponível em: http://www.bibliotecadigital.uson.mx/bdg_tesisIndice.aspx?tesis=7605. Acesso em 07/2013.

NASCIMENTO, Úlpio. Princípios e âmbito de aplicação da estabilização de solos. In: Curso de Especialização 108 – Estabilização de Solos, LNEC, Lisboa, 1970, cap. 1.

NOGAMI, J. S; VILLIBOR, D. F. Pavimentação de Baixo Custo com Solos Lateríticos, Editora Villibor, São Paulo, 1995, 240p.

PARSONS. R.L., MILBURN, J. P. Engineering Behavior of Stabilized Soils. TRB 2003 Annual Meeting. Leawood KS, 2003.

PINTO, Carlos de Souza. Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 Aulas, 3ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006, 355p.

RECICLAGEM DE RESÍDUOS PARA CONSTRUÇÃO – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (2013). A construção, o meio ambiente e a reciclagem, Texto técnico. Disponível em: http://recycled.pcc.usp.br/a_construcao_e.htm. Acesso em 07/2013.

RICHTER, Carlos A. Água: Métodos e tecnologia de tratamento, Editora Edgard Blücher Ltda., São Paulo, 2009, 340p.

ROCHA et. al. Recursos hídricos – Cadernos de Educação Ambiental, Secretaria de Estado do meio Ambiente (SMA) / Coordenadoria de Educação Ambiental (CEA), São Paulo, 2011, 104p.

ROCHA, Janaíde Cavalcante; CHERIAF, Malik. Aproveitamento de resíduos na construção. In: Coleção Habitar, Volume 4 – Utilização de Resíduos na Construção Habitacional, ANTAC. Porto Alegre, 2003, p. 72-93.

ROLIM, Mário Monteiro. Avaliação físico-mecânica do material solo-vinhaça concentrada e sua utilização para fins de fabricação de tijolos. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, 1996, 90p.

SAMPAIO, Mirian Guillen. Comportamento mecânico e hídrico de solos estabilizados com emulsão asfáltica. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, 2008, 140p.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO - SNIC (2013): Relatório Anual 2011. Disponível em: http://www.snic.org.br/25set1024/snic_relata2011-12.html. Acesso em 07/2013.

TEBBUTT, T. H. Y. Principles of water quality control, 5th ed., Pergamon Press Ltd, Headington Hill Hall, Oxford, England, 1998, 288p.

VAILLANT, João Marcos Miranda. Efeitos estabilizantes do aditivo químico DS-328 sobre três solos da região de Viçosa-MG, para fins rodoviários. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa UFV, Viçosa, 1995, 76f.

VIEIRA, Sergio Vilhena. Estabilização de solos com licor negro Kraft concentrado para fins rodoviários. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa UFV, Viçosa, 1994, 126p.

VARGAS, Milton. Introdução à Mecânica dos Solos, McGraw-Hill do Brasil, São Paulo, 1978, v1, 520p.

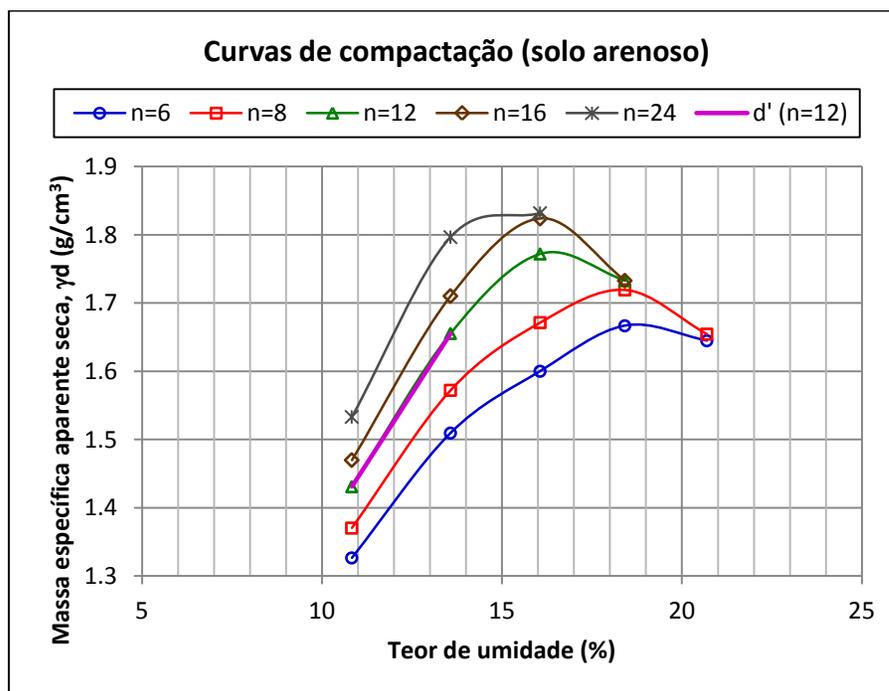
ZIMBRES, Eurico. Guia avançado sobre água subterrânea. Faculdade de Geologia – Universidade do Estado do Rio de Janeiro UERJ, Rio de Janeiro, 2002. Disponível em: <http://www.meioambiente.pro.br/agua/guia/aquasubterranea.htm>. Acesso em 06/2013.

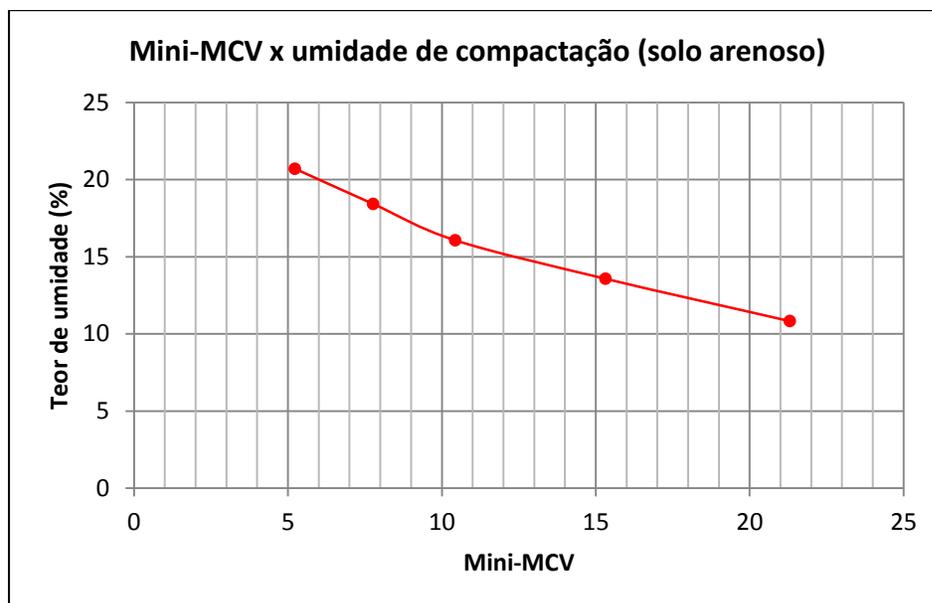
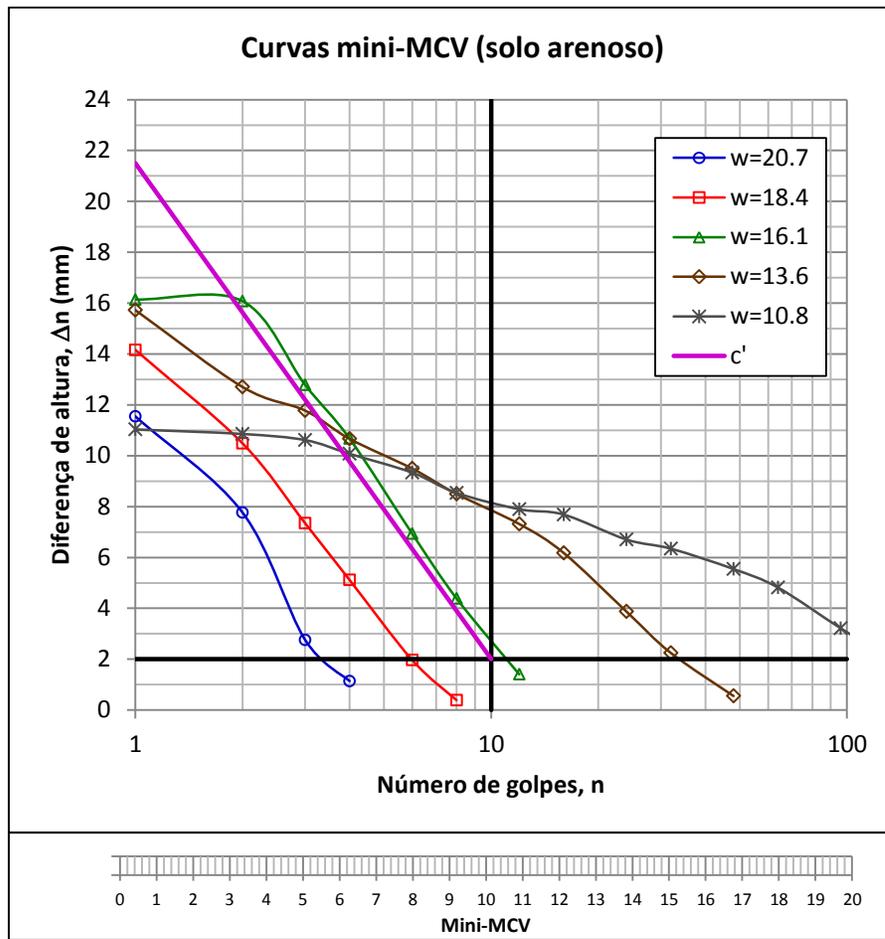
ANEXO A

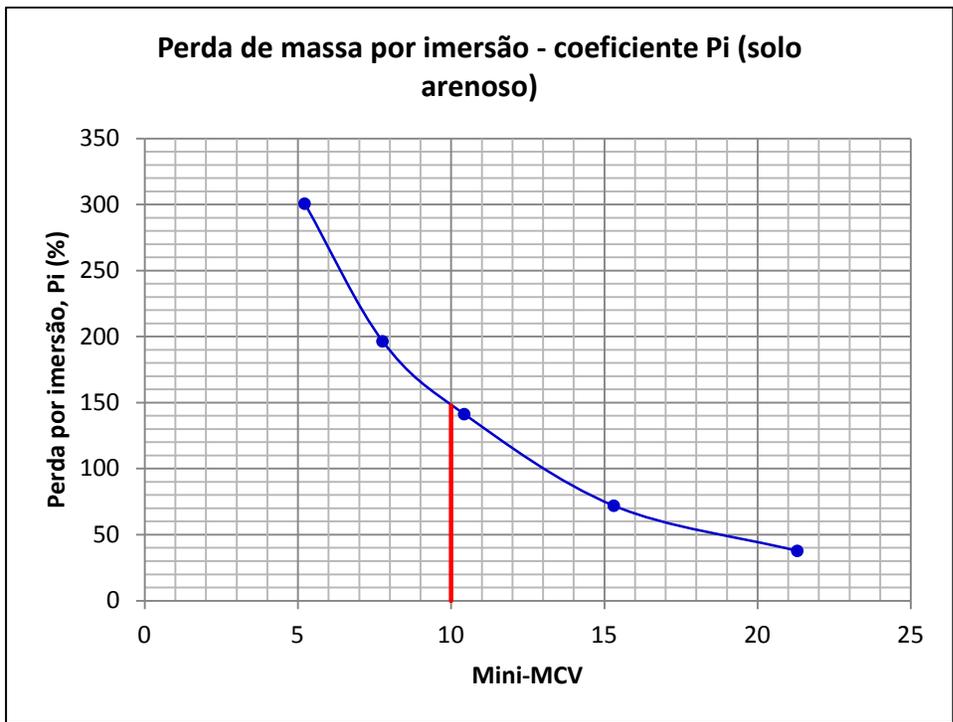
Neste Anexo, encontram-se as tabelas resumo dos cálculos e respectivos gráficos dos ensaios mini-MCV para a classificação MCT, para os dois solos estudados.

Tabela A.1 – Resumo dos cálculos dos ensaios mini-MCV para o solo arenoso

Mini-MCV		5.2	7.8	10.4	15.3	21.3
Teor de umidade	(%)	20.7	18.4	16.1	13.6	10.8
Pi	(%)	300.6	196.4	141.2	71.9	37.7
Número de golpes	n	Massa específica aparente seca				
	6	1.645	1.667	1.600	1.510	1.327
	8	1.655	1.719	1.671	1.572	1.370
	12	0.000	1.733	1.772	1.655	1.431
	16	0.000	1.733	1.824	1.710	1.470
	24	0.000	0.000	1.832	1.797	1.533
Retas médias p/determinação dos índices				x	y	
Reta do gráfico: curvas Mini-MCV				1	21.5	
Coefficiente c' = 1.95				10	2	
Reta do gráfico: curvas de compactação				10.8	1.431	
Coefficiente d' = 81.89				13.6	1.655	







para Mini-MCV=10	
Coeficiente Pi (%)	148
Coeficiente c'	1.95
Coeficiente d'	81.89
Coeficiente e'	1.199
SOLO TIPO:	NG'

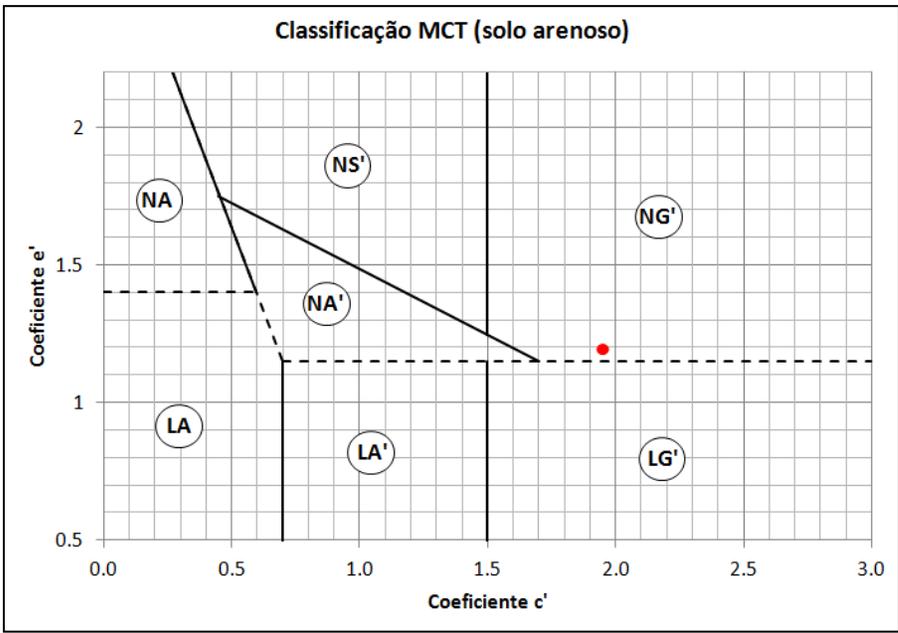
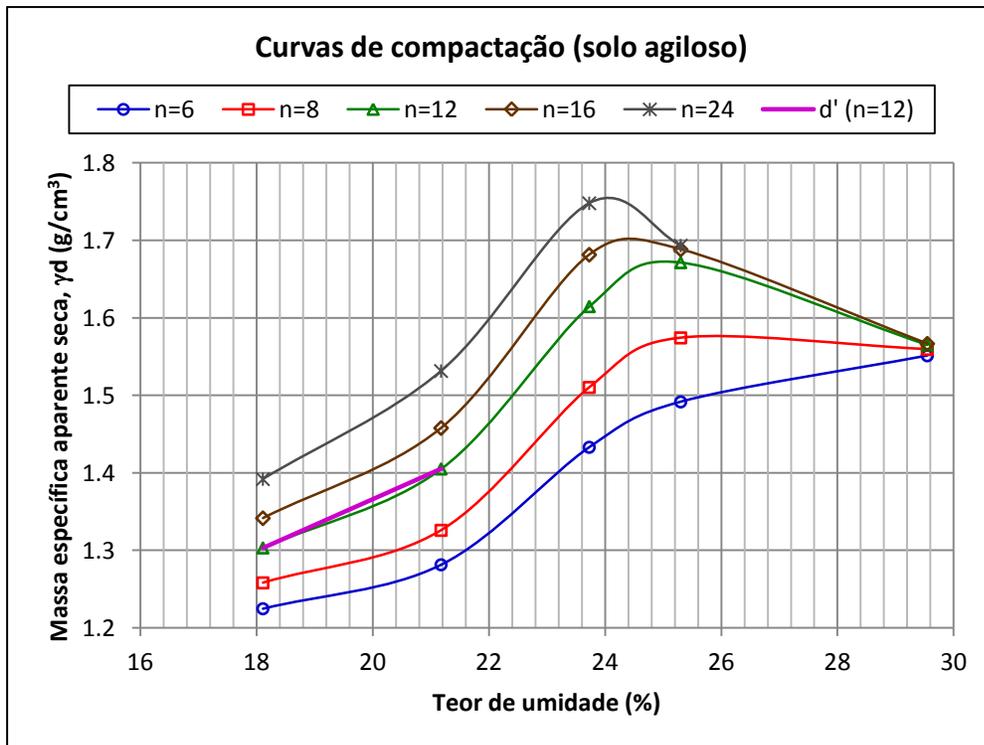
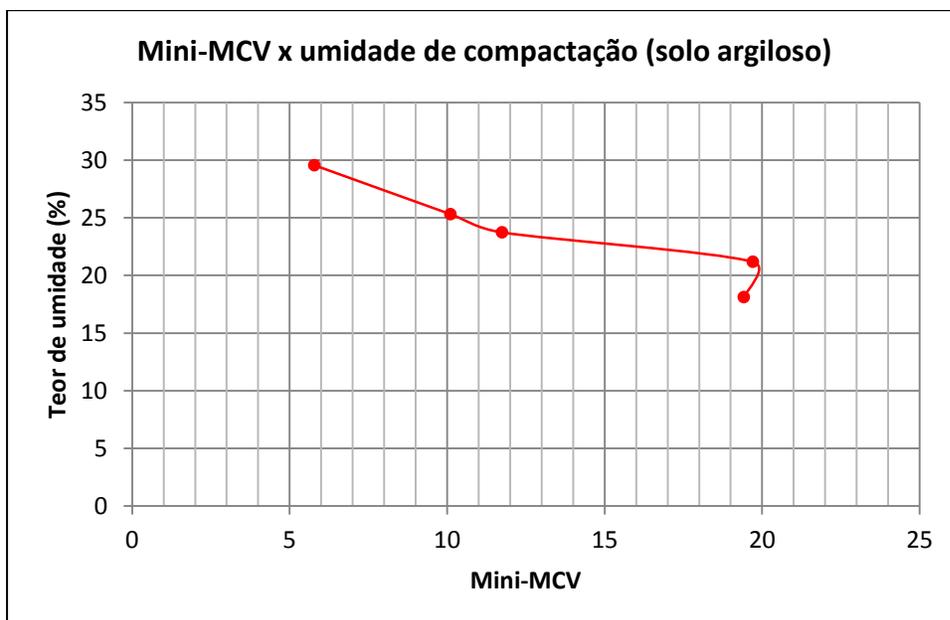
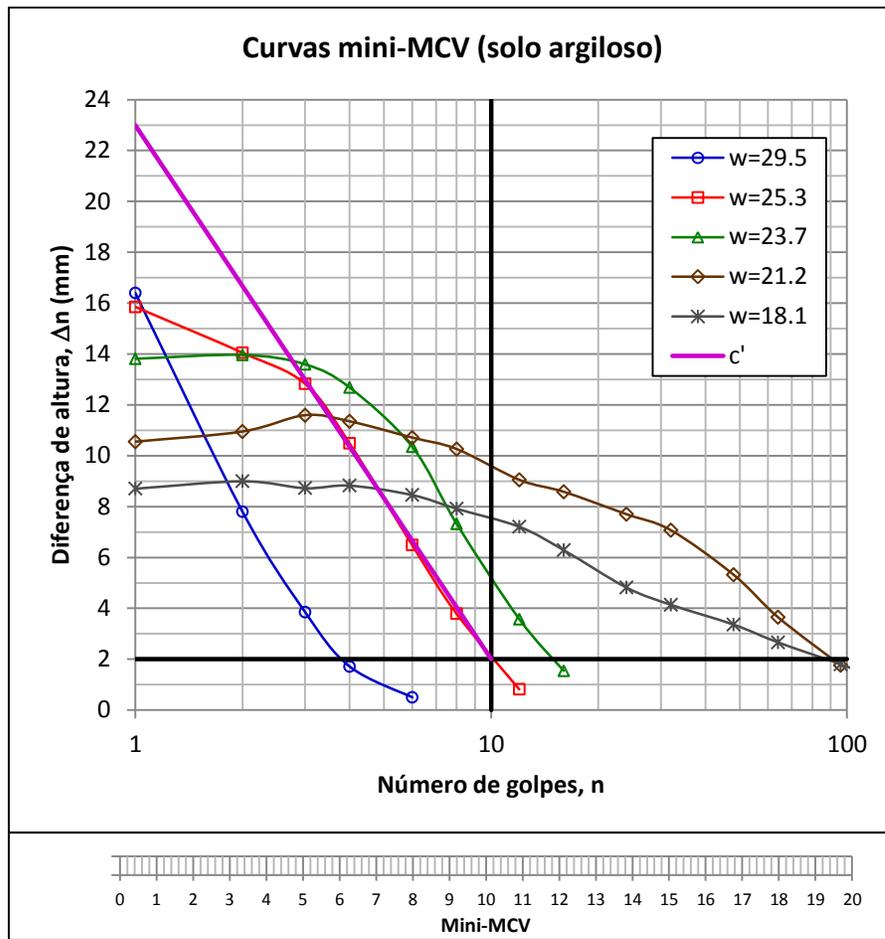
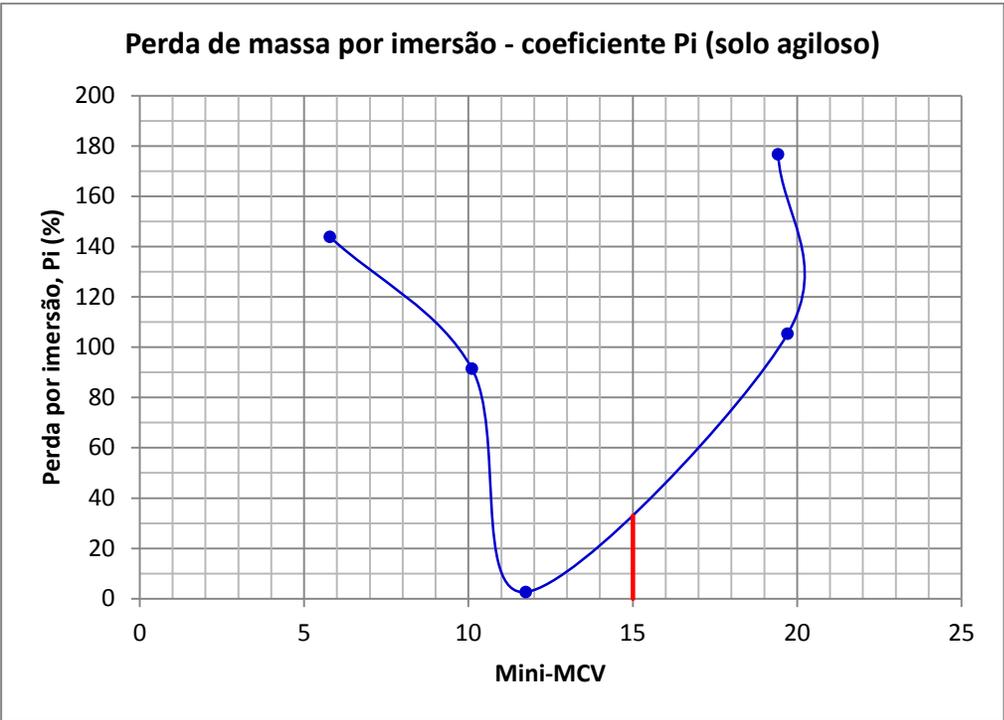


Tabela A.2 – Resumo dos cálculos dos ensaios mini-MCV para o solo argiloso

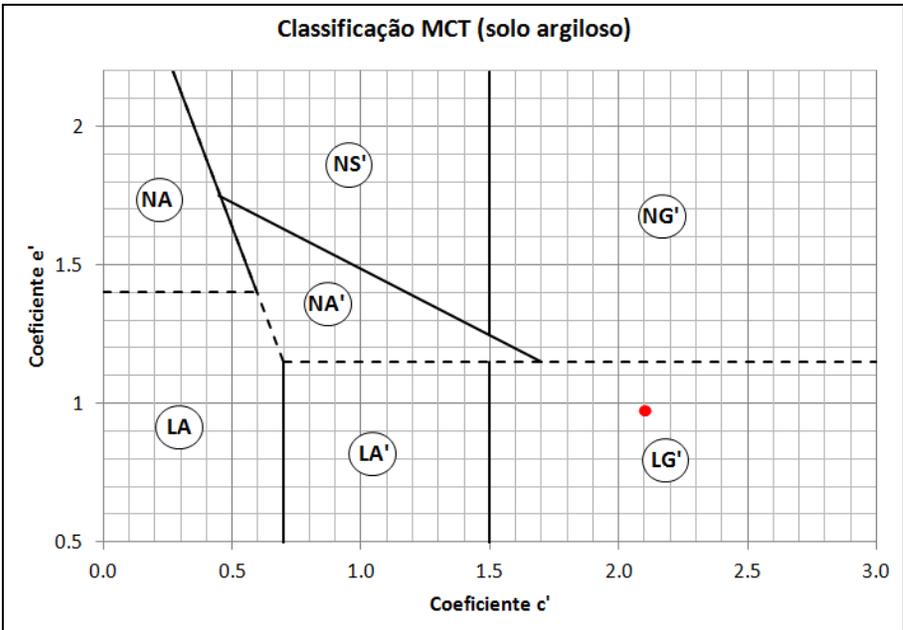
Mini-MCV		5.8	10.1	11.7	19.7	19.4
Teor de umidade	(%)	29.5	25.3	23.7	21.2	18.1
Pi	(%)	143.9	91.5	2.6	105.4	176.7
Número de golpes	n	Massa específica aparente seca				
	6	1.551	1.492	1.433	1.281	1.225
	8	1.559	1.574	1.510	1.326	1.258
	12	1.565	1.671	1.615	1.405	1.303
	16	1.567	1.688	1.682	1.458	1.342
	24	0.000	1.693	1.748	1.531	1.392
Retas médias p/determinação dos índices					x	y
Reta do gráfico: curvas Mini-MCV					1	23
Coefficiente c' = 2.1					10	2
Reta do gráfico: curvas de compactação					18.1	1.303
Coefficiente d' = 33.19					21.2	1.405







para Mini-MCV=15	
Coeficiente Pi (%)	33
Coeficiente c'	2.1
Coeficiente d'	33.19
Coeficiente e'	0.977
SOLO TIPO:	NG'



ANEXO B

Neste Anexo, encontram-se as curvas de Tensão cisalhante vs. Deformação específica horizontal para cada solo e mistura respectiva e para cada tipo de ensaio de cisalhamento direto realizado (umidade ótima, inundado e com cura de 28 dias). Como ilustram as Figuras B1 a B24.

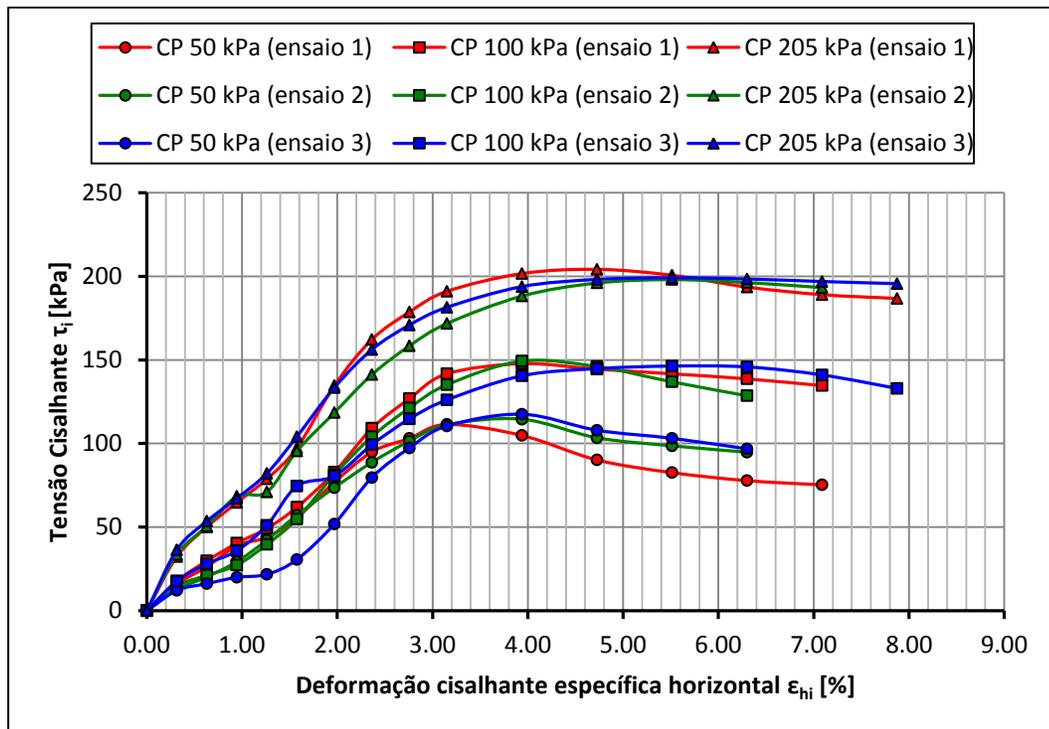


Figura B1 – Tensão cisalhante vs. Deformação específica horizontal das misturas do solo arenoso com 0% de fibra - ensaio de CDUO

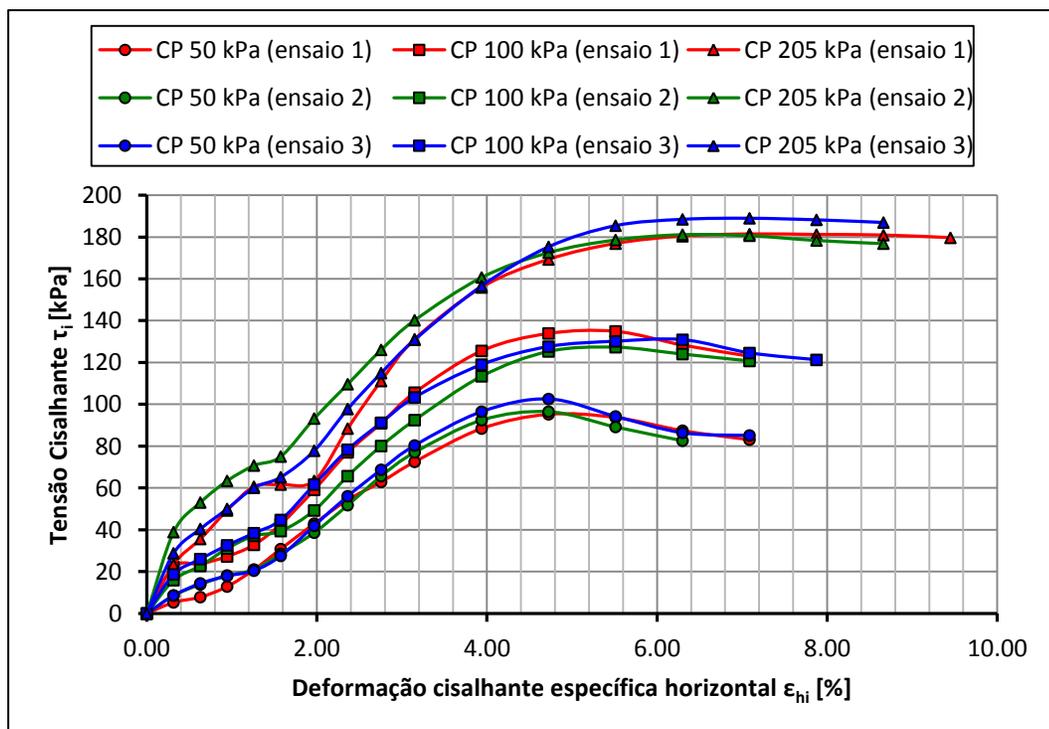


Figura B2 – Tensão cisalhante vs. Deformação específica horizontal das misturas do solo arenoso com 5% de fibra - ensaio de CDUO

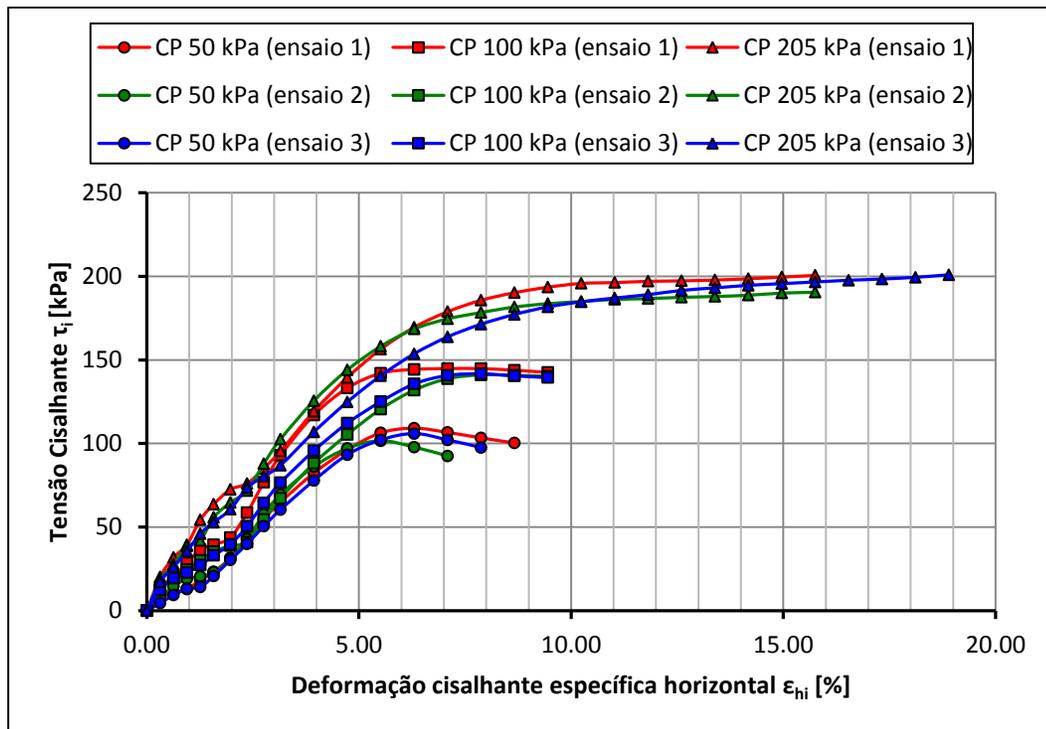


Figura B3 – Tensão cisalhante vs. Deformação específica horizontal das misturas do solo arenoso com 10% de fibra - ensaio de CDUO

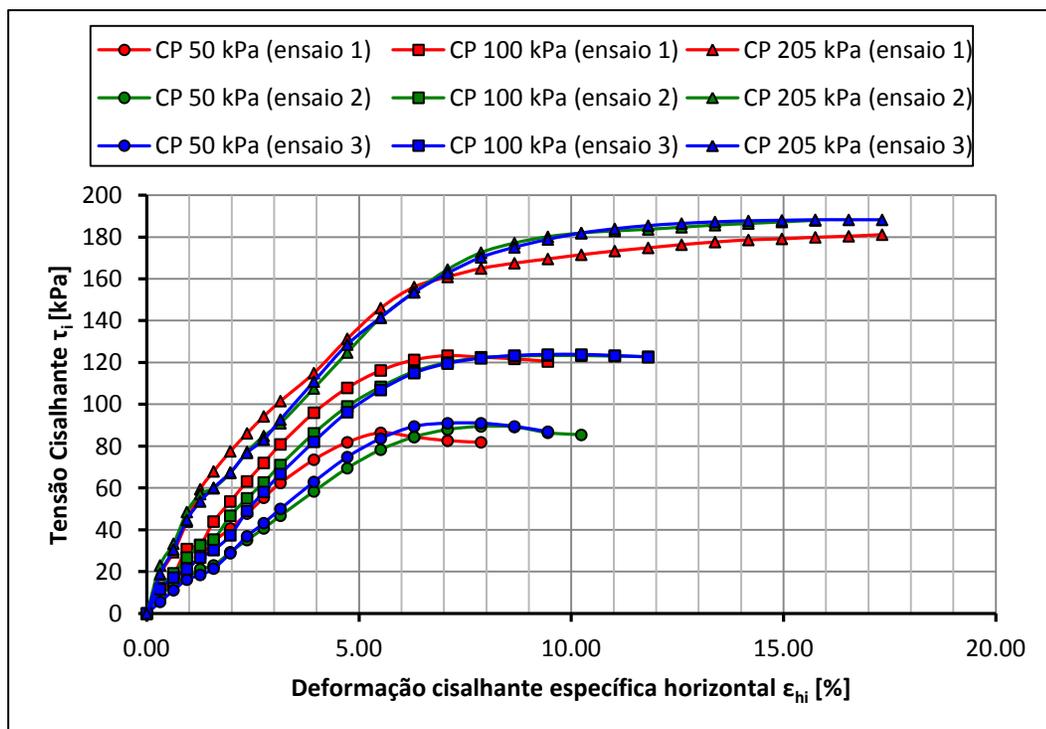


Figura B4 – Tensão cisalhante vs. Deformação específica horizontal das misturas do solo arenoso com 15% de fibra - ensaio de CDUO

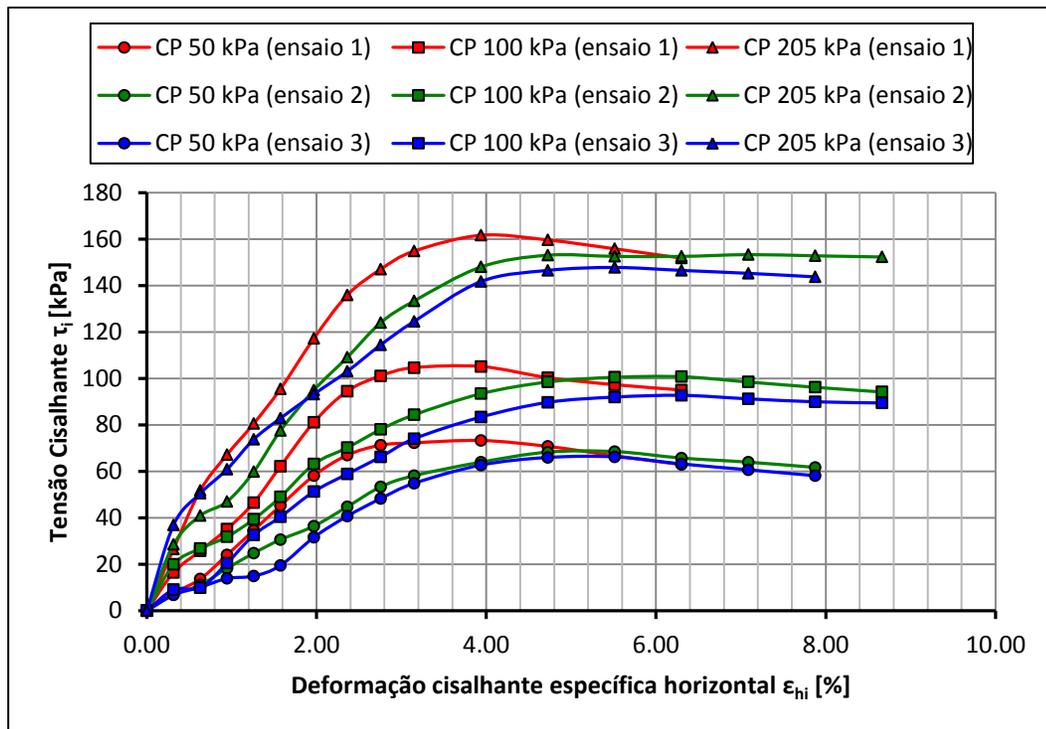


Figura B5 – Tensão cisalhante vs. Deformação específica horizontal das misturas do solo arenoso com 0% de fibra - ensaio de CDI

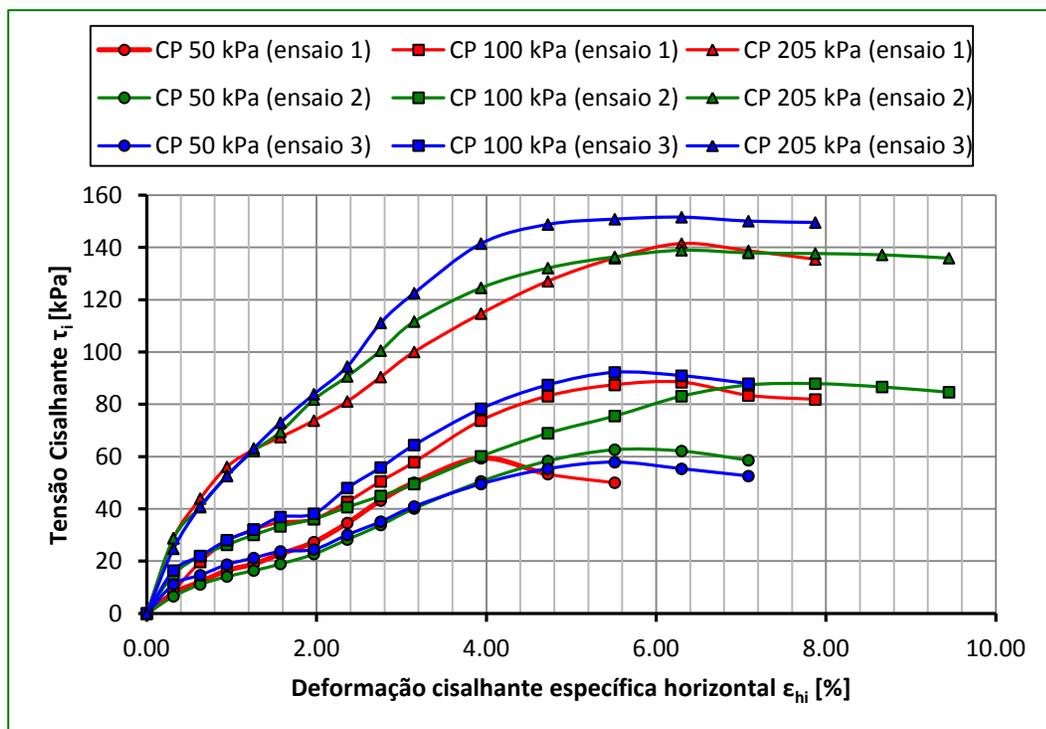


Figura B6 – Tensão cisalhante vs. Deformação específica horizontal das misturas do solo arenoso com 5% de fibra - ensaio de CDI

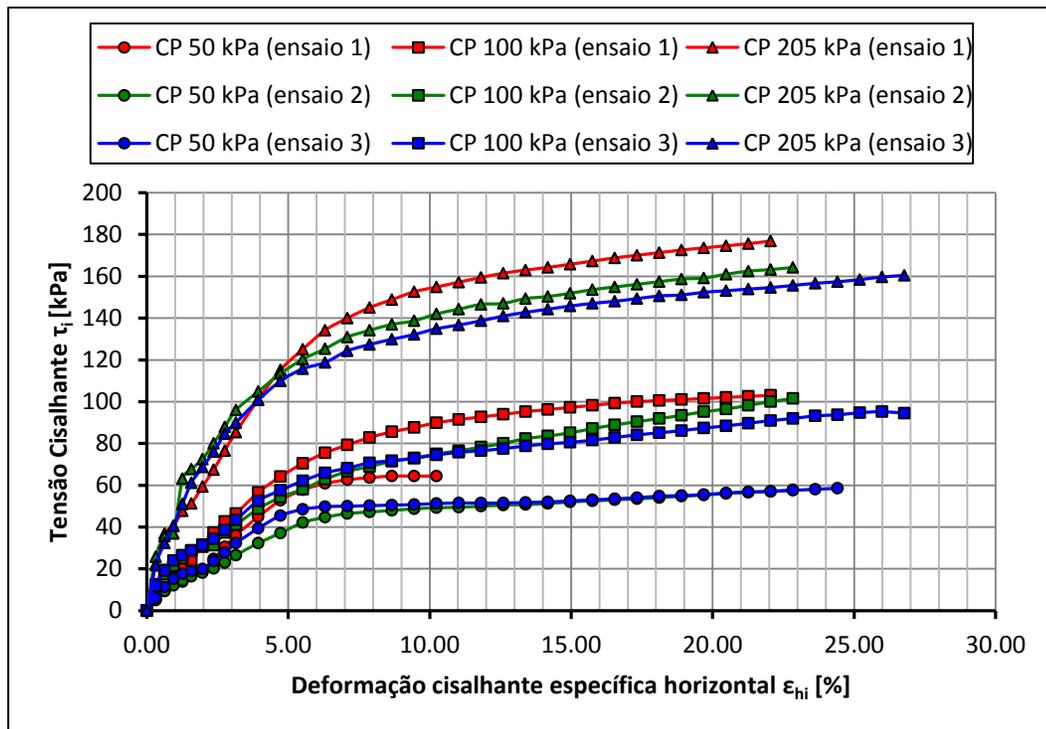


Figura B7 – Tensão cisalhante vs. Deformação específica horizontal das misturas do solo arenoso com 10% de fibra - ensaio de CDI

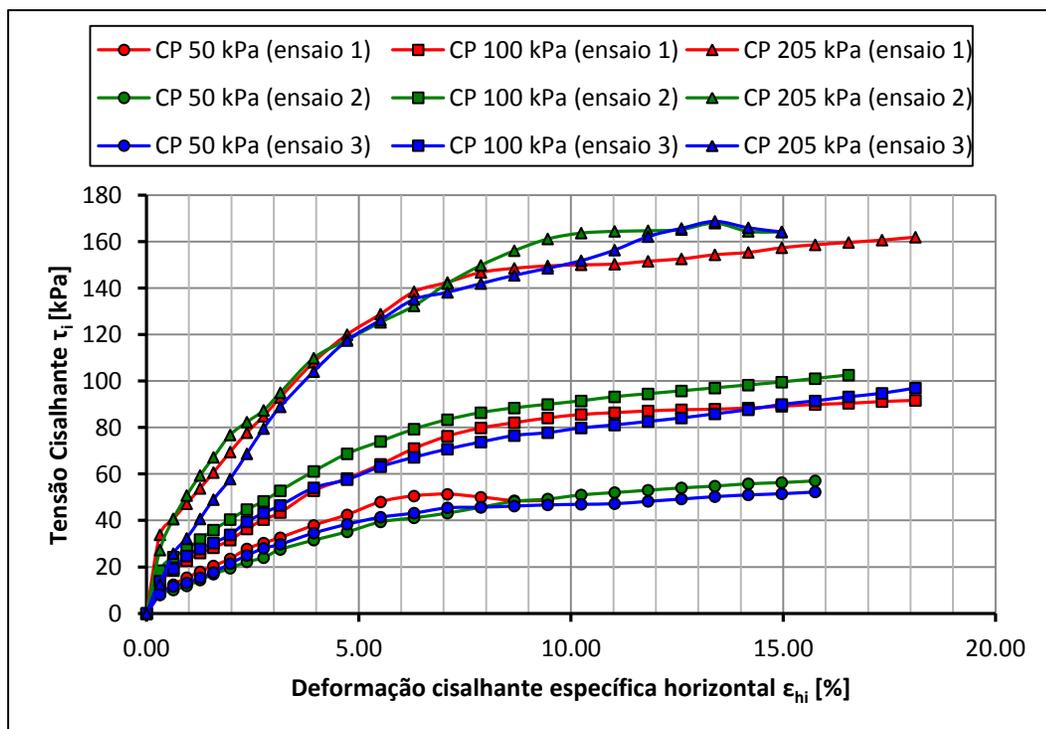


Figura B8 – Tensão cisalhante vs. Deformação específica horizontal das misturas do solo arenoso com 15% de fibra - ensaio de CDI

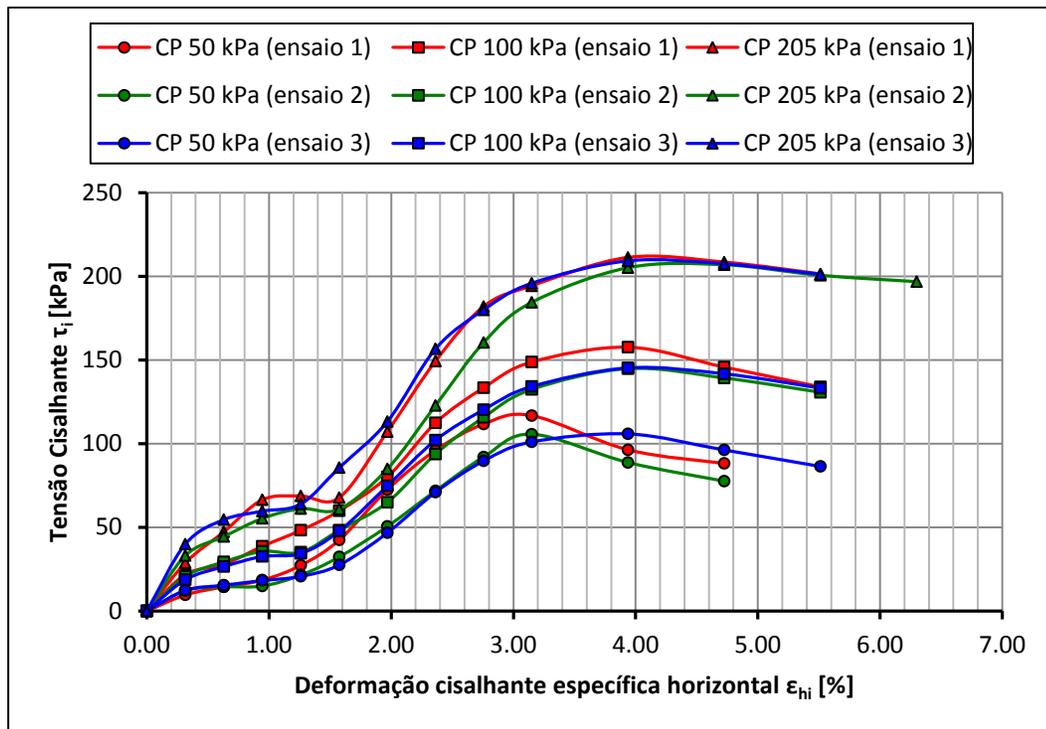


Figura B9 – Tensão cisalhante vs. Deformação específica horizontal das misturas do solo arenoso com 0% de fibra - ensaio de CD28

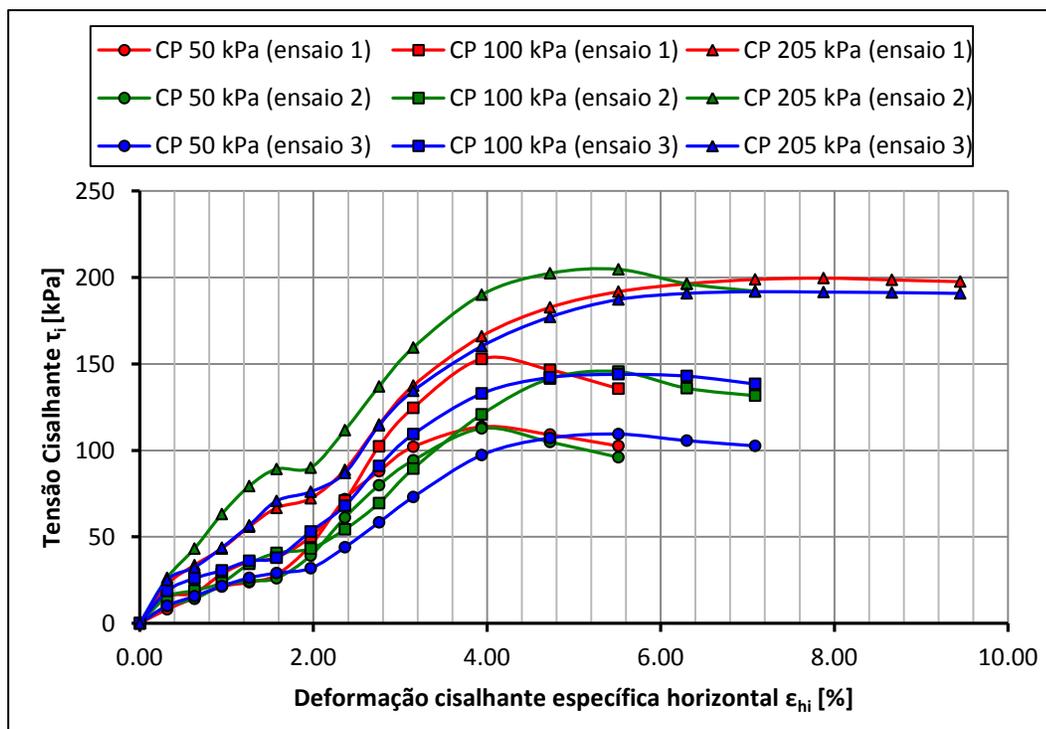


Figura B10 – Tensão cisalhante vs. Deformação específica horizontal das misturas do solo arenoso com 5% de fibra - ensaio de CD28

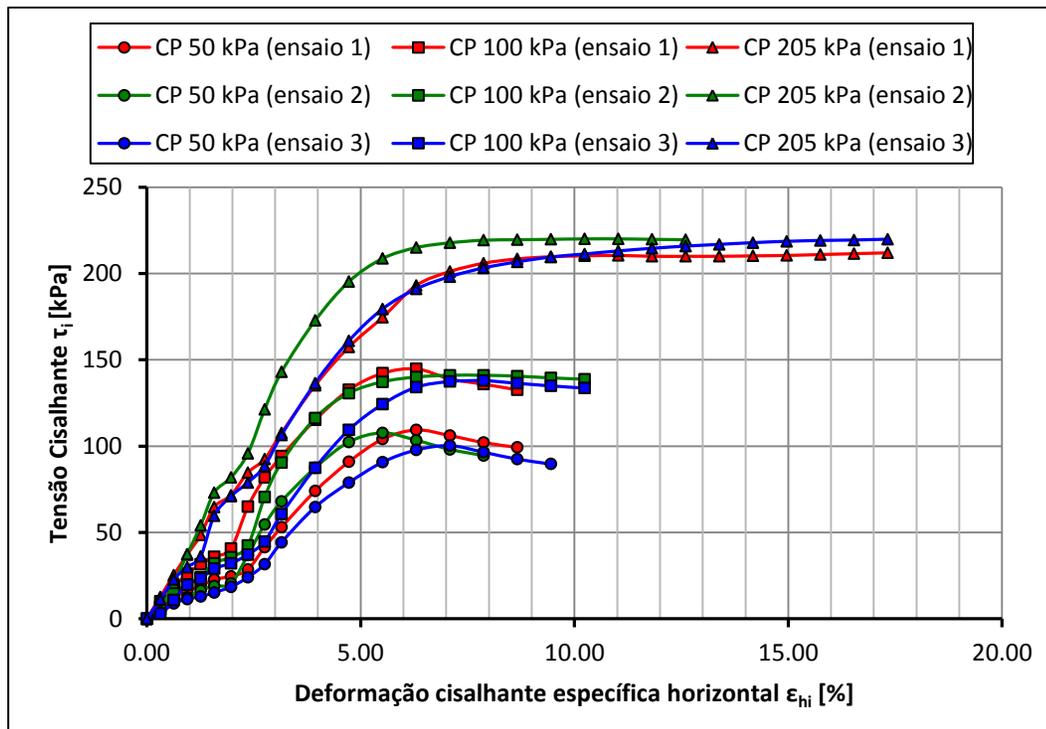


Figura B11 – Tensão cisalhante vs. Deformação específica horizontal das misturas do solo arenoso com 10% de fibra - ensaio de CD28

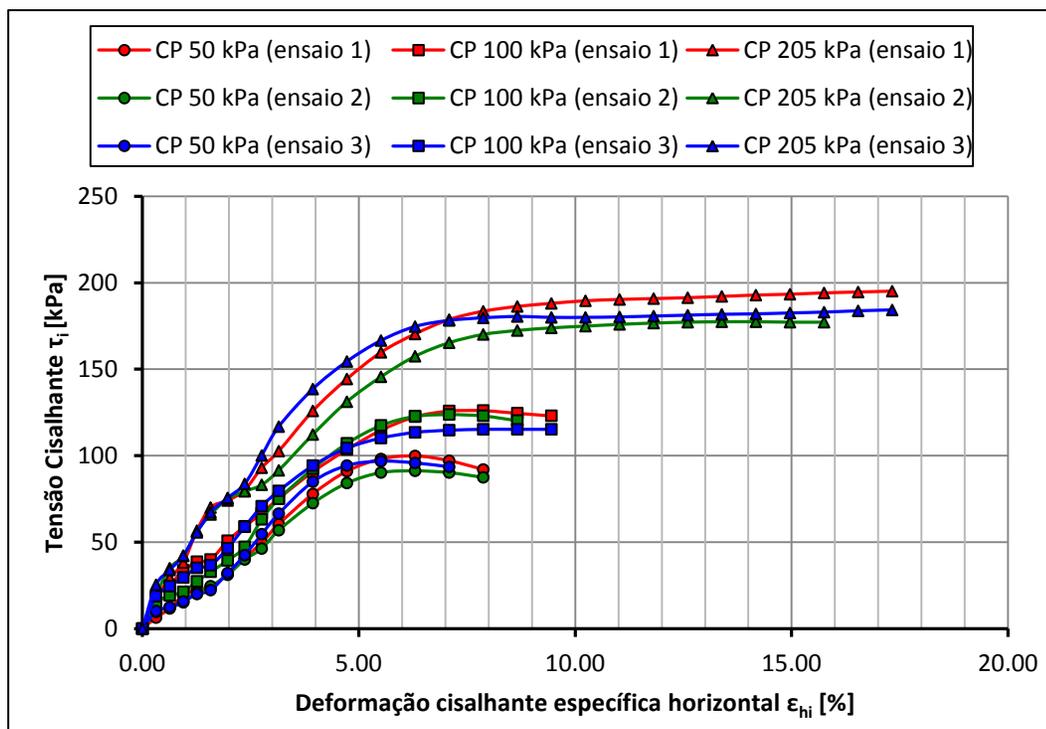


Figura B12 – Tensão cisalhante vs. Deformação específica horizontal das misturas do solo arenoso com 15% de fibra - ensaio de CD28

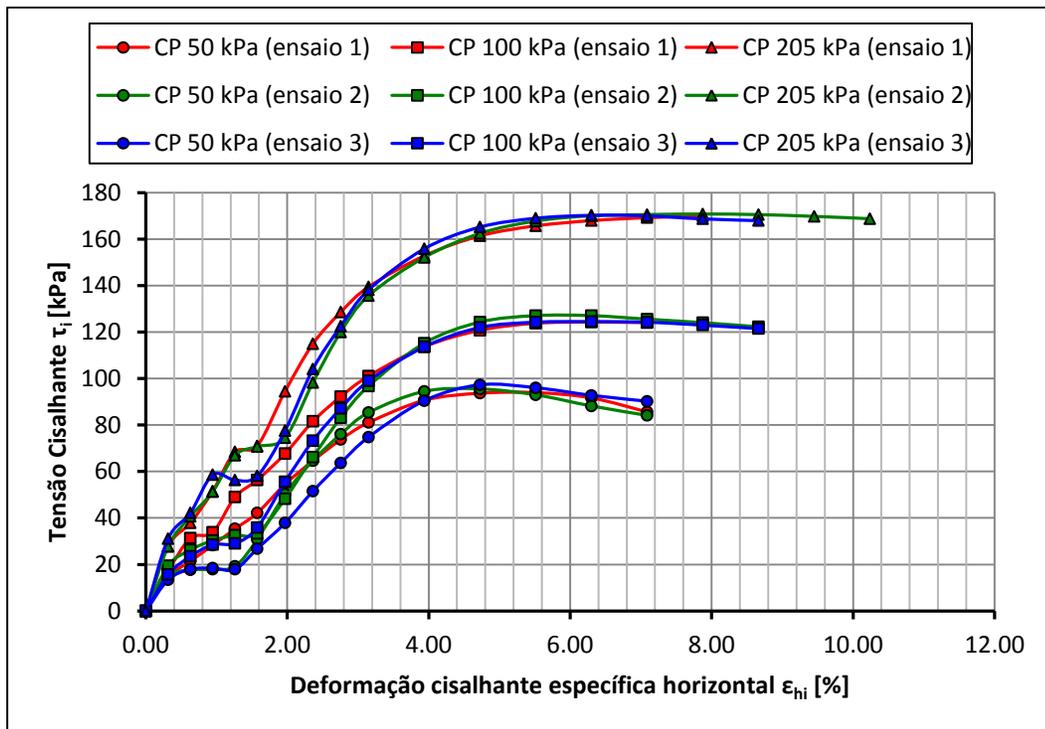


Figura B13 – Tensão cisalhante vs. Deformação específica horizontal das misturas do solo argiloso com 0% de fibra - ensaio de CDUO

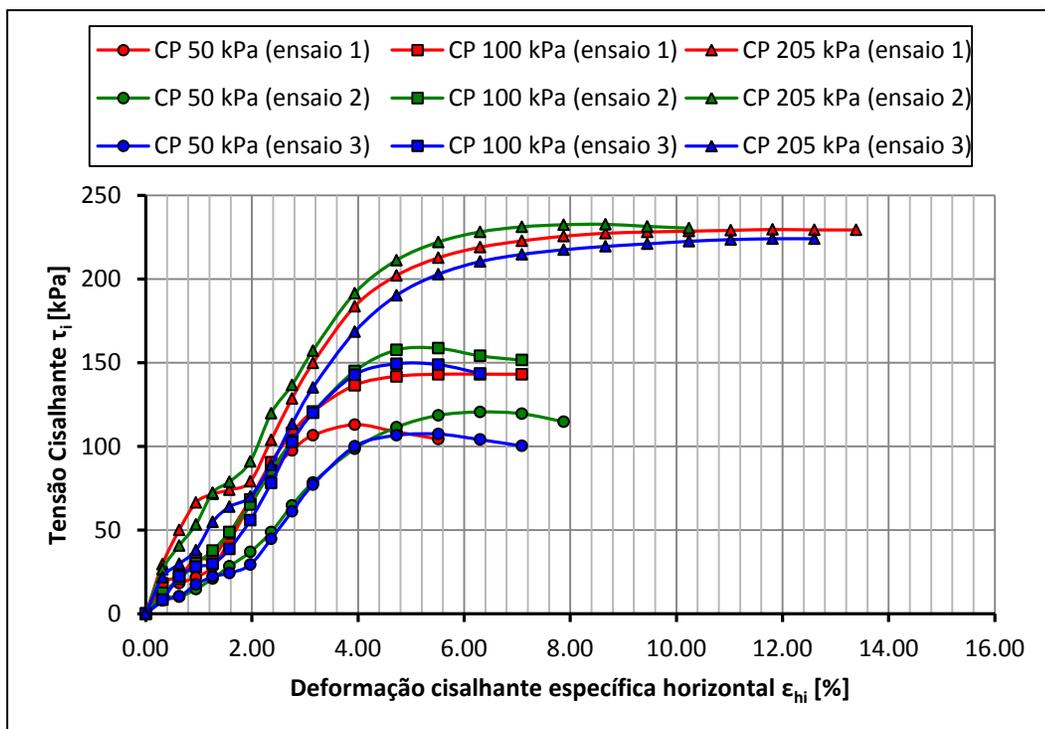


Figura B14 – Tensão cisalhante vs. Deformação específica horizontal das misturas do solo argiloso com 5% de fibra - ensaio de CDUO

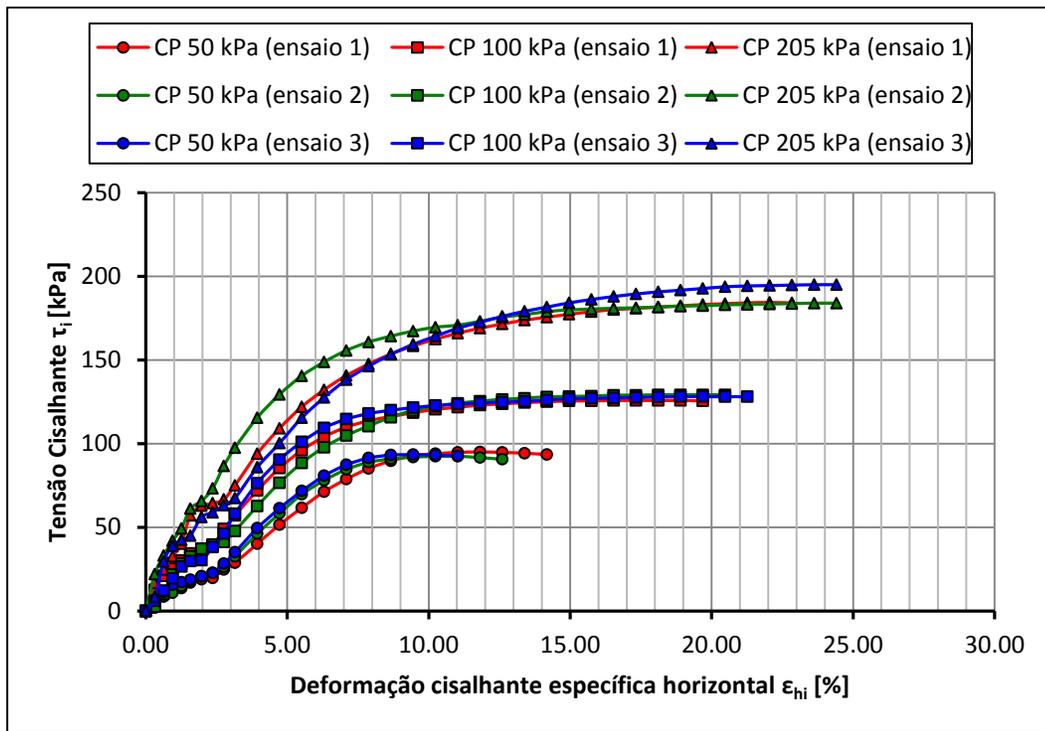


Figura B15 – Tensão cisalhante vs. Deformação específica horizontal das misturas do solo argiloso com 10% de fibra - ensaio de CDUO

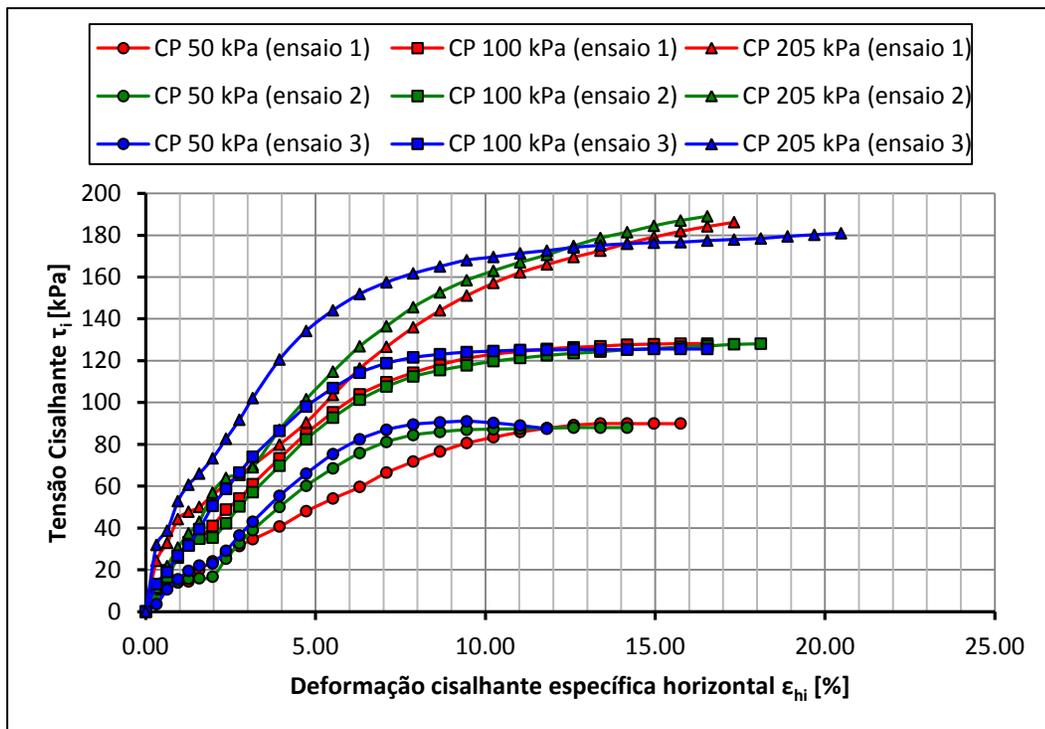


Figura B16 – Tensão cisalhante vs. Deformação específica horizontal das misturas do solo argiloso com 15% de fibra - ensaio de CDUO

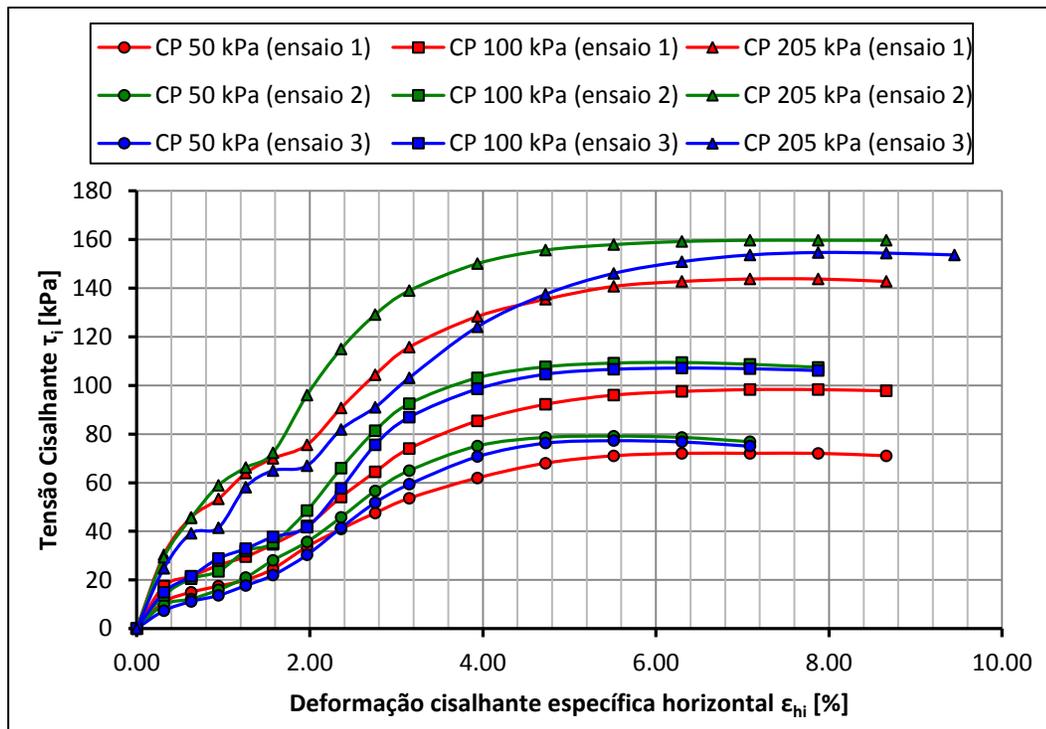


Figura B17 – Tensão cisalhante vs. Deformação específica horizontal das misturas do solo argiloso com 0% de fibra - ensaio de CDI

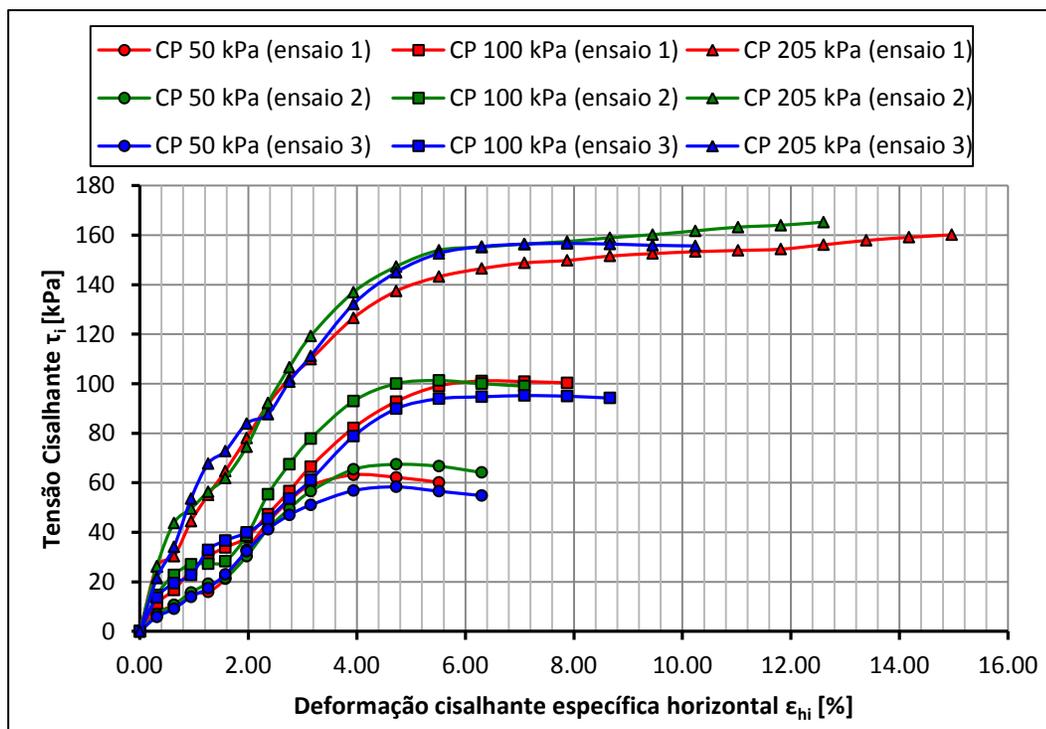


Figura B18 – Tensão cisalhante vs. Deformação específica horizontal das misturas do solo argiloso com 5% de fibra - ensaio de CDI

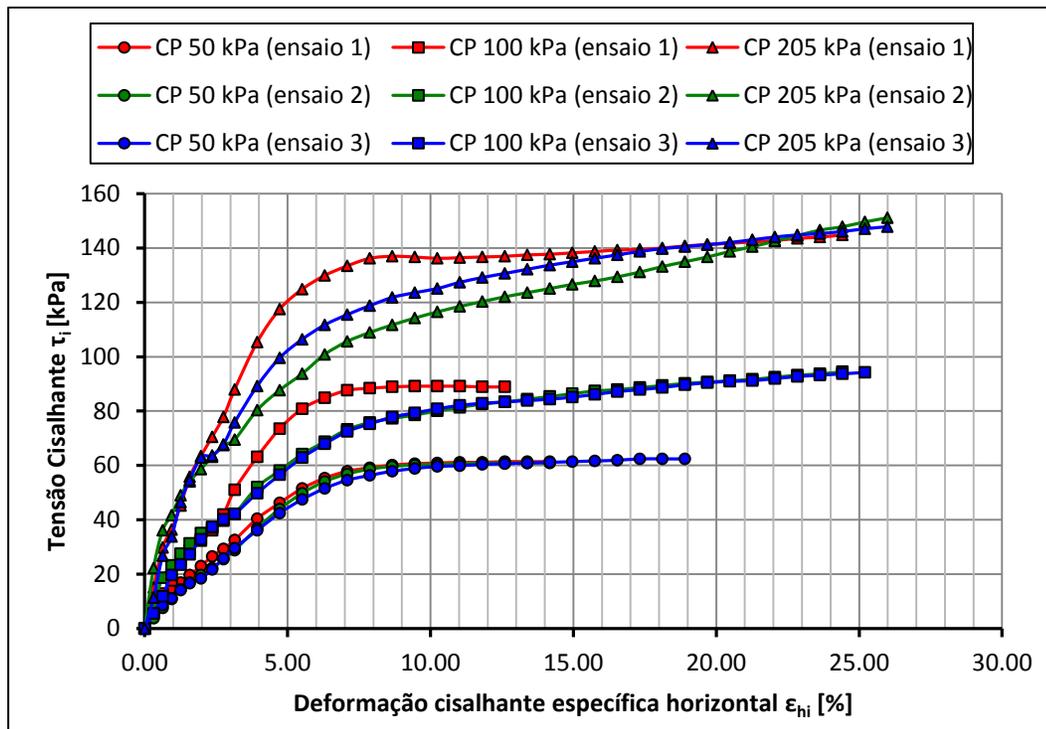


Figura B19 – Tensão cisalhante vs. Deformação específica horizontal das misturas do solo argiloso com 10% de fibra - ensaio de CDI

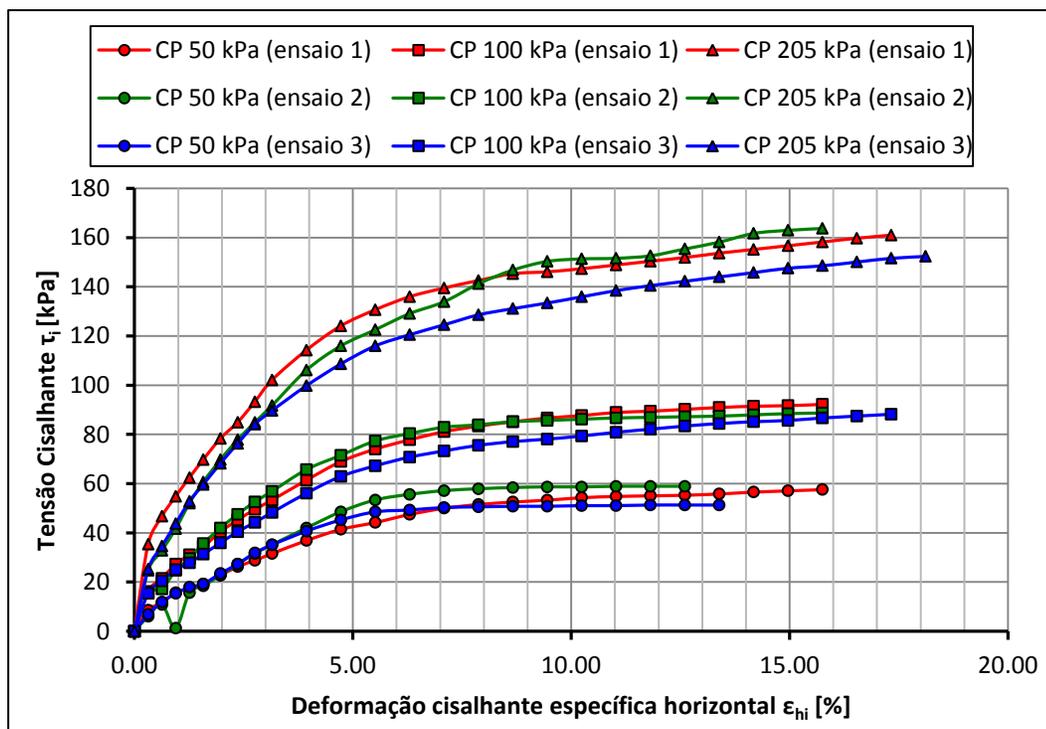


Figura B20 – Tensão cisalhante vs. Deformação específica horizontal das misturas do solo argiloso com 15% de fibra - ensaio de CDI

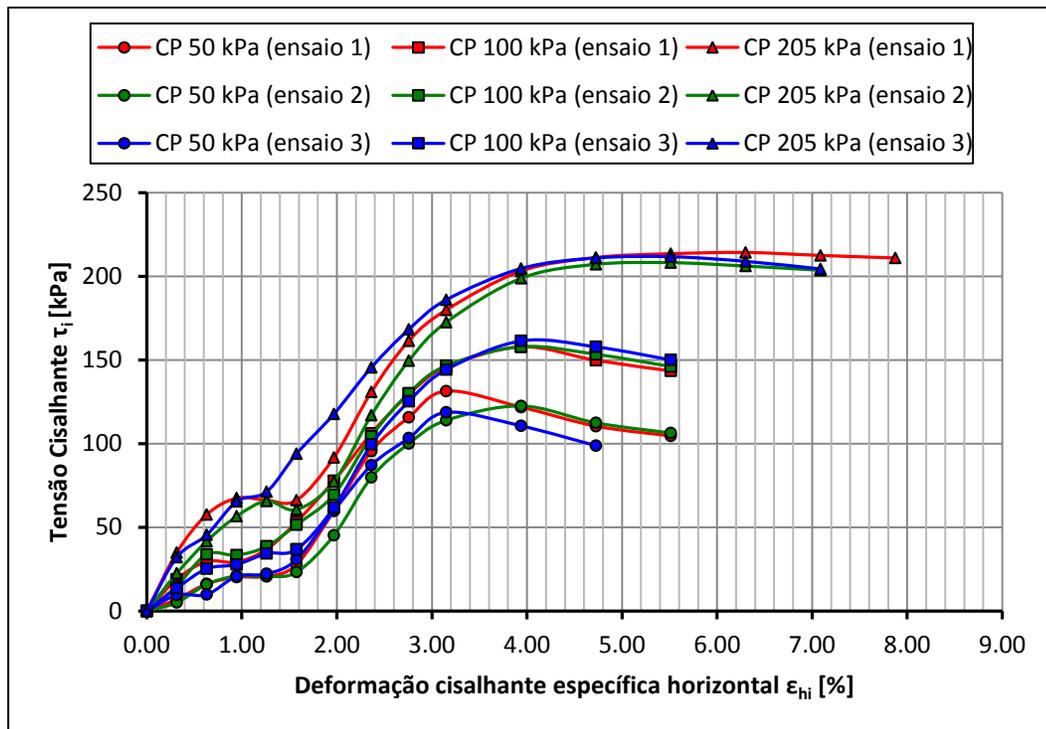


Figura B21 – Tensão cisalhante vs. Deformação específica horizontal das misturas do solo argiloso com 0% de fibra - ensaio de CD28

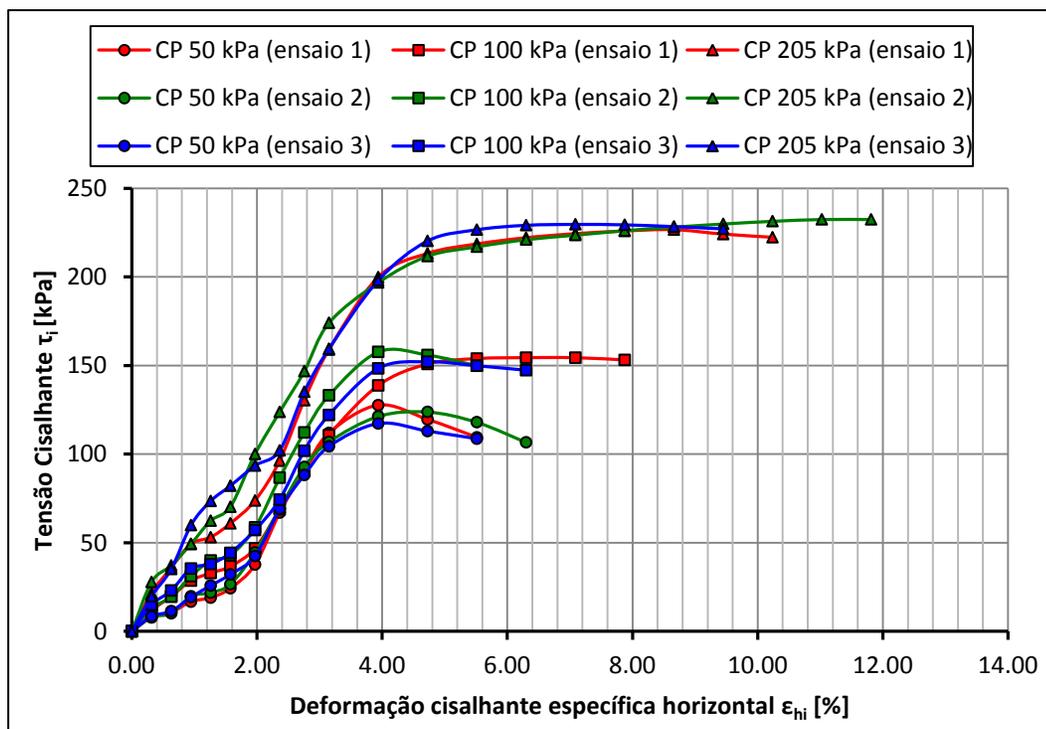


Figura B22 – Tensão cisalhante vs. Deformação específica horizontal das misturas do solo argiloso com 5% de fibra - ensaio de CD28

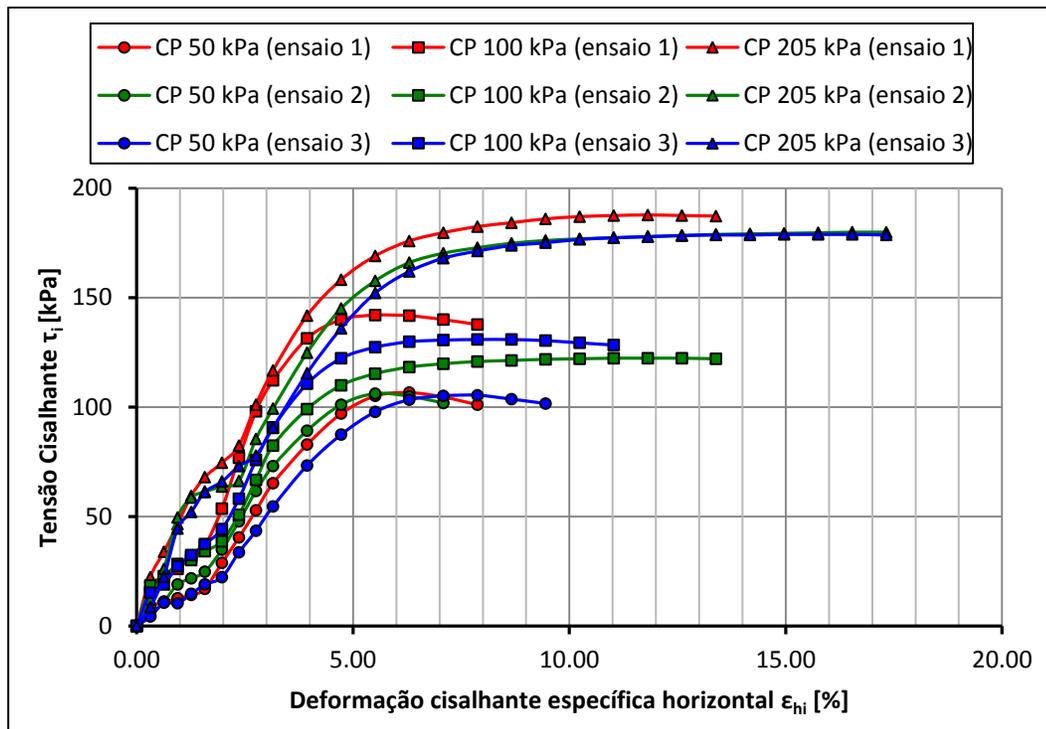


Figura B23 – Tensão cisalhante vs. Deformação específica horizontal das misturas do solo argiloso com 10% de fibra - ensaio de CD28

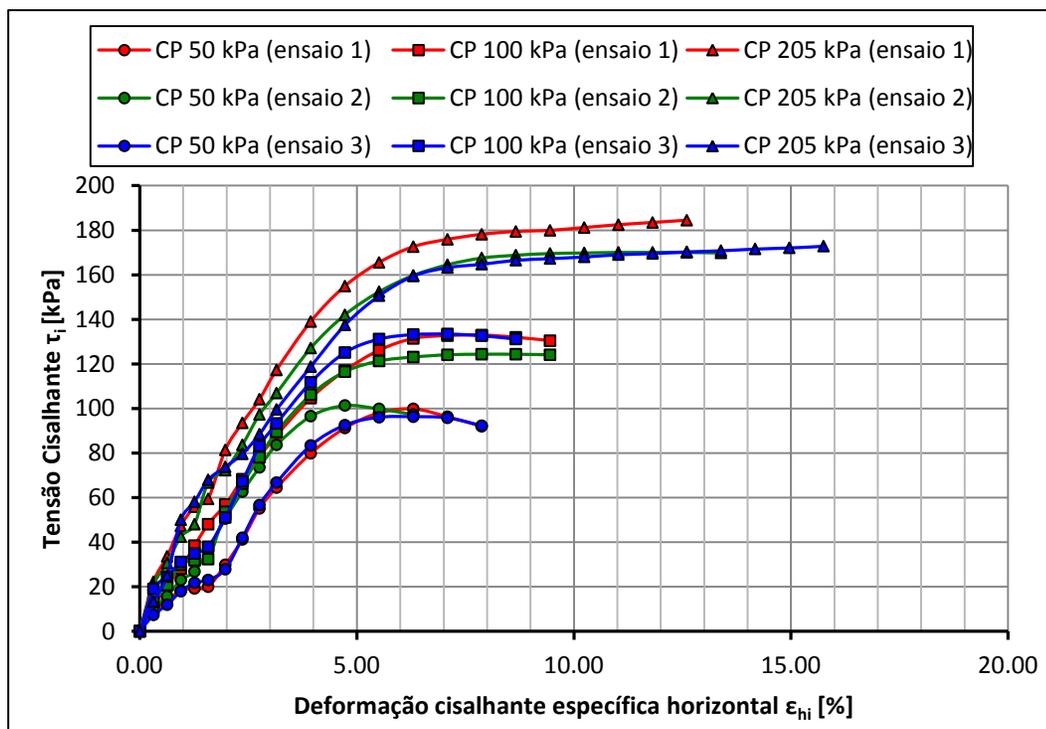


Figura B24 – Tensão cisalhante vs. Deformação específica horizontal das misturas do solo argiloso com 15% de fibra - ensaio de CD28

ANEXO C

Neste Anexo, encontram-se as curvas de Variação volumétrica vs. Deformação específica horizontal para cada solo e mistura respectiva e para cada tipo de ensaio de cisalhamento direto realizado (umidade ótima, inundado e com cura de 28 dias). Como ilustram as Figuras C1 a C24.

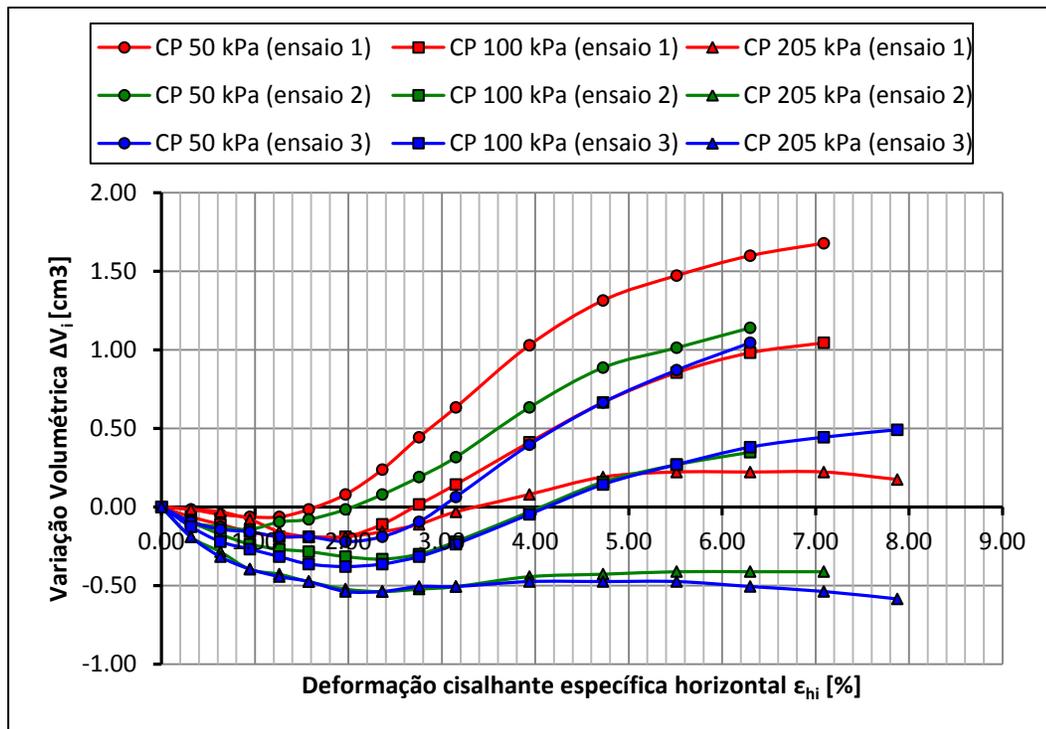


Figura C1 – Variação volumétrica vs. Deformação específica horizontal das misturas do solo arenoso com 0% de fibra - ensaio de CDUO

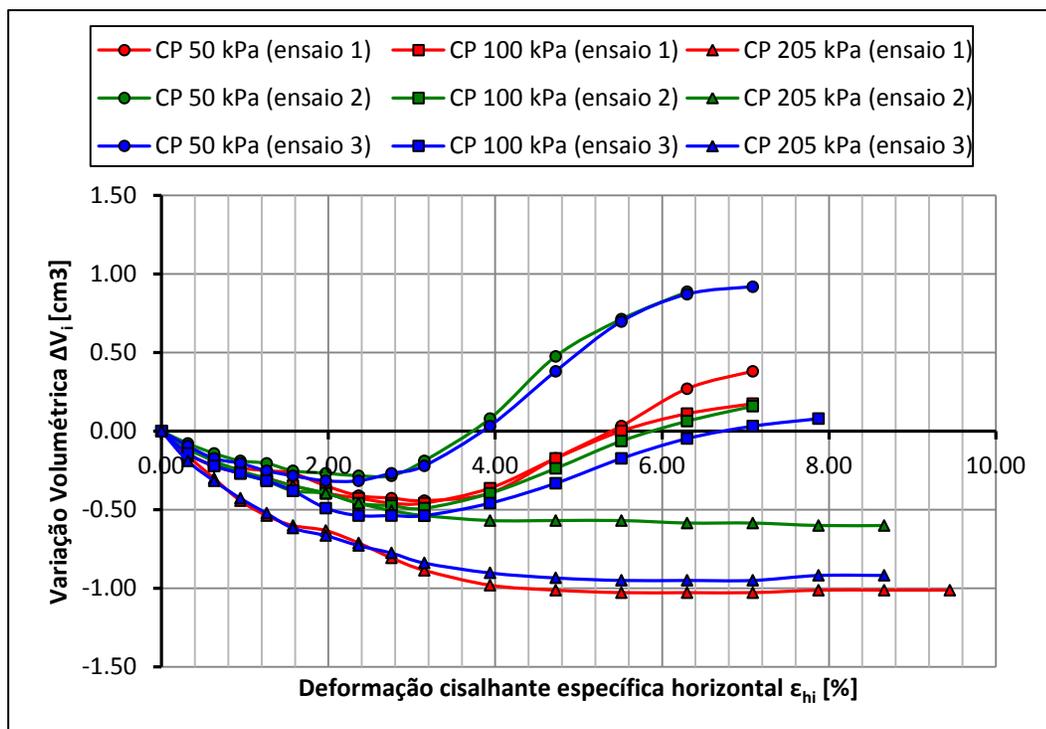


Figura C2 – Variação volumétrica vs. Deformação específica horizontal das misturas do solo arenoso com 5% de fibra - ensaio de CDUO

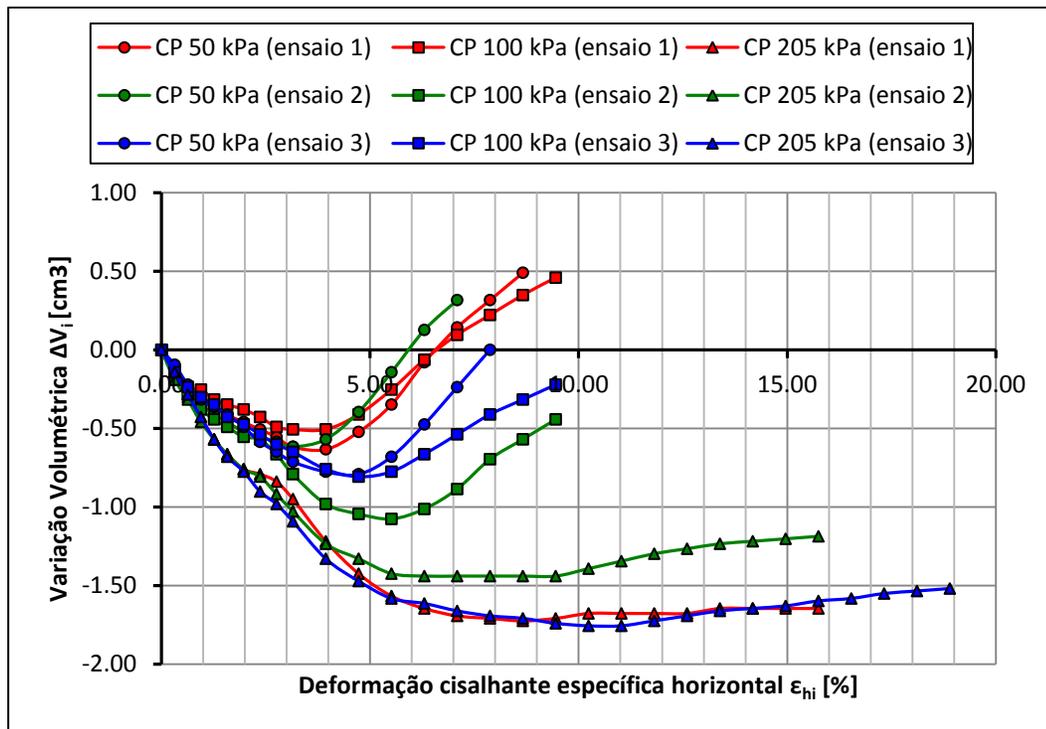


Figura C3 – Variação volumétrica vs. Deformação específica horizontal das misturas do solo arenoso com 10% de fibra - ensaio de CDUO

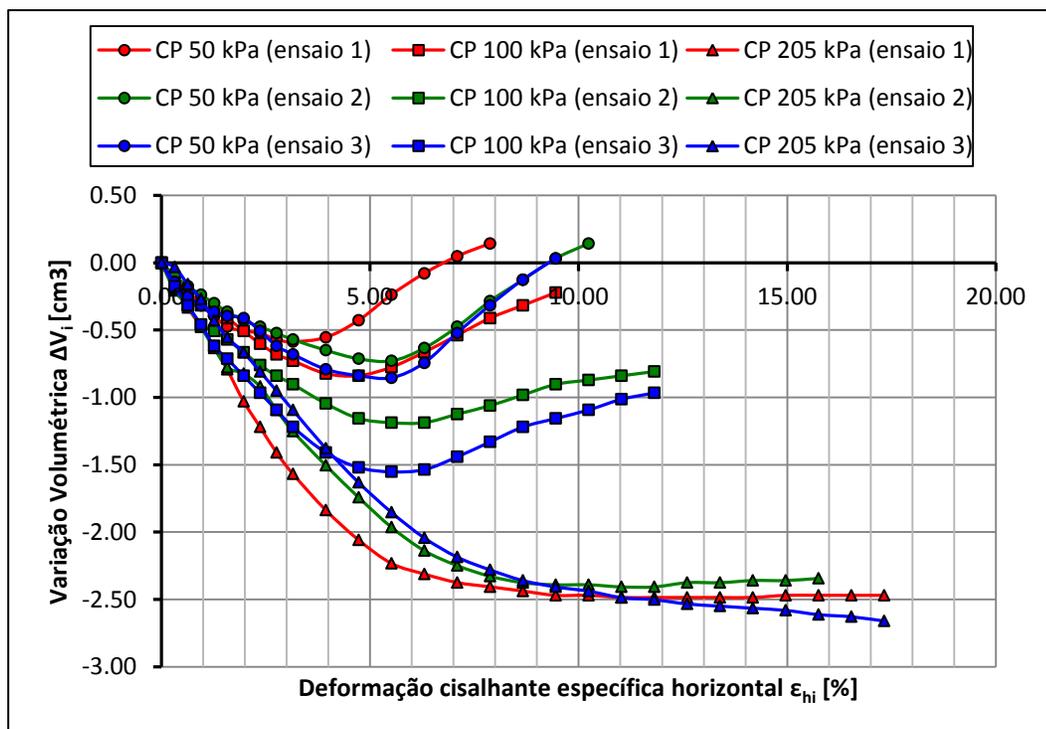


Figura C4 – Variação volumétrica vs. Deformação específica horizontal das misturas do solo arenoso com 15% de fibra - ensaio de CDUO

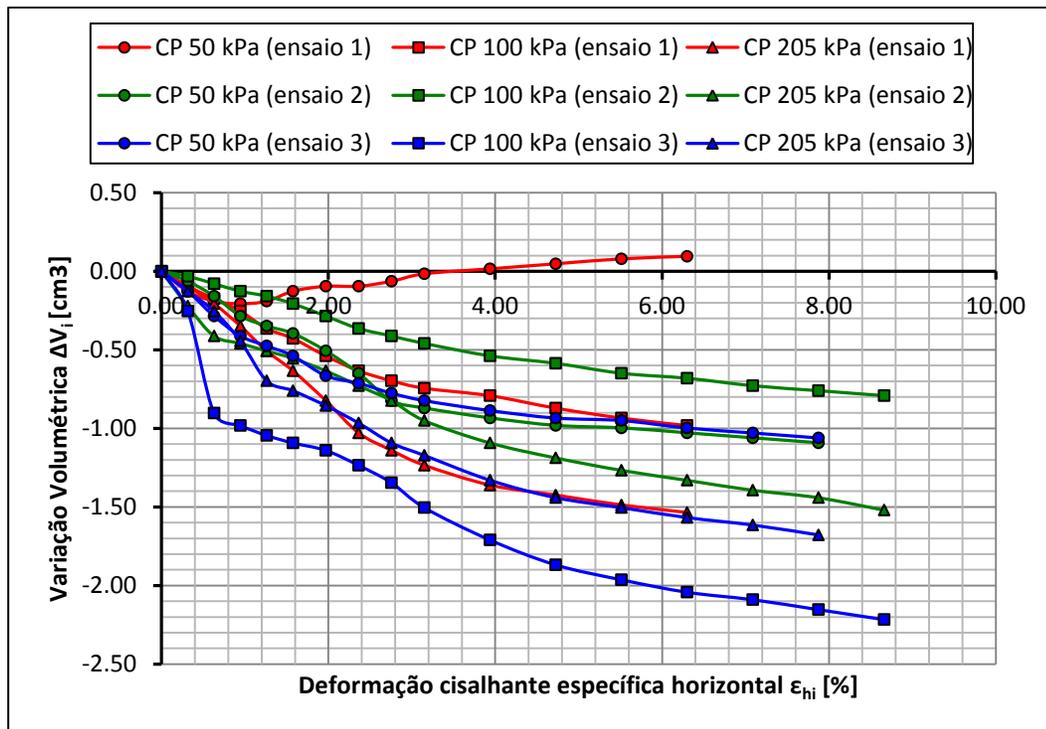


Figura C5 – Variação volumétrica vs. Deformação específica horizontal das misturas do solo arenoso com 0% de fibra - ensaio de CDI

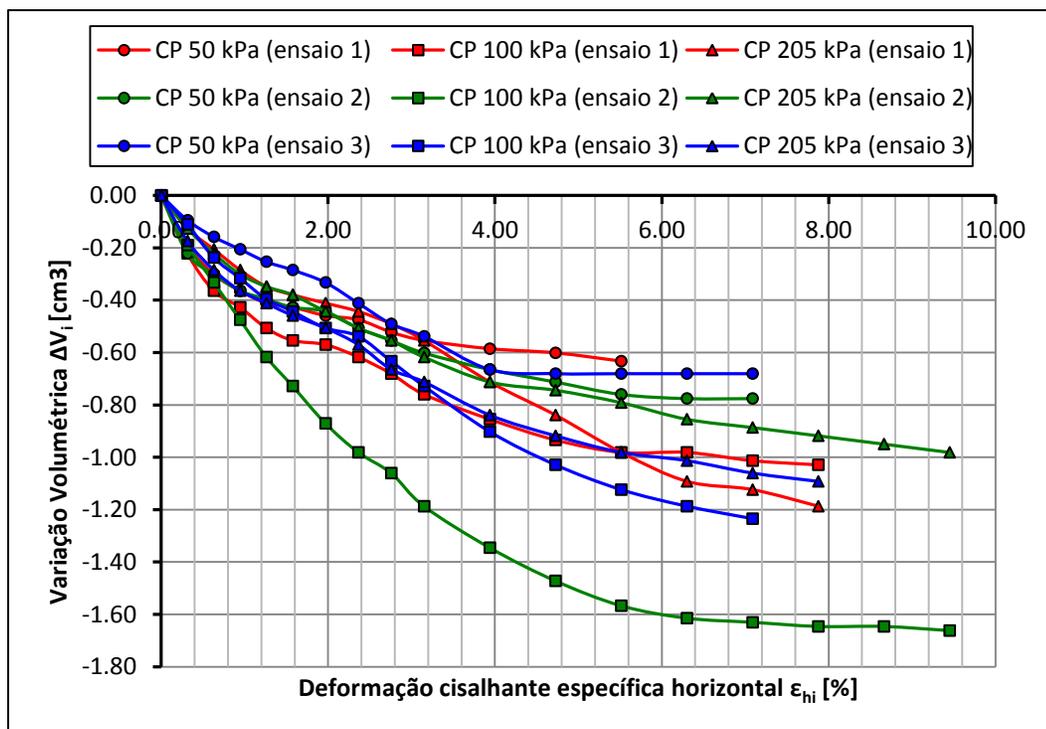


Figura C6 – Variação volumétrica vs. Deformação específica horizontal das misturas do solo arenoso com 5% de fibra - ensaio de CDI

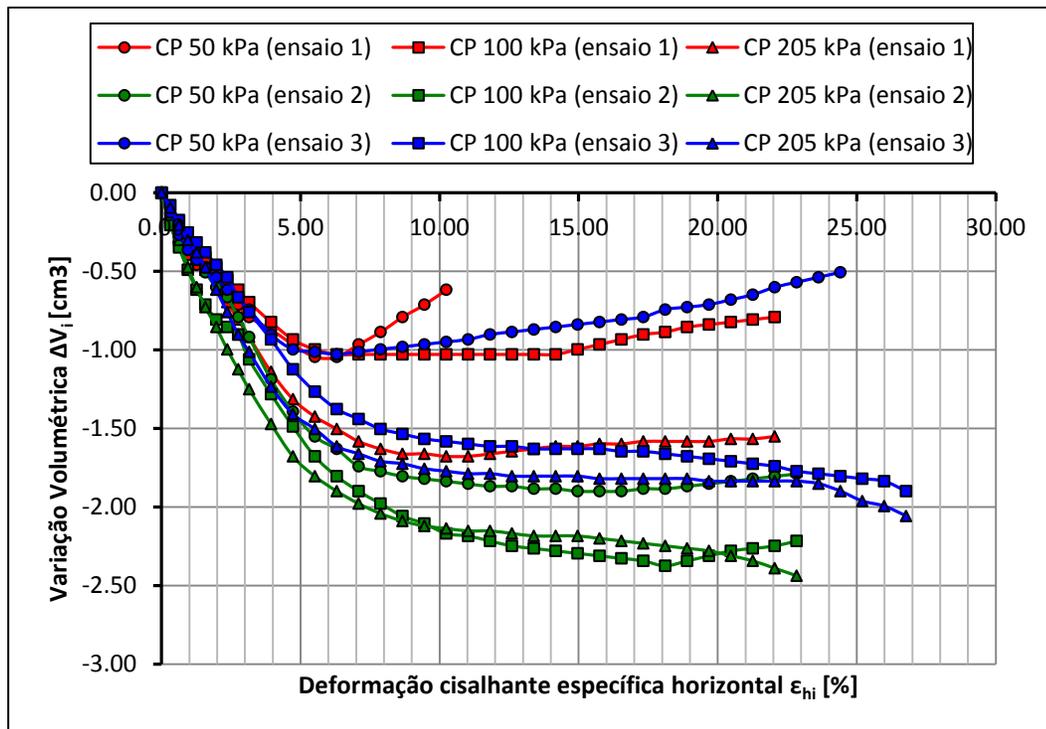


Figura C7 – Variação volumétrica vs. Deformação específica horizontal das misturas do solo arenoso com 10% de fibra - ensaio de CDI

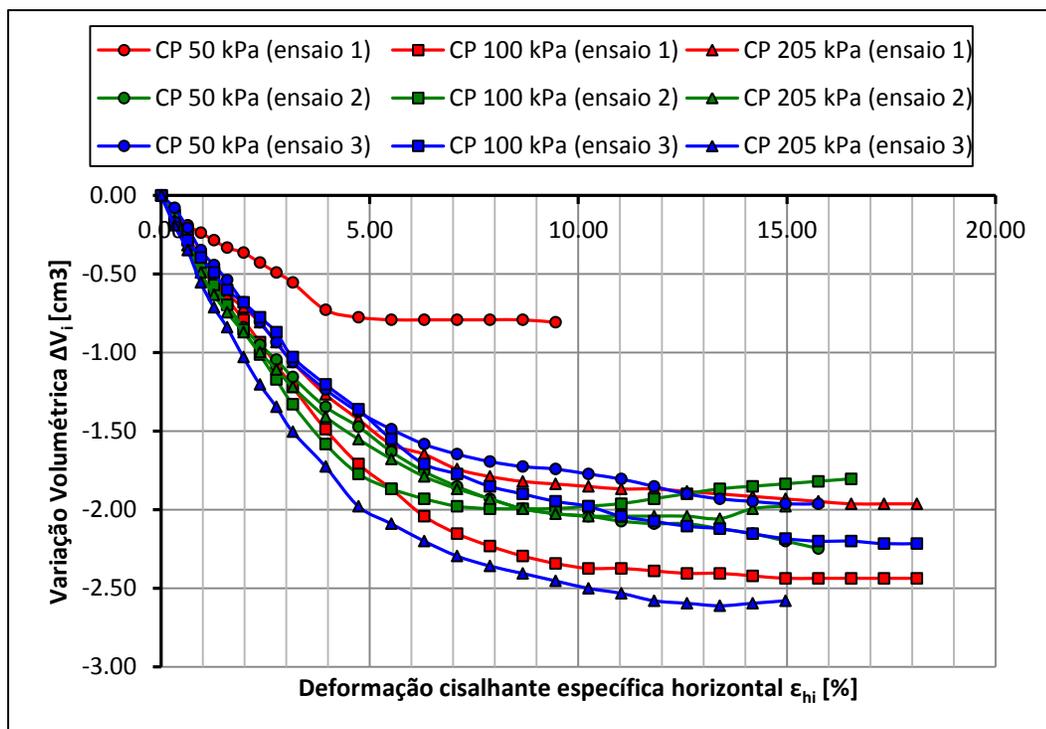


Figura C8 – Variação volumétrica vs. Deformação específica horizontal das misturas do solo arenoso com 15% de fibra - ensaio de CDI

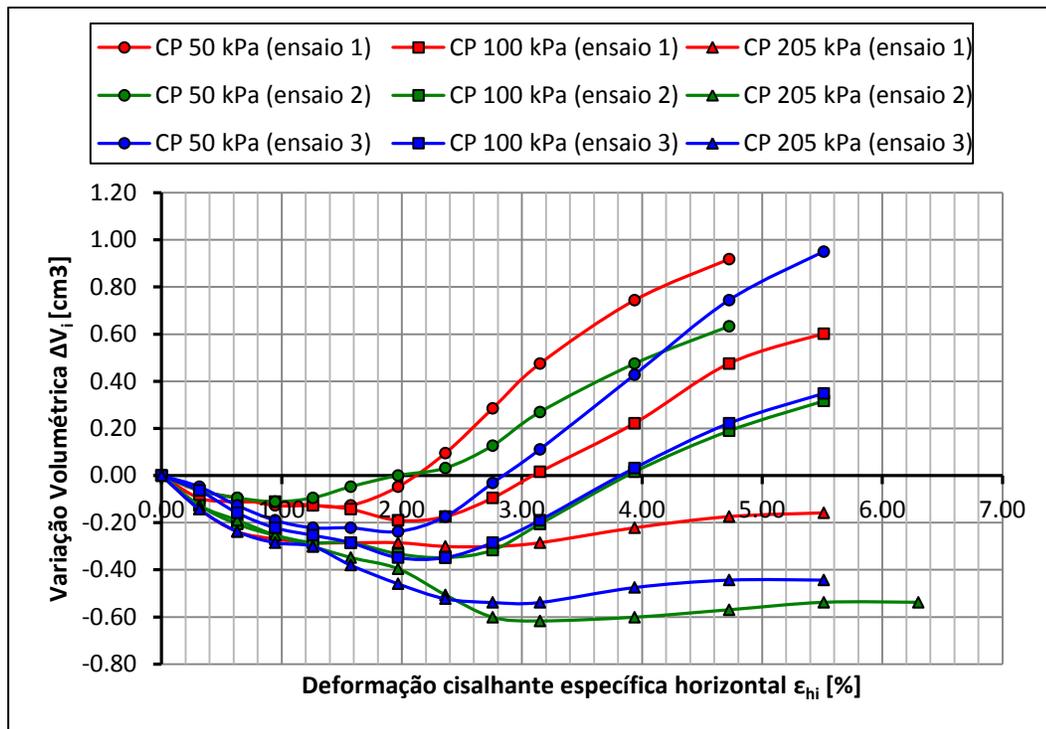


Figura C9 – Variação volumétrica vs. Deformação específica horizontal das misturas do solo arenoso com 0% de fibra - ensaio de CD28

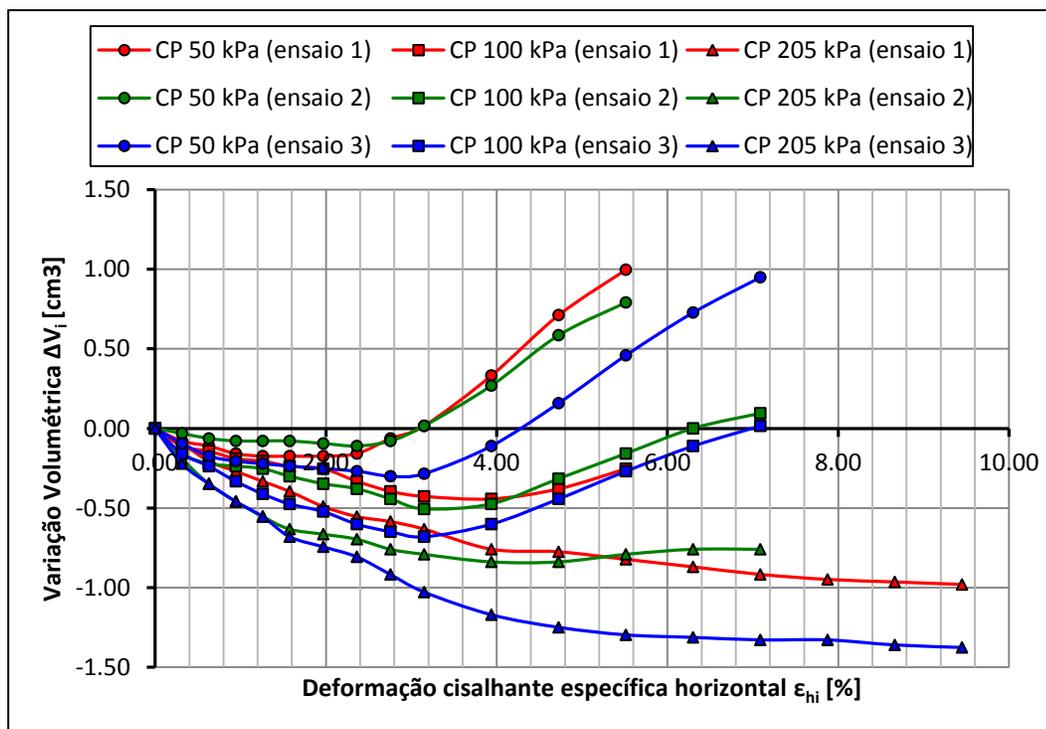


Figura C10 – Variação volumétrica vs. Deformação específica horizontal das misturas do solo arenoso com 5% de fibra - ensaio de CD28

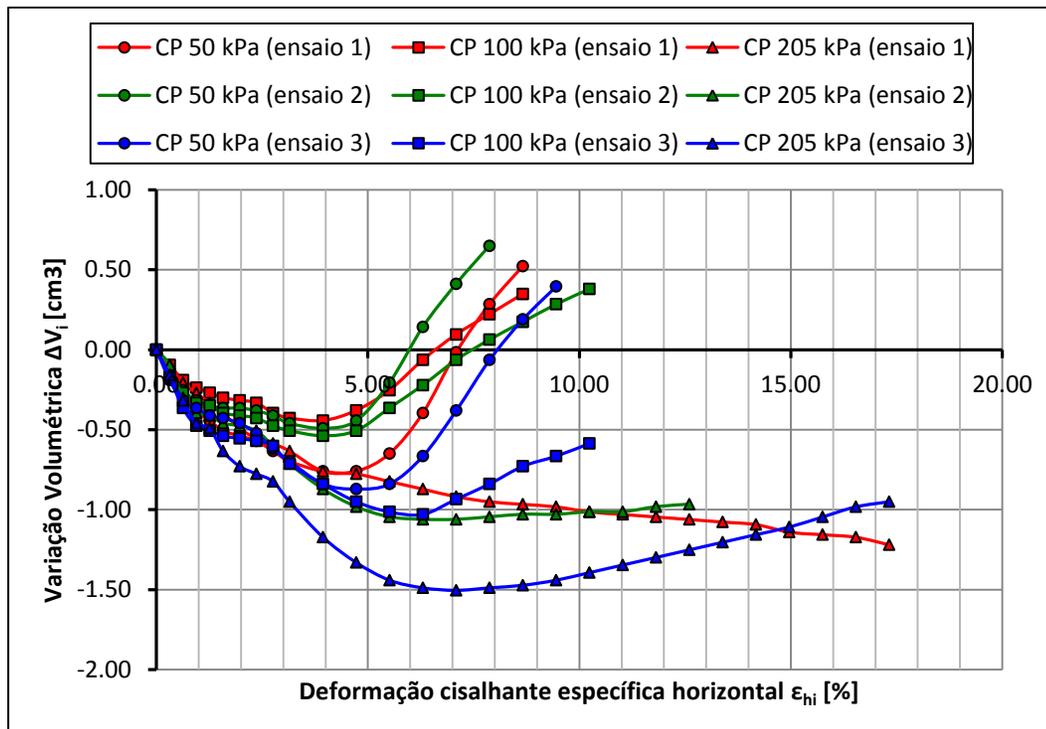


Figura C11 – Variação volumétrica vs. Deformação específica horizontal das misturas do solo arenoso com 10% de fibra - ensaio de CD28

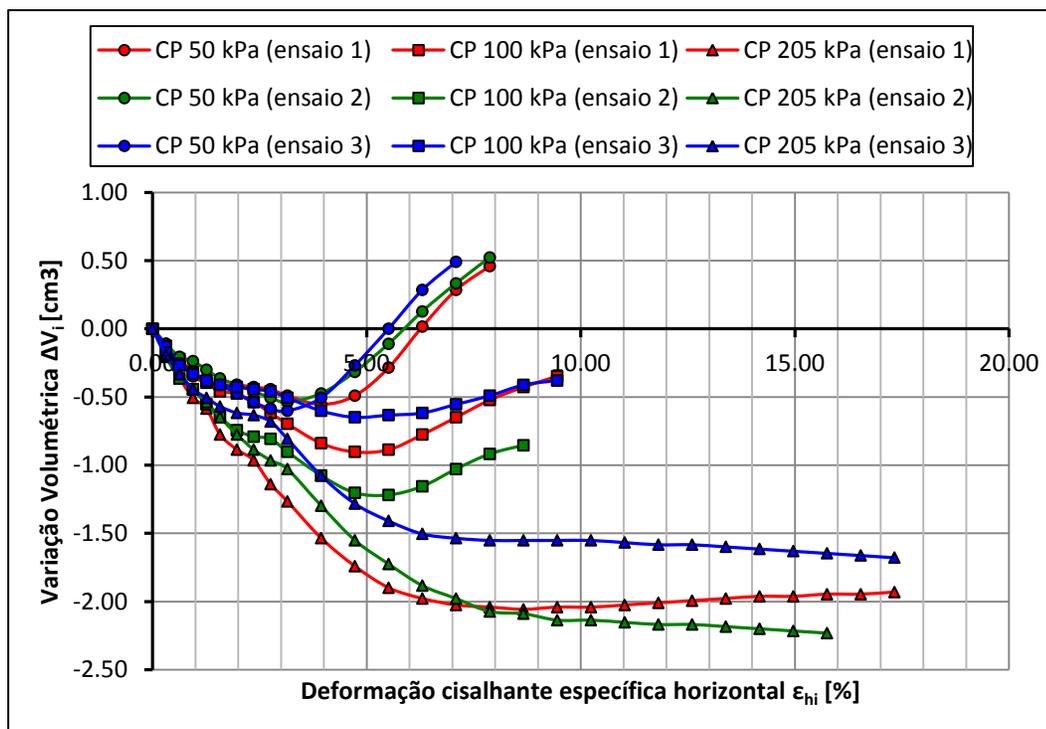


Figura C12 – Variação volumétrica vs. Deformação específica horizontal das misturas do solo arenoso com 15% de fibra - ensaio de CD28

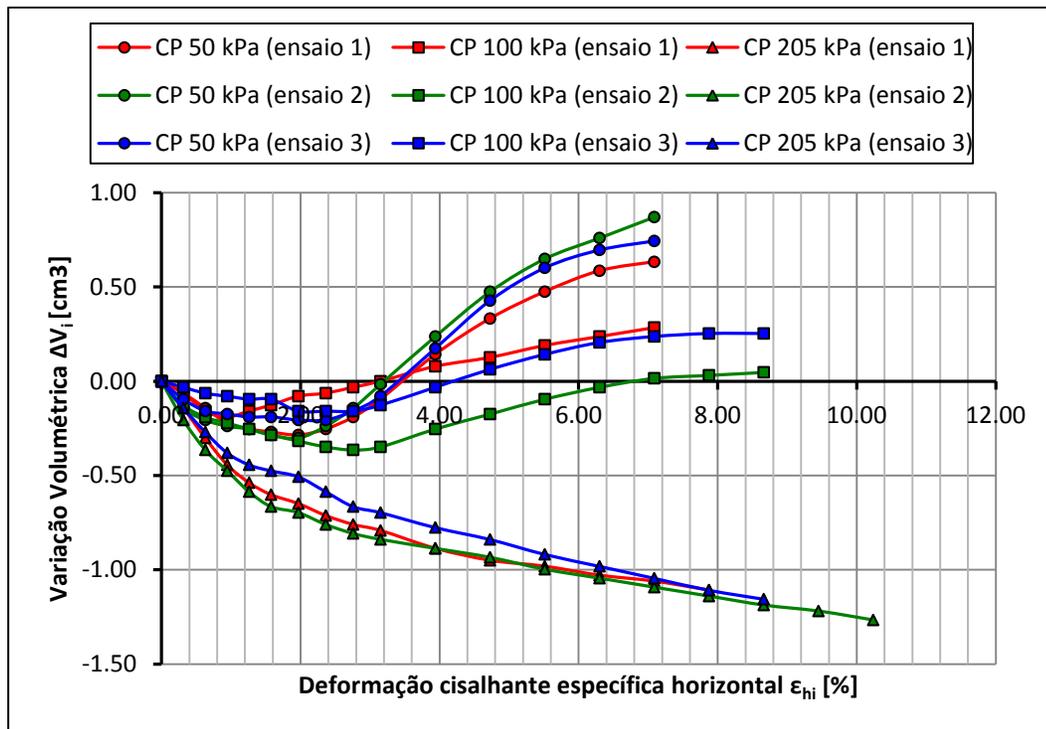


Figura C13 – Variação volumétrica vs. Deformação específica horizontal das misturas do solo argiloso com 0% de fibra - ensaio de CDUO

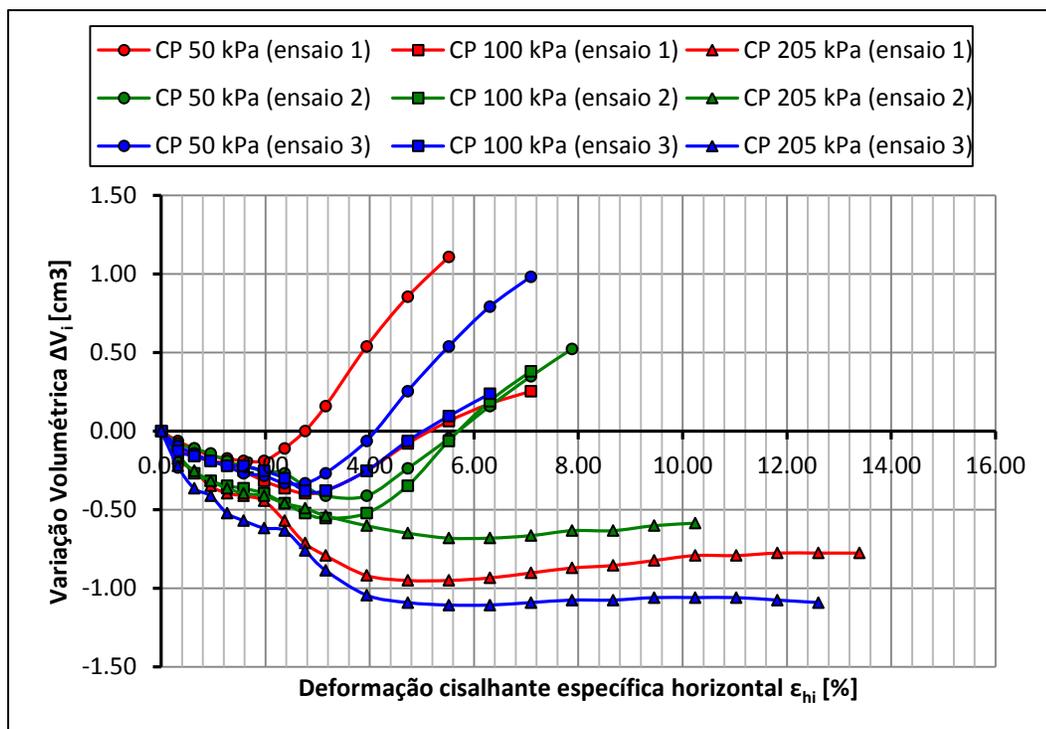


Figura C14 – Variação volumétrica vs. Deformação específica horizontal das misturas do solo argiloso com 5% de fibra - ensaio de CDUO

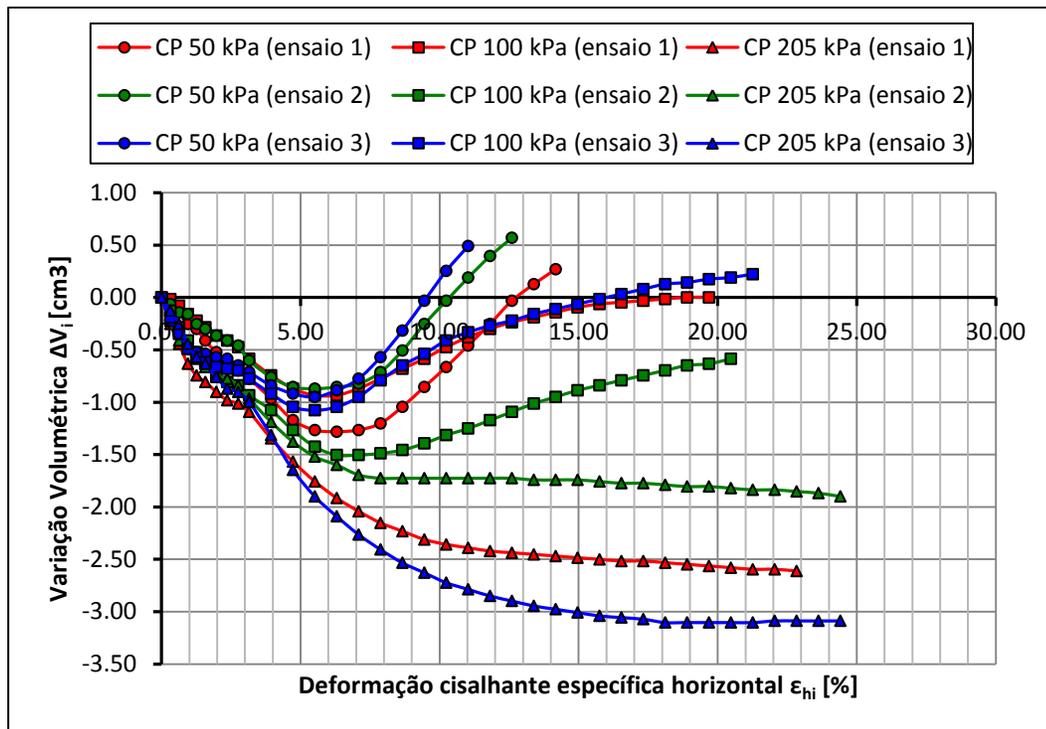


Figura C15 – Variação volumétrica vs. Deformação específica horizontal das misturas do solo argiloso com 10% de fibra - ensaio de CDUO

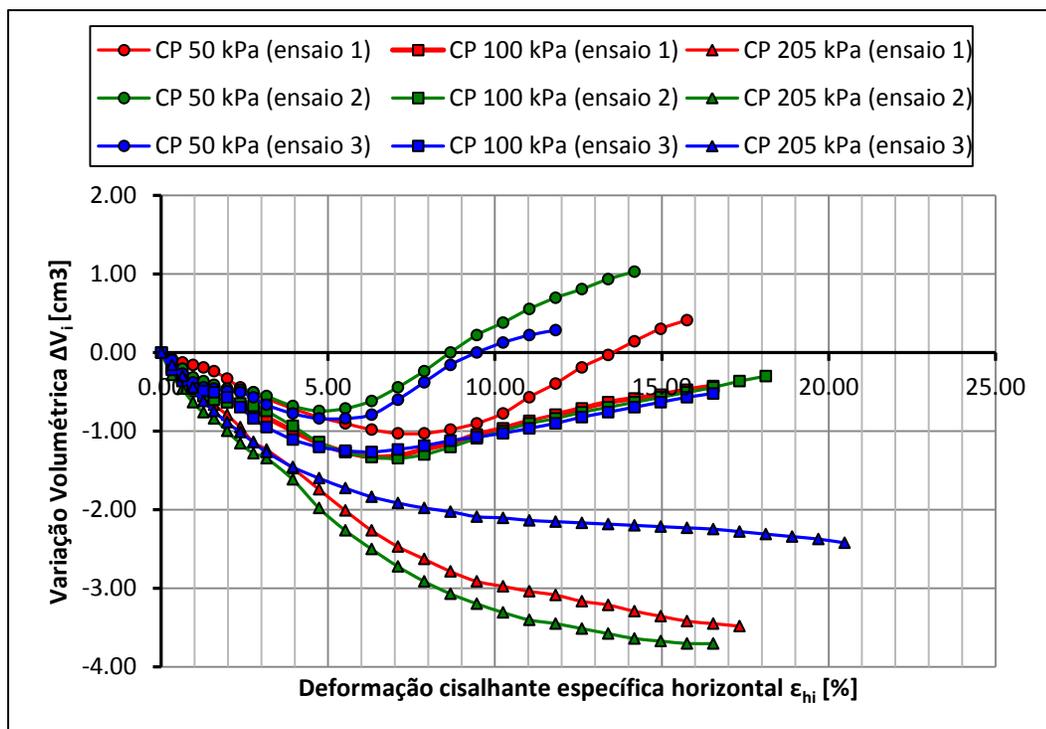


Figura C16 – Variação volumétrica vs. Deformação específica horizontal das misturas do solo argiloso com 15% de fibra - ensaio de CDUO

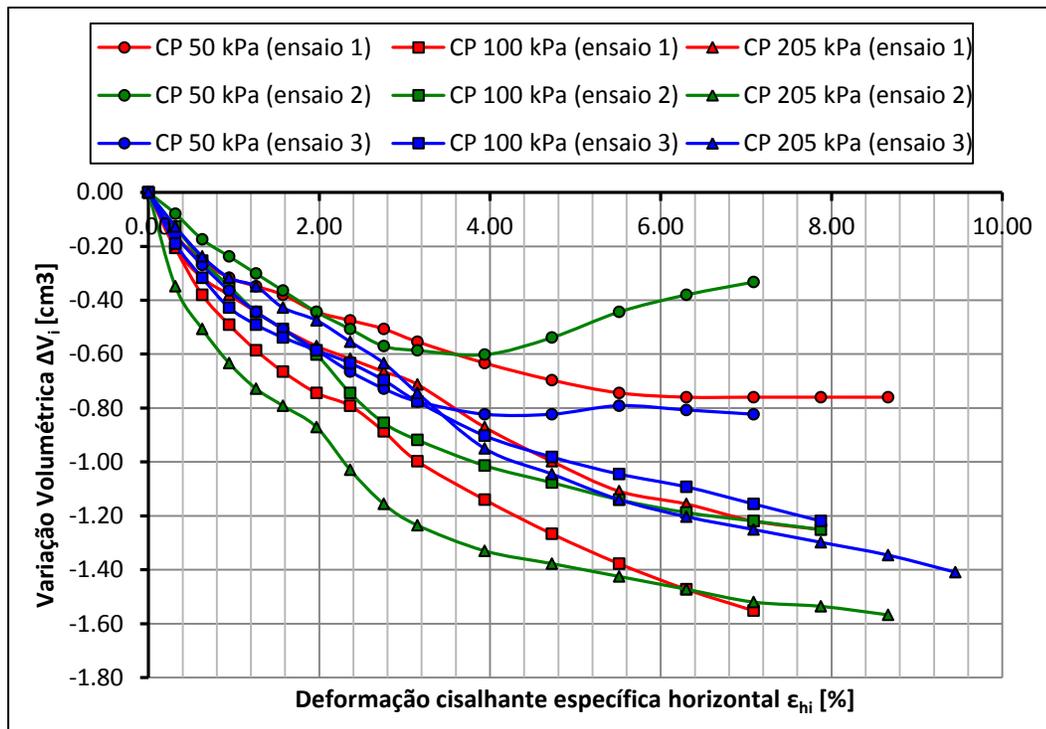


Figura C17 – Variação volumétrica vs. Deformação específica horizontal das misturas do solo argiloso com 0% de fibra - ensaio de CDI

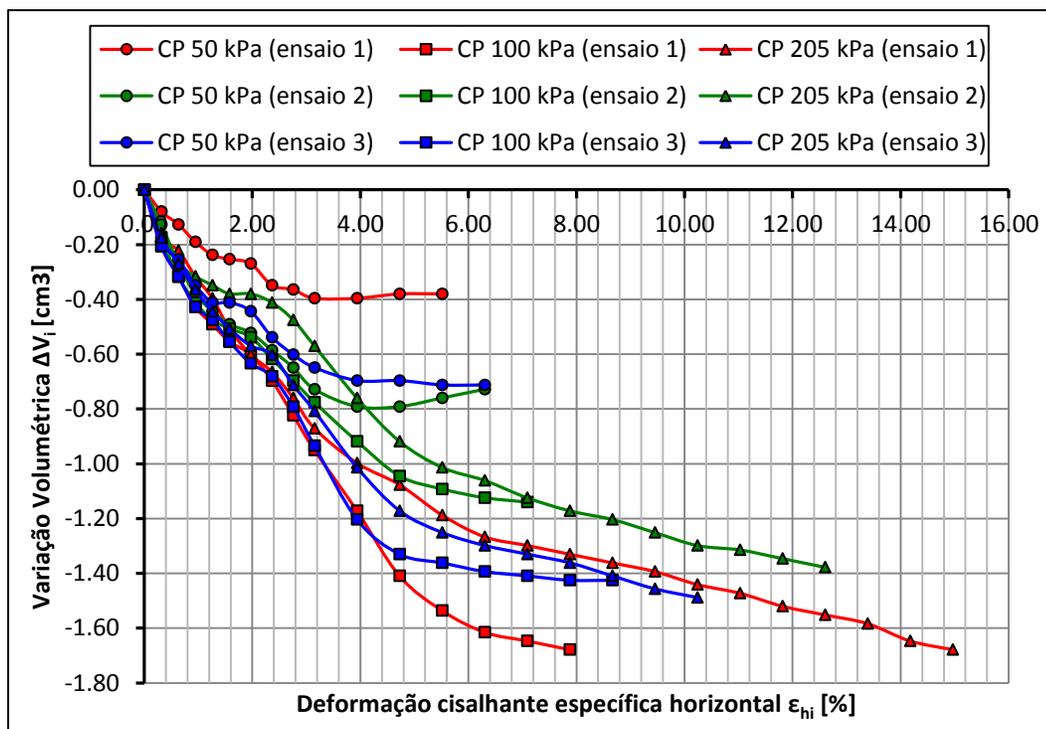


Figura C18 – Variação volumétrica vs. Deformação específica horizontal das misturas do solo argiloso com 5% de fibra - ensaio de CDI

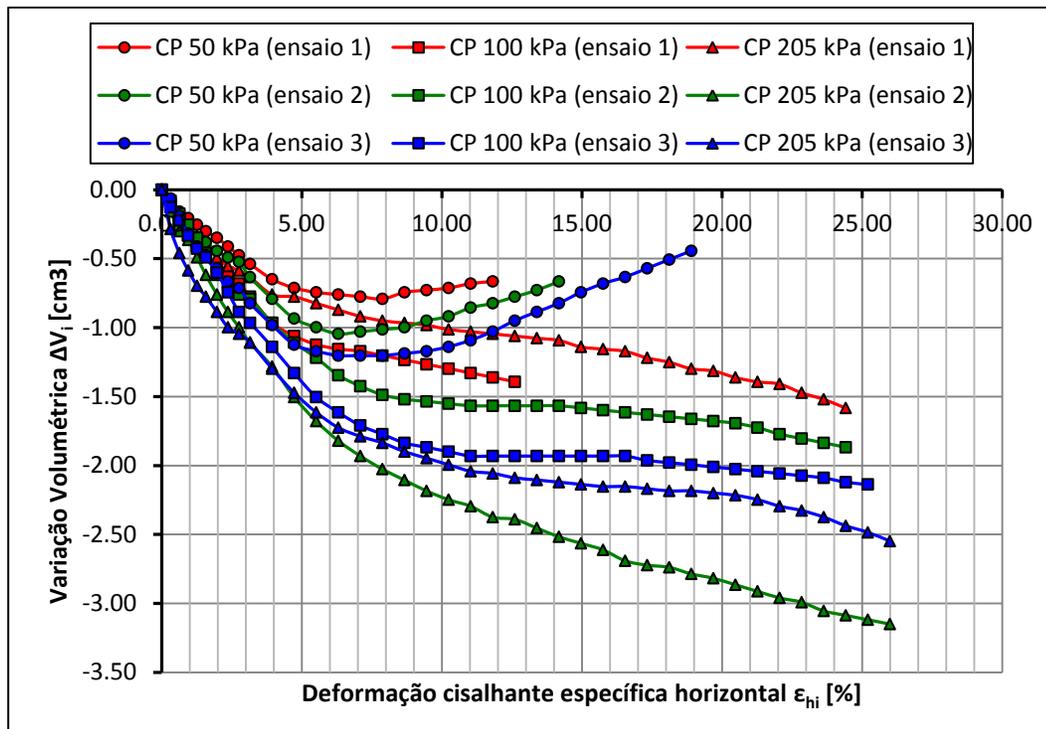


Figura C19 – Variação volumétrica vs. Deformação específica horizontal das misturas do solo argiloso com 10% de fibra - ensaio de CDI

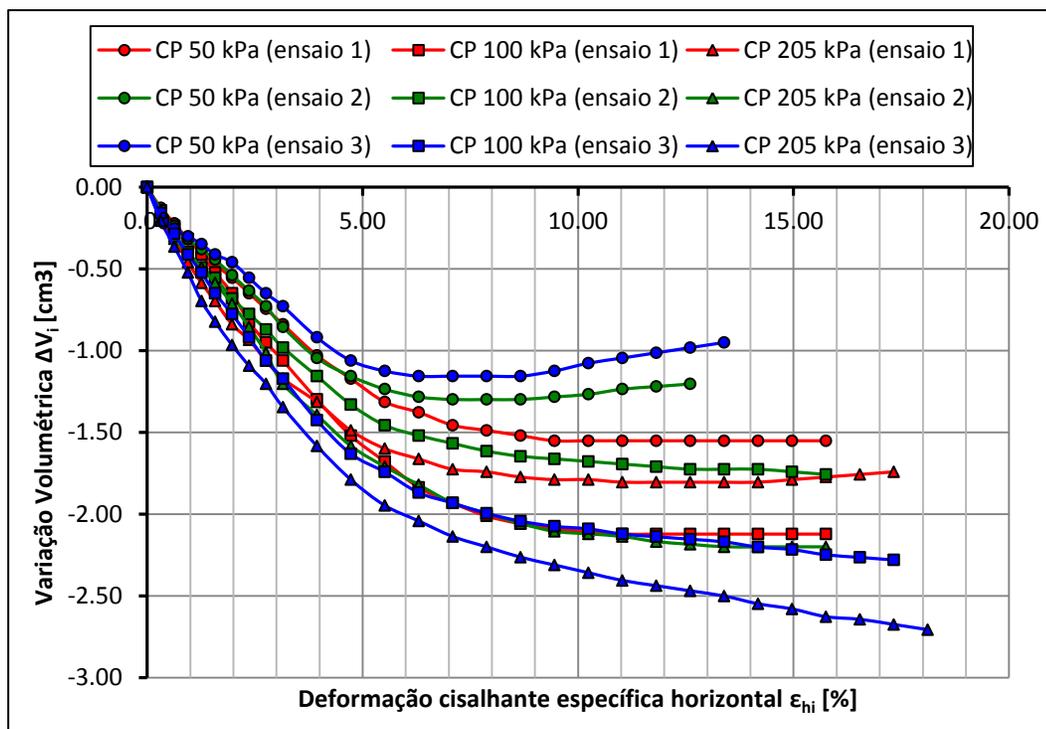


Figura C20 – Variação volumétrica vs. Deformação específica horizontal das misturas do solo argiloso com 15% de fibra - ensaio de CDI

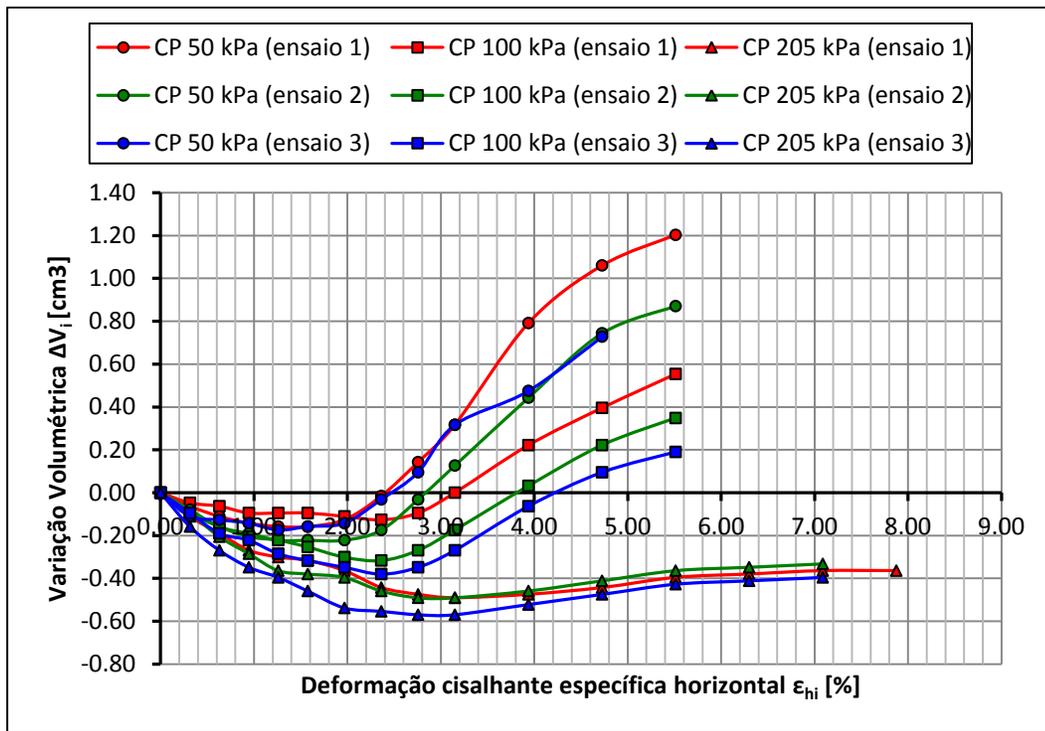


Figura C21 – Variação volumétrica vs. Deformação específica horizontal das misturas do solo argiloso com 0% de fibra - ensaio de CD28

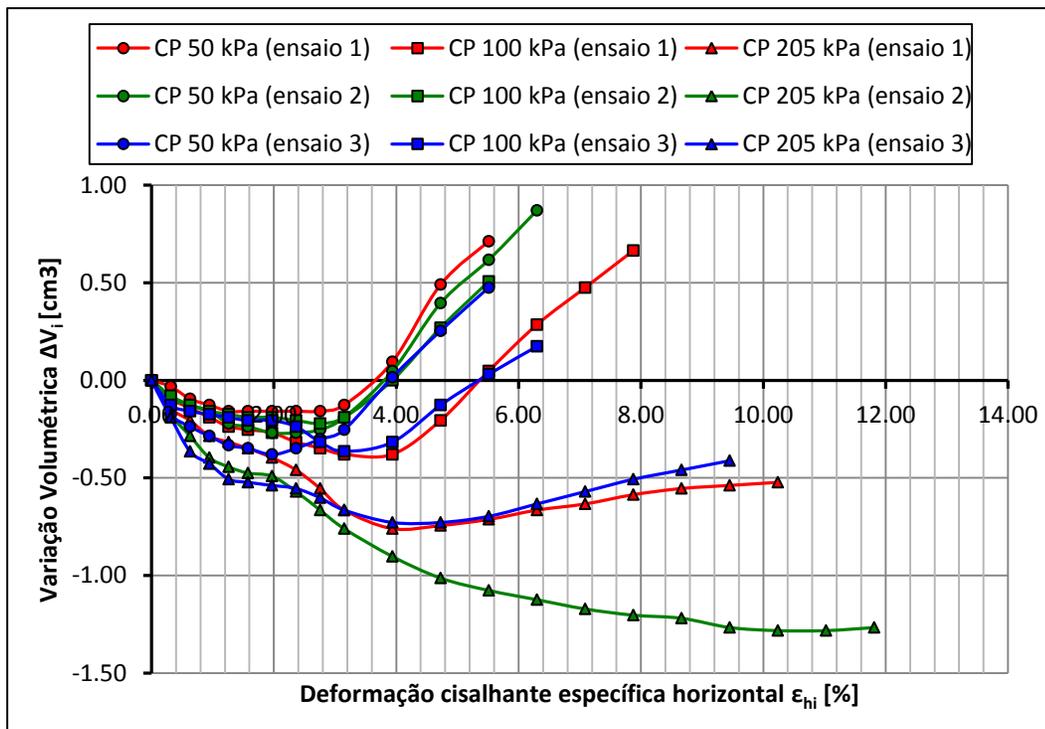


Figura C22 – Variação volumétrica vs. Deformação específica horizontal das misturas do solo argiloso com 5% de fibra - ensaio de CD28

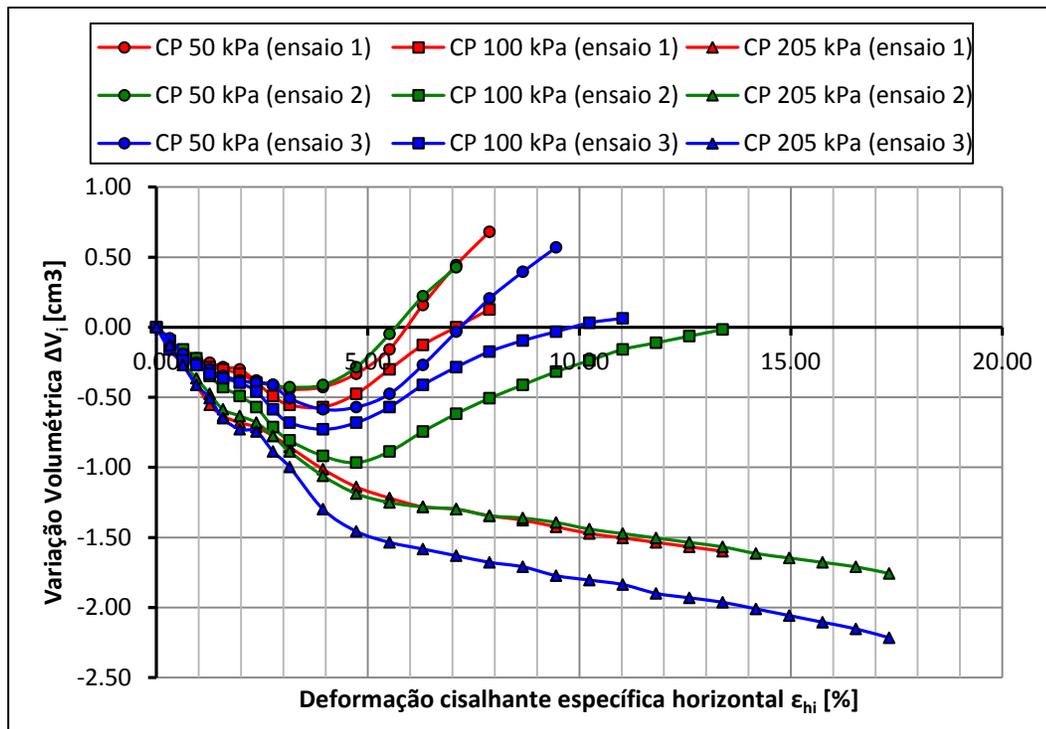


Figura C23 – Variação volumétrica vs. Deformação específica horizontal das misturas do solo argiloso com 10% de fibra - ensaio de CD28

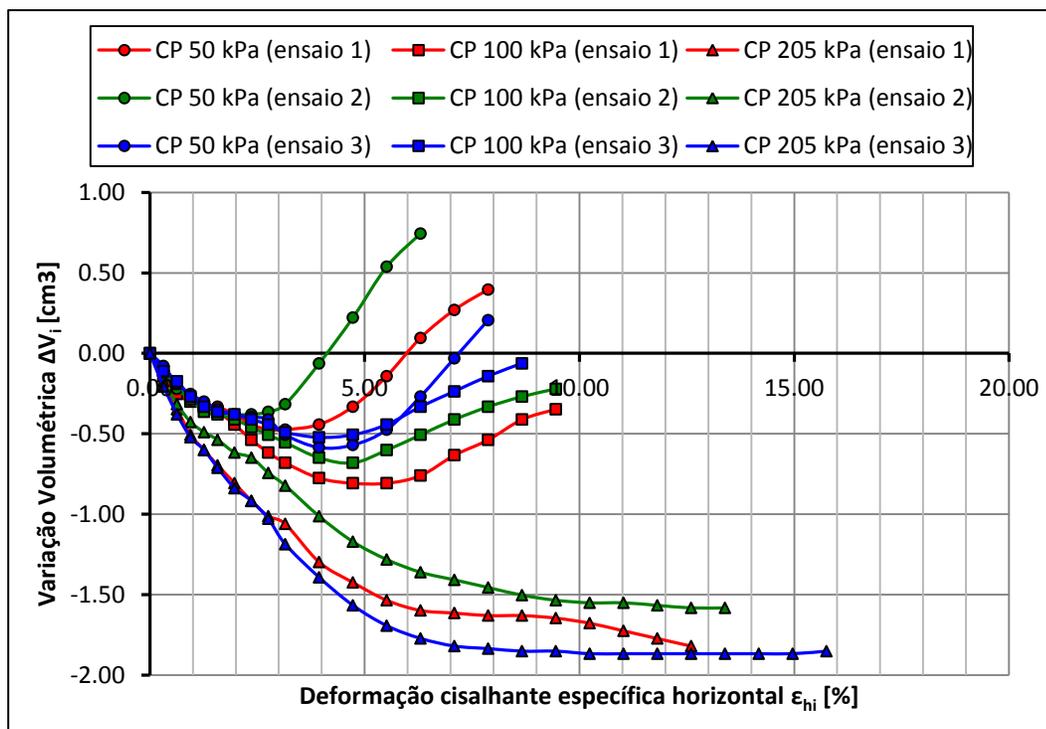


Figura C24 – Variação volumétrica vs. Deformação específica horizontal das misturas do solo argiloso com 15% de fibra - ensaio de CD28