**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA**

FELIPE DE CAMPOS LOCH

**ESTUDO INTEGRADO DO COMPORTAMENTO DE MISTURAS DE
SOLO ARENOSO, ARGILA E CIMENTO PARA APLICAÇÃO EM
BARREIRAS DE PROTEÇÃO AMBIENTAL**

São Carlos,
2019

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA**

**ESTUDO INTEGRADO DO COMPORTAMENTO DE MISTURAS DE
SOLO ARENOSO, ARGILA E CIMENTO PARA APLICAÇÃO EM
BARREIRAS DE PROTEÇÃO AMBIENTAL**

Tese de Doutorado apresentada a Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo – USP – como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Ciências, Programa de Pós Graduação em Geotecnia.

ORIENTADOR: Prof. Dr.Osni José Pejon

São Carlos,

2019

Versão Corrigida – Original se encontra disponível na Unidade que aloja o Programa

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

Loch, Felipe de Campos
L812e Estudo Integrado do Comportamento de Misturas de Solo Arenoso, Argila e Cimento para Aplicação em Barreiras de Proteção Ambiental / Felipe de Campos Loch; orientador Osni Jose Pejon. São Carlos, 2019.

Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação e Área de Concentração em Geotecnia -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2019.

1. barreiras de proteção ambiental. 2. solo-cimento-argila. 3. aterro sanitário. 4. planejamento fatorial. 5. estabilização química. 6. retenção de contaminantes. 7. condutividade hidráulica. 8. parâmetros de resistência. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **FELIPE DE CAMPOS LOCH**.

Título da Tese: "Estudo integrado do comportamento de misturas de solo arenoso, argila e cimento para aplicação em barreiras de proteção ambiental".

Data da defesa: 28/01/2019.

Comissão Julgadora:

Prof. Titular **Osni José Pejon**
Orientador
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Profa. Associada **Valéria Guimarães Silvestre Rodrigues**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Prof. Dr. **José Augusto de Lollo**
(Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"/UNESP – Ilha Solteira)

Profa. Titular **Maria Eugenia Gimenez Boscov**
(Escola Politécnica/EP-USP)

Prof. Dr. **Cezar Augusto Burkert Bastos**
(Universidade Federal do Rio Grande/FURG)

Resultado:

Aprovado

Aprovado

APROVADO

Aprovado

Aprovado

Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia:
Profa. Associada **Valéria Guimarães Silvestre Rodrigues**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Associado **Luís Fernando Costa Alberto**

AGRADECIMENTOS

Meus sinceros agradecimentos às instituições e a todas as pessoas que contribuíram para o andamento deste trabalho.

Agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e Universidade de São Paulo (USP) pelo financiamento da pesquisa.

Ao meu professor orientador Dr. Osni José Pejon pela orientação conferida a esta pesquisa. A todos os professores e funcionários do departamento de Geotecnia pelos ensinamentos, apoio e amizades desenvolvidas nesses anos.

Agradecimento especial aos amigos Vanessa Almeida e Gian Franco, que me acompanharam todos esses anos na pós-graduação. Sou muito grato pela companhia, ajuda e presença desde o início do mestrado.

A Iviny Barros, amiga e companheira de laboratório, que participou ativamente nesta pesquisa. Sua ajuda foi fundamental para este trabalho.

Aos alunos de iniciação científica André Nagem, Ricardo, Felipe Baldisseri, Kaique, Lincoln e Caio, que contribuíram muito para o andamento desta pesquisa. Foi muito bom trabalhar com vocês.

Ao Giovane, que esteve presente e me acompanhou nesses anos de doutorado. Admiro muito o modo que se dedica aos seus projetos.

Aos meus pais, Tania Regina e Paulino, que sempre me incentivaram e apoiaram. Acima de tudo agradeço por me guiarem na minha formação como indivíduo.

Sou muito grato a todos que cruzaram o meu caminho nesses anos de pesquisa e de certo modo mudaram quem eu sou hoje.

LOCH, F. C. **Estudo Integrado do Comportamento de Misturas de Solo Arenoso, Argila e Cimento para Aplicação em Barreiras de Proteção Ambiental**, 2019. Tese (Doutorado em Geotecnia), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2019. 400p.

RESUMO

Este trabalho realizou o estudo do comportamento de misturas de solo arenoso e argila, estabilizado quimicamente com cimento, para aplicação em barreiras de proteção ambiental. A proposta essencial foi a utilização de um solo arenoso, proveniente da Formação Botucatu, presente em vastas áreas do território brasileiro e através de um processo de alteração, torná-lo apto à utilização em barreiras de proteção ambiental. O projeto e análise de experimentos foram realizados através da técnica de planejamento fatorial 2^3 composto. Foram consideradas três variáveis independentes: teor de umidade (w), porcentagem de cimento (C) e quantidade de argila (A), variando em dois níveis cada. Foi utilizado cimento Portland CP II-Z 32 e argila bentonita sódica comercial. Foram avaliados os comportamentos de fluxo e transporte de água e contaminante (KCl), realizados através de ensaios de percolação em coluna e com permeâmetros de parede rígida com carga constante e ensaios de equilíbrio em lote. Foram avaliados os parâmetros de resistência do solo com os ensaios de resistência à compressão simples (RCS) e cisalhamento direto (CD). Também foram avaliados os comportamentos de expansão e contração das misturas. Foram realizados ensaios de porosimetria por intrusão de mercúrio para verificar a alteração microestrutural das misturas. Após realização dos ensaios, as análises estatísticas permitiram avaliar os efeitos das variáveis independentes sobre as propriedades das misturas. Os fatores w , C e A se mostraram adequados para descrever o comportamento das propriedades avaliadas das misturas. Os parâmetros de fluxo e transporte se mostraram adequados para a finalidade do material. As misturas solo-cimento-argila apresentaram ganho elevado de resistência e comportamento mais estável frente a contração quando comparadas as misturas solo-argila. Foi empregado o método de superfície de respostas para interpretar o comportamento e identificar a tendência de alteração das propriedades. Com o procedimento proposto foi possível avaliar a influência dos fatores e descrever as alterações causadas pelas misturas com cimento e argila.

Palavras chave: barreiras de proteção ambiental, aterro sanitário, solo-cimento-argila, planejamento fatorial.

LOCH, F. C. **Integrated Study of the Behaviour of Sandy Soil, Cement and Clay Mixtures Applied for Environmental Protection Barriers**, 2019. Dissertation, School of Engineering of São Carlos, University of São Paulo, 2019. 400p.

ABSTRACT

In this research the behavior of sandy soil and clay mixtures, chemically stabilized with cement, for application in environmental protection barriers was determined. The essential proposal was to use of a sandy soil, from Botucatu Formation, present in vast areas of the Brazilian territory and through an alteration process, make it suitable for use in environmental protection barriers. The design and analysis of experiments were performed using the 2^3 factorial composite technique. Three independent variables were considered: moisture content (w), percentage of cement (C) and amount of clay (A), varying in two levels each. Portland cement CP II-Z 32 and commercial sodium bentonite clay were used. Flow and transport behavior of water and contaminant (KCl) were evaluated through column percolation tests and with rigid wall permeameters with constant load and batch equilibrium tests. The soil resistance parameters were tested with the simple compression strength (RCS) and direct shear test (CD). The expansion and contraction behavior of the mixtures were also evaluated. Mercury intrusion porosimetry tests were performed to verify the microstructural alteration of the mixtures. After the statistical analysis, it was possible to evaluate the effects of the independent variables on the properties of the mixtures. The moisture, cement and clay contents were adequate to describe the behavior of the evaluated properties of the mixtures. The flow and transport parameters were adequate for the purpose of the material. The soil-cement-clay mixtures presented a high gain of resistance and a more stable behavior against contraction when compared to soil-clay mixtures. The response surface method was used to interpret the behavior and to identify the tendency of the properties. With the proposed procedure it was possible to evaluate the influence of the factors and to describe the changes caused by the mixtures with cement and clay.

Key words: environmental protection barriers, landfill, soil-cement-clay, factorial design.

LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1 – Valores típicos de condutividade hidráulica em relação aos tipos de solo.	52
Tabela 2-2 – Parâmetros que podem ser determinados a partir do ensaio de percolação em coluna.	66
Tabela 2-3 - Pesquisas na área de fluxo de contaminantes em barreiras.	76
Tabela 2-4 - Pesquisas sobre parâmetros mecânicos para barreiras de proteção. ..	77
Tabela 2-5 - Arranjo geral do projeto fatorial com dois fatores.	81
Tabela 2-6 - Análise de variância para o projeto fatorial de dois fatores.	83
Tabela 3-1 – Resumo da linearização das equações das isotermas de sorção.	105
Tabela 3-2 - Classificação do potencial de expansão usando o IE.....	110
Tabela 3-3 - Classificação do potencial de expansão usando o LL e IP.....	110
Tabela 4-1 – Porcentagens das frações granulométricas do solo.	113
Tabela 4-2 – Porcentagem das frações granulométricas da bentonita.	114
Tabela 4-3 – Índices físicos e limites de consistência do solo.	114
Tabela 4-4 – Massa específica dos sólidos e limites de consistência da bentonita.	115
Tabela 4-5 – Valores de CTC , SE , V_b e A_{cb}	116
Tabela 4-6 – pH do solo da Formação Botucatu.	116
Tabela 5-1 – Valores da massa específica aparente seca e teor de umidade ótima para cada mistura SCA.	120
Tabela 5-2 - Valores da massa específica aparente seca e teor de umidade ótima para cada mistura SC e SA.	122
Tabela 5-3 - Valores da massa específica dos sólidos para cada mistura SCA.	122
Tabela 5-4 - Valores da massa específica dos sólidos para cada mistura SC e SA.	122
Tabela 5-5 – Traços das misturas solo-cimento-argila (SCA).....	123
Tabela 5-6 - Traços das misturas solo-cimento (SC) com Fatorial 3^2	124
Tabela 5-7 - Traços das misturas solo-cimento (SC) com Fatorial 2^2 composto.	124
Tabela 5-8 - Traços das misturas solo-argila (SA) com Fatorial 3^2	125
Tabela 5-9 - Traços das misturas solo-argila (SA) com Fatorial 2^2 composto.	125

Tabela 5-10 – Limites de Consistência das misturas SCA.....	126
Tabela 6-1 - Composições das misturas e resultados de condutividade hidráulica.....	133
Tabela 6-2 - Análise de variância do K para as misturas SCA.....	133
Tabela 6-3 - Composições das misturas SCA, resultados de K e transformação $\ln(K)$	135
Tabela 6-4 - Análise de variância do $\ln(K)$ para as misturas SCA.....	136
Tabela 6-5 - Composições das misturas SC (Fatorial 3^2) e resultados de K	140
Tabela 6-6 - Análise de variância do K para as misturas SC (Fatorial 3^2).	141
Tabela 6-7 - Composições das misturas SA (Fatorial 3^2), resultados de K	144
Tabela 6-8 - Análise de variância do K para as misturas SA (Fatorial 3^2).	144
Tabela 6-9 - Resultados do ajuste das isothermas lineares para as misturas SCA.	148
Tabela 6-10 - Análise de variância do resultado do R_d para as misturas SCA (isothermas lineares).	148
Tabela 6-11 - Resultados do ajuste das isothermas pelo modelo de Freundlich para as misturas SCA.....	150
Tabela 6-12 - Análise de variância do resultado do R_d para as misturas SCA (modelo de Freundlich).....	151
Tabela 6-13 - Resultados do ajuste das isothermas pelo modelo de Langmuir para as misturas SCA.....	153
Tabela 6-14 - Resultados de condutividade hidráulica para percolação com água e com solução de KCl (0,023 M).....	155
Tabela 6-15 - Análise de variância do $\ln(K)_{KCl}$ para as misturas SCA.	155
Tabela 6-16 - Resultados do ensaio de percolação em coluna das misturas SCA para potássio.	159
Tabela 6-17 - Análise de variância de $\ln(R_d)$ para as misturas SCA (solução de van Genuchten, 1980).	160
Tabela 6-18 - Resultados do ensaio de percolação em coluna das misturas SCA para cloro.	164
Tabela 6-19 - Composições das misturas SCA e resultados de CTC.	165
Tabela 6-20 - Análise de variância da CTC para as misturas SCA.	166
Tabela 6-21 - Composições das misturas SC (Fatorial 3^2) e resultados de CTC. ...	169
Tabela 6-22 - Análise de variância da CTC para as misturas SC (Fatorial 3^2).	169

Tabela 6-23 - Composições das misturas SC (Fatorial 2 ² composto) e resultados de CTC.	171
Tabela 6-24 - Composições das misturas SA (Fatorial 3 ²) e resultados de CTC....	171
Tabela 6-25 - Análise de variância da CTC para as misturas AS (Fatorial 3 ²).....	172
Tabela 6-26 - Composições das misturas SA (Fatorial 2 ² composto) e resultados de CTC.	173
Tabela 6-27 - Análise de variância da CTC para as misturas AS (Fatorial 3 ²).....	174
Tabela 7-1 - Composições das misturas SCA e resultados de RC7.....	179
Tabela 7-2 - Análise de variância da <i>RC7</i> para as misturas SCA.....	180
Tabela 7-3 - Composições das misturas e resultados de RC28.	184
Tabela 7-4 - Análise de variância da <i>RC28</i> para as misturas SCA.....	185
Tabela 7-5 - Composições das misturas e resultados de RC7 sem imersão.	188
Tabela 7-6 - Análise de variância da <i>RC7</i> sem imersão para as misturas SCA.	189
Tabela 7-7 - Composições das misturas e resultados de RC28 sem imersão.	193
Tabela 7-8 - Análise de variância da <i>RC28</i> sem imersão para as misturas SCA....	193
Tabela 7-9 - Composições das misturas SC (Fatorial 3 ²) e resultados de RC7.	197
Tabela 7-10 - Análise de variância da <i>RC7</i> para as misturas SC (Fatorial 3 ²).....	198
Tabela 7-11 - Composições das misturas SC (Fatorial 3 ²) e resultados de RC28 _{sc}	199
Tabela 7-12 - Análise de variância da <i>RC28</i> para as misturas SC (Fatorial 3 ²).....	199
Tabela 7-13 - Composições das misturas SC (Fatorial 2 ² composto) e resultados de RC7.....	201
Tabela 7-14 - Análise de variância da <i>RC7</i> para as misturas SC (Fatorial 2 ² composto).	201
Tabela 7-15 - Composições das misturas SC (Fatorial 2 ² composto) e resultados de RC28.....	203
Tabela 7-16 - Análise de variância da <i>RC28</i> para as misturas SC (Fatorial 2 ² composto).	203
Tabela 7-17 - Composições das misturas SA (Fatorial 3 ²) e resultados de RC.	205
Tabela 7-18 – Análise de variância dos valores de RC das misturas solo-argila.	205

Tabela 7-19 - Composições das misturas SCA e resultados do ensaio de cisalhamento direto após 7 dias de cura.	209
Tabela 7-20 - Análise de variância da coesão para as misturas SCA, após 7 dias de cura (Fatorial 2^3 com ponto central).	211
Tabela 7-21 - Composições das misturas SCA e resultados do ensaio de cisalhamento direto após 28 dias de cura.....	213
Tabela 7-22 - Análise de variância da coesão para as misturas SCA, após 28 dias de cura.	214
Tabela 7-23 - Análise de variância do ângulo de atrito para as misturas SCA, após 28 dias de cura.....	214
Tabela 7-24 - Análise de variância da tensão cisalhante máxima para as misturas SCA, após 7 dias de cura (Fatorial 2^4 composto).....	219
Tabela 7-25 - Composições das misturas SC e resultados do ensaio de cisalhamento direto, após 7 dias de cura.	221
Tabela 7-26 - Análise de variância dos dados de coesão para as misturas SC, após 7 dias de cura (Fatorial 3^2).....	221
Tabela 7-27 - Análise de variância dos dados de ângulo de atrito para as misturas SC, após 7 dias de cura (Fatorial 3^2).	222
Tabela 7-28 - Composições das misturas SC e resultados do ensaio de cisalhamento direto, após 28 dias de cura.....	224
Tabela 7-29 - Análise de variância dos dados de coesão para as misturas SC, após 28 dias de cura (Fatorial 3^2).....	224
Tabela 7-30 - Análise de variância dos dados de ângulo de atrito para as misturas SC, após 28 dias de cura (Fatorial 3^2).	225
Tabela 7-31 - Composições das misturas SCA e resultados do ensaio de cisalhamento direto.	227
Tabela 7-32 - Análise de variância da coesão para as misturas SA (Fatorial 3^2). ...	227
Tabela 7-33 - Análise de variância do ângulo de atrito para as misturas SA (Fatorial 3^2).....	228
Tabela 8-1 - Resultados de expansão das misturas solo-cimento-argila.	233
Tabela 8-2 - Análise de variância do $\ln(IE^2)$ para as misturas SCA.	236
Tabela 8-3 – Valores observados, previstos e resíduos de IE.	239
Tabela 8-4 - Resultados de expansão das misturas solo-cimento.	240

Tabela 8-5 - Composições das misturas SA (Fatorial 3 ²) e resultados de IE.....	241
Tabela 8-6 - Análise de variância do IE para as misturas SA (Fatorial 3 ²).....	241
Tabela 8-7 – Potencial de expansão das misturas solo-cimento-argila.	243
Tabela 8-8 – Potencial de expansão das misturas solo-argila.....	244
Tabela 8-9 - Resultados de contração das misturas solo-cimento-argila.....	245
Tabela 8-10 - Análise de variância da CO para as misturas SCA.	247
Tabela 8-11 - Resultados de contração das misturas solo-cimento.....	250
Tabela 8-12 - Análise de variância da CO para as misturas SC, para 7 dias de cura (Fatorial 3 ²).	250
Tabela 8-13 - Análise de variância da CO para as misturas SC, para 28 dias de cura (Fatorial 3 ²).	251
Tabela 8-14 - Composições das misturas SA (Fatorial 3 ²) e resultados de CO.	253
Tabela 8-15 - Análise de variância do CO para as misturas SA (Fatorial 3 ²).....	254
Tabela 9-1 - Comparação da porosidade e volume de vazios obtidos por IF e PIM para as misturas SCA.	268
Tabela 9-2 - Comparação da porosidade e volume de vazios obtidos por IF e PIM para as misturas SC.....	268
Tabela 9-3 - Comparação da porosidade e volume de vazios obtidos por IF e PIM para as misturas SA.	269
Tabela 9-4 - Porcentagem de distribuição dos poros, para as misturas SCA.	270
Tabela 9-5 - Porcentagem de distribuição dos poros, para as misturas SC.	270
Tabela 9-6 - Porcentagem de distribuição dos poros, para as misturas SA.....	270

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1 - Seção esquemática das barreiras de proteção: (A) Superior e (B) Inferior de um aterro sanitário.....	46
Figura 2-2 - Variação da estrutura do solo em função da energia de compactação e teor de umidade	48
Figura 2-3 - Resultados de condutividade hidráulica para diferentes energias de compactação.	50
Figura 2-4 - (A) Curvas de Compactação para diferentes energias; (B) Condutividade Hidráulica vs. Teor de Umidade.	51
Figura 2-5 – (A) Zona admissível em termos de teor de umidade (w_{ot}), massa específica seca (ρ_d) e condutividade hidráulica (K); (B) Zona admissível considerando outros fatores.	52
Figura 2-6 - Condutividade Hidráulica versus: (A) Porcentagem de pedregulho; (B) Porcentagem de areia; (C) Porcentagem de finos; (D) Porcentagem de argila.	53
Figura 2-7 – Categorias e subgrupos de isotermas.	61
Figura 2-8 – Determinação do fator de retardamento R_d	65
Figura 2-9 - Método de planejamento dos expetimentos.	78
Figura 2-10 - Representação espacial dos ensaios de um planejamento fatorial 2^3 simples (a) e composto com adição de pontos axiais e central (b).	79
Figura 2-11 - Representação espacial dos ensaios de um planejamento fatorial 3^2 (a) e. 3^3 (b).....	80
Figura 2-12 – Padrões de comportamento para gráficos de resíduos: (a) satisfatório; (b) funil; (c) arco duplo; (d) não linear. O eixo horizontal pode ser o tempo, y_i , y_i ou x_i	86
Figura 3-1 – Mapa de materiais inconsolidados da cidade de São Carlos e Localização do ponto de coleta.	88
Figura 3-2 – Local de coleta das amostras de solo da Fm. Botucatu.	90
Figura 3-3 - Vista Geral dos Equipamentos de Percolação: (a) Equipamentos novos; (b) Equipamento de Loch (2013); (c) Reservatório para controle da altura	

da coluna d'água; (d) Coluna sobre a bancada principal; (1) Reservatórios afluentes; (2) Bancada Principal; (3) Provetas para coleta de efluente; (4) Bancada Inferior e (5) Colunas de percolação.	93
Figura 3-4 - Sistema de alimentação e distribuição do fluido: (1) Duto de Alimentação; (2) Reservatório intermediário e (3) Tubo de distribuição.....	94
Figura 3-5 - Peças da coluna de percolação: tubo e placas de acrílico com seus tirantes.....	95
Figura 3-6 – Vista Geral dos Equipamentos de Percolação com aplicação de ar pressurizado (a e b): (1) painéis de controle de pressão de ar; (2) sistemas de distribuição e aplicação de ar; (3) reservatórios afluentes com interface de aplicação de pressão; (4) bancadas principais com colunas de percolação; (5) provetas para coleta do afluente e (6) bancadas inferiores.	96
Figura 3-7 – Procedimento de mistura.....	97
Figura 3-8 – Procedimento de compactação e montagem da coluna de percolação: (a) Compactação do corpo de prova; (b) Escarificação da primeira camada; (c) Topo e base da coluna com o-rings na concavidade; (d) Pedras porosas e malhas de nylon; (e) Coluna de percolação montada; (f) Coluna ligada ao sistema.	98
Figura 3-9 – Mangueira flexível ligada a conexão de leitura.	100
Figura 3-10 - Molde utilizado para compactação dos corpos-de-prova de 63x25 mm (a) imagem e (b) esquema das peças: (1) compactador; (2) anel para colocação do material e (3) molde bipartido.....	107
Figura 3-11 – Esquema para compactação: (a) Molde com anel superior e amostra; (b) Molde com anel superior e compactador; (c) Prensa para compactação com conjunto; (1) compactador; (2) anel superior; (3) anel para compactação e (4) base metálica para suporte.	108
Figura 3-12 – (a) Corpo-de-prova do ensaio de expansão; (b) Esquema para realização do ensaio de expansão antes da inundação e (c) Câmara inundada - detalhe da parte superior do esquema de ensaio de expansão, com a ponta do relógio comparador posicionada sobre peça cilíndrica que está apoiada sobre a pequena placa de vidro.....	109

Figura 3-13 – Ensaio de Contração - equipamentos e amostra: (a) compactador; (b) sistema de saturação dos corpos-de-prova; (c) extrator e (d) amostra saturada após extração.	111
Figura 3-14 – Corpos-de-prova preparados para ensaio de contração.	111
Figura 4-1 – Curva granulométrica do solo.	113
Figura 4-2 – Curva granulométrica da bentonita.	114
Figura 4-3 - Curvas de compactação das misturas solo-cimento-argila.....	115
Figura 4-4 – Termograma da amostra de solo da Formação Botucatu (a) e da bentonita (b).....	117
Figura 4-5 – Difrátogramas de Raio-X do solo da Fm. Botucatu (a) e Bentonita (b) para os tratamentos: normal (N), Aquecido a 550°C (H) e Etilenoglicol (E). ..	118
Figura 5-1 - Curvas de compactação das misturas solo-cimento-argila.....	119
Figura 5-2 - Curvas de compactação das misturas solo-cimento.	121
Figura 5-3 - Curvas de compactação das misturas solo-argila	121
Figura 5-4 – Resultados do teor de umidade ótima para misturas SCA.	126
Figura 5-5 - Resultados da massa específica seca máxima para misturas SCA. ...	127
Figura 5-6 – Resultados de w_{ot} (a) e $\rho_{d,m\acute{a}x}$ (b) das misturas de solo-cimento.....	127
Figura 5-7 - Resultados de w_{ot} (a) e $\rho_{d,m\acute{a}x}$ (b) das misturas de solo-argila.	128
Figura 5-8 - Resultados de ρ_s das misturas solo-cimento-argila.	128
Figura 5-9 - Resultados de ρ_s das misturas solo-cimento (a) e solo-argila (b).....	129
Figura 6-1 - Curvas de condutividade hidráulica por tempo (solo natural).	131
Figura 6-2 – Curvas de condutividade hidráulica por tempo (solo-cimento-argila)..	132
Figura 6-3 – Probabilidade Normal dos Resíduos (K).	134
Figura 6-4 – Resíduos versus Valores Previstos (K).	135
Figura 6-5 – Probabilidade Normal dos Resíduos ln (K).....	137
Figura 6-6 – Resíduos versus Valores Previstos ln (K).....	137
Figura 6-7 - Projeção da superfície de resposta de K (m/s) das misturas SCA ($w=9,0\%$).....	138
Figura 6-8 - Projeção da superfície de resposta de K (m/s) das misturas SCA ($w=11,0\%$).....	138
Figura 6-9 - Projeção da superfície de resposta de K (m/s) das misturas SCA ($w=13,0\%$).....	139
Figura 6-10 - Curvas de condutividade hidráulica por tempo (solo-cimento).	140

Figura 6-11 - Projeção da superfície de resposta de K (m/s) das misturas SC (Fatorial 3^2).	142
Figura 6-12 – Probabilidade Normal dos Resíduos (K) das misturas SC (Fatorial 3^2).	142
Figura 6-13 - Resíduos versus Valores Previstos (K) das misturas SC (Fatorial 3^2).	143
Figura 6-14 - Curvas de condutividade hidráulica por tempo (solo-argila).	144
Figura 6-15 - Probabilidade Normal dos Resíduos (K) das misturas SA (Fatorial 3^2).	145
Figura 6-16 - Resíduos versus Valores Previstos (K) das misturas SA (Fatorial 3^2).	146
Figura 6-17 - Projeção da superfície de resposta de K (m/s) das misturas SA (Fatorial 3^2).	146
Figura 6-18 - Projeção da superfície de resposta de $R_{d,lin}$ das misturas SCA, para $w = 11,0\%$.	149
Figura 6-19 - Projeção da superfície de resposta de $R_{d,lin}$ das misturas SCA, para $C = 6,0\%$.	150
Figura 6-20 - Projeção da superfície de resposta de R_{dF} das misturas SCA, para $w = 11,0\%$.	152
Figura 6-21 - Projeção da superfície de resposta de R_{dF} das misturas SCA, para $C = 6,0\%$.	152
Figura 6-22 - Projeção da superfície de resposta de K (m/s) das misturas SCA ($w=9,0\%$), com percolação de KCl.	156
Figura 6-23 - Projeção da superfície de resposta de K (m/s) das misturas SCA ($w=11,0\%$), com percolação de KCl.	157
Figura 6-24 - - Projeção da superfície de resposta de K (m/s) das misturas SCA ($w=13,0\%$), com percolação de KCl.	157
Figura 6-25 - Projeção da superfície de resposta dos valores de R_d das misturas SCA ($w=9,0\%$).	161
Figura 6-26 - Projeção da superfície de resposta dos valores de R_d das misturas SCA ($w=11,0\%$).	162
Figura 6-27 - Projeção da superfície de resposta dos valores de R_d das misturas SCA ($w=13,0\%$).	162

Figura 6-28 - Projeção da superfície de resposta de CTC (meq/100g) das misturas SCA (w=9,0%).....	167
Figura 6-29 - Projeção da superfície de resposta de CTC (meq/100g) das misturas SCA (w=11,0%).....	167
Figura 6-30 - Projeção da superfície de resposta de CTC (meq/100g) das misturas SCA (w=13,0%).....	168
Figura 6-31 - Projeção da superfície de resposta de CTC (meq/100g) das misturas SC (Fatorial 3 ²).....	170
Figura 6-32 - Projeção da superfície de resposta de CTC (meq/100g) das misturas SA (Fatorial 3 ²).....	173
Figura 6-33 - Projeção da superfície de resposta de CTC (meq/100g) das misturas SA (Fatorial 3 ²).....	175
Figura 6-34 - Comparação entre os resultados de CTC vs. $R_{d,linear}$ (a), CTC vs. $R_{d,Freundlich}$ (b) e CTC vs. $R_{d,van Genuchten}$ (c), para w = 11,0%.	177
Figura 6-35 – Condutividade hidráulica das misturas SCA para fluxo com água (linhas cheias) e percolação de solução KCl (linhas pontilhadas), para w = 11,0%.	178
Figura 7-1 – Probabilidade Normal dos Resíduos RC7 com imersão.....	181
Figura 7-2 – Resíduos versus Valores Previstos RC7 com imersão.....	181
Figura 7-3 – Projeção da superfície de resposta da RC7 (kPa) das misturas SCA com imersão (w = 9,0%).	182
Figura 7-4 – Projeção da superfície de resposta da RC7 (kPa) das misturas SCA com imersão (w = 11,0%).	183
Figura 7-5 – Projeção da superfície de resposta da RC7 (kPa) das misturas SCA com imersão (w = 13,0%).	183
Figura 7-6 - Probabilidade Normal dos Resíduos RC28 com imersão.....	185
Figura 7-7 – Resíduos versus Valores Previstos RC28 com imersão.....	186
Figura 7-8 - Projeção da superfície de resposta da RC28 (kPa) das misturas SCA (w = 9,0%).....	186
Figura 7-9 - Projeção da superfície de resposta da RC28 (kPa) das misturas SCA (w = 11,0%).....	187
Figura 7-10 - Projeção da superfície de resposta da RC28 (kPa) das misturas SCA (w = 13,0%).....	187

Figura 7-11 - Probabilidade Normal dos Resíduos RC7 sem imersão.	190
Figura 7-12 – Resíduos versus Valores Previstos RC7 sem imersão.	190
Figura 7-13 - Projeção da superfície de resposta da RC7 (kPa) das misturas SCA sem imersão (w = 9,0%).	191
Figura 7-14 - Projeção da superfície de resposta da RC7 (kPa) das misturas SCA sem imersão (w = 11,0%).	191
Figura 7-15 - Projeção da superfície de resposta da RC7 (kPa) das misturas SCA sem imersão (w = 13,0%).	192
Figura 7-16 - Probabilidade Normal dos Resíduos RC28 sem imersão.	194
Figura 7-17 – Resíduos versus Valores Previstos RC28 sem imersão.	194
Figura 7-18 - Projeção da superfície de resposta da RC28 (kPa) das misturas SCA sem imersão (W = 9,0%).	195
Figura 7-19 - Projeção da superfície de resposta da RC28 (kPa) das misturas SCA sem imersão (W = 11,0%).	195
Figura 7-20 - Projeção da superfície de resposta da RC28 (kPa) das misturas SCA sem imersão (W = 13,0%).	196
Figura 7-21 - Projeção da superfície de resposta da RC7 _{sc} (kPa) das misturas SC (Fatorial 3 ²).	198
Figura 7-22 - Projeção da superfície de resposta da RC28 _{sc} (kPa) das misturas SC (Fatorial 3 ²).	200
Figura 7-23 - Projeção da superfície de resposta da RC7 _{sc} (kPa) das misturas SC (Fatorial 2 ² composto).	202
Figura 7-24 - Projeção da superfície de resposta da RC28 _{sc} (kPa) das misturas SC (Fatorial 2 ² composto).	204
Figura 7-25 - Projeção da superfície de reposta dos valores de RC das misturas solo-argila.	206
Figura 7-26 - Projeção parcial da superfície de reposta dos valores de RC das misturas solo-argila.	207
Figura 7-27 – Projeção da superfície de resposta para os valores de coesão das misturas SCA, após 7 dias de cura, (w = 9,0%), valores em kPa.	212
Figura 7-28 - Projeção da superfície de resposta para os valores de coesão das misturas SCA, após 7 dias de cura, (w = 13,0%), valores em kPa.	212

Figura 7-29 - Projeção da superfície de resposta para os valores de coesão das misturas SCA, após 28 dias de cura, ($w = 9,0\%$), valores em kPa.	215
Figura 7-30 - Projeção da superfície de resposta para os valores de coesão das misturas SCA, após 28 dias de cura, ($w = 11,0\%$), valores em kPa.	215
Figura 7-31 - Projeção da superfície de resposta para os valores de coesão das misturas SCA, após 28 dias de cura, ($w = 13,0\%$), valores em kPa.	216
Figura 7-32 - Projeção da superfície de resposta para os valores de ângulo de atrito das misturas SCA, após 28 dias de cura, ($w = 9,0\%$).	217
Figura 7-33 - Projeção da superfície de resposta para os valores de ângulo de atrito das misturas SCA, após 28 dias de cura, ($w = 11,0\%$).	217
Figura 7-34 - Projeção da superfície de resposta para os valores de ângulo de atrito das misturas SCA, após 28 dias de cura, ($w = 13,0\%$).	218
Figura 7-35 - Projeção da superfície de resposta para os valores de tensão ao cisalhamento máxima das misturas SCA, após 7 dias de cura ($w = 9,0\%$ e tensão normal = 100 kPa), valores em kPa.	220
Figura 7-36 - Projeção da superfície de resposta para os valores de tensão ao cisalhamento máxima das misturas SCA, após 7 dias de cura ($w = 13,0\%$ e tensão normal = 100 kPa), valores em kPa.	220
Figura 7-37 – Projeção da superfície de resposta da coesão para as misturas SC.	223
Figura 7-38 – Projeção da superfície de resposta do ângulo de atrito para as misturas SC.	223
Figura 7-39 – Projeção da superfície de resposta dos dados de coesão (kPa) para as misturas SC, após 28 dias de cura.	226
Figura 7-40 – Projeção da superfície de resposta dos dados de ângulo de atrito para as misturas SC, após 28 dias de cura.	226
Figura 7-41 – Projeção da superfície de resposta dos dados de coesão para as misturas SA.	229
Figura 7-42 – Projeção da superfície de resposta dos dados de ângulo de atrito para as misturas SA.	229
Figura 7-43 - Projeções das superfícies de resposta da tensão cisalhante para $\sigma = 100$ kPa (linhas cheias) e resistência à compressão simples (linhas pontilhadas), para 7 dias de cura, valores em kPa.	231

Figura 8-1 - Análise do efeito do teor de argila sobre o IE nas misturas SCA.....	234
Figura 8-2 - Análise do efeito do teor de cimento nas misturas SCA	235
Figura 8-3 - Análise do efeito do teor de umidade nas misturas SCA	235
Figura 8-4 - Projeção da superfície de resposta do $\ln(IE^2)$, para $w = 9,0\%$	237
Figura 8-5 - Projeção da superfície de resposta do $\ln(IE^2)$, para $w = 11,0\%$	237
Figura 8-6 - Projeção da superfície de resposta do $\ln(IE^2)$, para $w = 13,0\%$	238
Figura 8-7 – Valores previstos vs. observados para o modelo $\ln(IE^2)$ (a) e regressão segmentada (b).....	239
Figura 8-8 – Projeção da superfície de resposta de IE para misturas solo-argila (Fatorial 3^2).	242
Figura 8-9 - Análise do efeito do teor de argila sobre a contração nas misturas SCA.	245
Figura 8-10 - Análise do efeito do teor de cimento sobre a contração nas misturas SCA.	246
Figura 8-11 - Análise do efeito do teor de umidade sobre a contração nas misturas SCA.	246
Figura 8-12 - Projeção da superfície de resposta de CO para $w = 11,0\%$	248
Figura 8-13 - Projeção da superfície de resposta de CO para $A = 6,0\%$	249
Figura 8-14 - Projeção da superfície de resposta de CO para $C = 6,0\%$	249
Figura 8-15 - Projeção da superfície de resposta dos resultados de contração das misturas SC para 7 dias de cura (Fatorial 3^2).	252
Figura 8-16 - Projeção da superfície de resposta dos resultados de contração das misturas SC para 28 dias de cura (Fatorial 3^2).	253
Figura 8-17 - Projeção da superfície de resposta dos resultados de contração das misturas SA (Fatorial 3^2).	255
Figura 8-18 - Resultados de contração das misturas solo-cimento-argila.	256
Figura 8-19 - Resultados de contração das misturas solo-cimento.	257
Figura 8-20 - Resultados de contração das misturas solo-argila.	257
Figura 9-1 - Termograma da amostra de solo sem estabilização.	259
Figura 9-2 – Termogramas das amostras solo-cimento-argila (SCA).	261
Figura 9-3 - Termogramas das amostras solo-cimento (SC).	263
Figura 9-4 - Termogramas das amostras solo-argila (SA).	265

Figura 9-5 - Distribuição dos poros das misturas SCA-01, 02, 03 e 04 em função da porcentagem e frequência.	271
Figura 9-6 - Distribuição dos poros das misturas SCA-05, 06, 07 e 08 em função da porcentagem e frequência.	272
Figura 9-7- Distribuição dos poros das misturas SCA-09, 10, 11 e 12 em função da porcentagem e frequência.	272
Figura 9-8 - Distribuição dos poros das misturas SCA-13, 14, 15 e 16 em função da porcentagem e frequência.	272
Figura 9-9 - Distribuição dos poros das misturas SC-01, 02, e 03 em função da porcentagem e frequência ($w = 6,4\%$).	273
Figura 9-10 - Distribuição dos poros das misturas SC-04, 05, e 06 em função da porcentagem e frequência ($w = 7,6\%$).	274
Figura 9-11 - Distribuição dos poros das misturas SC-07, 08, e 09 em função da porcentagem e frequência ($w = 8,8\%$).	274
Figura 9-12 - Distribuição dos poros das misturas SA-01, 02, e 03 em função da porcentagem e frequência ($w = 6,4\%$).	275
Figura 9-13 - Distribuição dos poros das misturas SA-04, 05, e 06 em função da porcentagem e frequência ($w = 9,8\%$).	275
Figura 9-14 - Distribuição dos poros das misturas SA-07, 08, e 09 em função da porcentagem e frequência ($w = 13,2\%$).	276
Figura 10-1 - Projeção das superfícies de resposta dos valores de R_d , solução de van Genuchten (1980) - linhas contínuas - e valores de condutividade hidráulica (m/s) durante percolação do contaminante – linhas pontilhadas ($w = 11,0\%$).	278
Figura 10-2 - Projeção das superfícies de resposta dos valores de coesão (linhas cheias e valores em kPa) e ângulo de atrito (linhas pontilhadas e valores em graus) para as misturas SCA com $w = 11,0\%$	280

LISTA DE SIGLAS

ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	<i>American Society for Testing and Material</i>
ATD	Análise Térmica Diferencial
CCL	<i>Compacted Clay Liner</i>
CD	Cisalhamento Direto
CE	Condutividade Elétrica
CETESB	Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental
CP	Cimento Portland
CTC	Capacidade de Troca Catiônica
DQO	Demanda Química de Oxigênio
DRX	Difração de Raios-X
EPA	<i>Environmental Protection Agency</i>
EESC	Escola de Engenharia de São Carlos
Embrapa	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
GC	Grau de Compactação
GCL	<i>Geosynthetic Clay Liner</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IFSC	Instituto de Física de São Carlos
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo
LCE	Laboratório de Caracterização Estrutural
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
PIM	Porosimetria por Intrusão de Mercúrio
PNSB	Pesquisa Nacional de Saneamento Básico
RC	Resistência à Compressão
RT	Resistência à Tração
SE	Superfície Específica
UFSCar	Universidade Federal de São Carlos
USP	Universidade de São Paulo

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área da seção transversal ortogonal a direção do fluxo
A	Alumina (Al_2O_3)
A	Porcentagem de Argila
A_{cb}	Atividade da fração argila do solo
AFt	Etringita
AFm	Monosulfato
c	Concentração de soluto na fase líquida
C	Concentração da solução
C	Óxido de cálcio (CaO)
C	Teor de cimento
C_2S	Silicato dicálcico
C_3A	Aluminato tricálcico
C_3S	Silicato tricálcico
C_4AF	Ferroaluminato tetracálcico
C-A-H	Aluminato de Cálcio Hidratado
C-S-H	Silicatos de cálcio hidratado
CH	Hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$)
CD	Cisalhamento Direto
CO	Contração
CTC	Capacidade de Troca Catiônica
d	Distância interplanar basal
D_0	Coeficiente de difusão da solução livre
D_h	Coeficiente de dispersão hidrodinâmica
D_m	Coeficiente de dispersividade
D^*	Coeficiente de difusão efetiva
e	Índice de vazios
EX	Expansão
F	Hematita ou óxido Férrico (Fe_2O_3)

h	Carga hidráulica total
H	H ₂ O
i	Gradiente hidráulico
IP	Índice de plasticidade
J	Fluxo total de massa unidimensional do soluto
J_A	Fluxo de massa advectivo
J_D	Fluxo de massa difusiva
J_m	Fluxo de dispersão dinâmica
k	Número de fatores
K	Condutividade hidráulica ou coeficiente de condutividade hidráulica
K_{20}	Coeficiente de condutividade hidráulica corrigido
L	Altura do corpo-de-prova do ensaio de coluna
L_e	Comprimento real do caminho do fluxo
L_r	Comprimento em linha reta do caminho do fluxo
LL	Limite de liquidez
LP	Limite de plasticidade
Q	Vazão da água
M	Massa de solo seca
M	Magnesita ou óxido de magnésio (MgO)
M_{CP}	Massa do corpo de prova
MQ_A	Média dos quadrados do fator A
MQ_{AB}	Média dos quadrados da interação entre os fatores A e B
MQ_B	Média dos quadrados do fator B
MQ_E	Média dos quadrados dos erros
n	Porosidade do solo
pH	Potencial de hidrogênio
R^2	Coeficiente de determinação
RC	Resistência à Compressão Simples
RC7	Resistência à Compressão Simples com 7 dias de cura
RC28	Resistência à Compressão Simples com 28 dias de cura
RT	Resistência à Tração

S	Sílica (SiO_2)
$\underline{S}$	Óxido Sulfúrico (SO_3)
SQ_A	Soma dos quadrados do fator A
SQ_{AB}	Soma dos quadrados da interação entre os fatores A e B
SQ_B	Soma dos quadrados do fator B
SQ_E	Soma dos quadrados dos erros
SQ_{ST}	Soma subtotal dos quadrados
SQ_T	Soma total dos quadrados
Sr	Grau de saturação
T	Temperatura
V_{azul}	Volume da solução de azul de metileno
V_b	Valor de azul de metileno
V_{CP}	Volume do corpo de prova
V_{HG}	Volume de mercúrio intrudido
V_v	Volume de vazios
w	Teor de umidade
w_{nat}	Teor de umidade na coleta das amostras (natural)
w_{ot}	Teor de umidade ótima
$w_{K\text{min}}$	Teor de umidade para K mínimo
x	Distância da direção do fluxo
x_1	Variável independente 1
x_2	Variável independente 2
x_3	Variável independente 3
x_4	Variável independente 4
y_{ijk}	Observações
Y	Variável independente
α	Nível de significância
β	Coeficiente de regressão
β_j	Efeito do j-ésimo nível do fator B
ΔH	Diferença de altura das cotas piezométricas ou carga hidráulica
ε	Componente de erro aleatório

η	Porosidade do solo
η_{IF}	Porosidade obtida pelos índices físicos
η_{PIM}	Porosidade obtida pelo ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio
η_T	Viscosidade da água a uma determinada temperatura
η_{20}	Viscosidade da água a 20°C
θ	Ângulo de reflexão
μ	Média global dos efeitos
ρ	Massa específica do solo
ρ_d	Massa específica aparente seca
ρ_s	Massa específica dos sólidos
τ	Tortuosidade do meio
τ_i	Efeito do i-ésimo nível do fator A
U	Velocidade de percolação da água
v_s	Velocidade linear média da água
$\emptyset$	Diâmetro de poros

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	7
RESUMO	9
ABSTRACT	11
LISTA DE TABELAS.....	13
LISTA DE FIGURAS.....	19
LISTA DE SIGLAS	29
LISTA DE SÍMBOLOS.....	30
SUMÁRIO	35
1. INTRODUÇÃO	41
1.1 OBJETIVOS	43
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	45
2.1 BARREIRAS DE PROTEÇÃO	45
2.1.1 <i>Barreiras de Proteção em Aterros Sanitários</i>	45
2.2 CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA.....	47
2.2.1 <i>Fatores que influenciam a condutividade hidráulica</i>	48
2.3 MECANISMOS DE TRANSPORTE DE CONTAMINANTES.....	54
2.3.1 <i>Advecção</i>	54
2.3.2 <i>Dispersão Hidrodinâmica</i>	55
2.4 RETENÇÃO DE CONTAMINANTES	59
2.4.1 <i>Ensaio de Equilíbrio em Lote</i>	60
2.4.2 <i>Ensaio de Percolação em Coluna</i>	64
2.5 EXPANSÃO	66
2.6 CONTRAÇÃO.....	67
2.7 PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA	68
2.8 ESTABILIZAÇÃO QUÍMICA COM CIMENTO	69
2.9 MISTURAS DE SOLOS.....	72
2.9.1 <i>Misturas Solo-Cimento</i>	72
2.9.2 <i>Misturas Solo-Bentonita</i>	74
2.9.3 <i>Misturas Solo-Cimento-Bentonita</i>	75

2.9.4	<i>Pesquisas anteriores com misturas de solos.....</i>	75
2.10	PROJETO E ANÁLISE DE EXPERIMENTOS.....	78
2.10.1	<i>Planejamento Fatorial de Experimentos 2^k.....</i>	78
2.10.2	<i>Planejamento Fatorial de Experimentos 3^k.....</i>	80
2.10.3	<i>Análise de variância.....</i>	80
2.10.4	<i>Modelo de regressão.....</i>	83
2.10.5	<i>Análise dos Resíduos.....</i>	84
2.10.6	<i>Superfície de Resposta.....</i>	85
3.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	87
3.1	MATERIAIS UTILIZADOS.....	87
3.1.1	<i>Solo.....</i>	87
3.1.2	<i>Cimento.....</i>	89
3.1.3	<i>Bentonita.....</i>	89
3.1.4	<i>Solução Contaminante.....</i>	89
3.2	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	90
3.3	COLETA DAS AMOSTRAS.....	90
3.4	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	91
3.5	PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL DAS MISTURAS.....	91
3.6	ENSAIO DE PERCOLAÇÃO EM COLUNA.....	92
3.6.1	<i>Sistema por controle da altura da coluna d'água.....</i>	93
3.6.2	<i>Sistema por controle de ar pressurizado.....</i>	95
3.6.3	<i>Moldagem dos Corpos de Prova.....</i>	96
3.6.4	<i>Montagem da Coluna de Percolação.....</i>	98
3.6.5	<i>Procedimento do Ensaio de Percolação.....</i>	99
3.6.6	<i>Condutividade Hidráulica.....</i>	100
3.6.7	<i>Parâmetros Físico-Químicos do Efluente.....</i>	101
3.6.8	<i>Análise Química Quantitativa do Efluente.....</i>	101
3.7	ENSAIO DE EQUILÍBRIO EM LOTE (BATCH TEST).....	102
3.7.1	<i>Preparo das Amostras para o Batch Test.....</i>	103
3.7.2	<i>Determinação do da Razão Solo:Solução.....</i>	103
3.7.3	<i>Determinação do Tempo de Equilíbrio.....</i>	104
3.7.4	<i>Ajuste das Isotermas de Sorção.....</i>	104
3.8	ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES.....	105
3.9	ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO.....	106
3.10	ENSAIO DE EXPANSÃO.....	107
3.11	ENSAIO DE CONTRAÇÃO.....	110

3.12 AVALIAÇÃO DA ALTERAÇÃO MICROESTRUTURAL DO SOLO.....	112
4. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	113
4.1 Granulometria.....	113
4.2 Índices Físicos.....	114
4.3 Ensaio de Compactação Proctor Normal.....	115
4.4 Capacidade de Troca Catiônica (CTC).....	116
4.5 pH do solo.....	116
4.6 Matéria Orgânica no Solo (M.O.).....	117
4.7 Análise Térmica Diferencial (ATD).....	117
4.8 Difração de Raios-X (DRX) do Solo.....	118
5. CARACTERIZAÇÃO E DEFINIÇÃO DAS MISTURAS	119
5.1 Ensaio de Compactação Proctor Normal.....	119
5.2 Massa Específica dos Sólidos.....	122
5.3 Definição das Misturas.....	123
5.4 Limites de Consistência.....	125
5.5 Comportamento das Misturas.....	126
6. FLUXO E TRANSPORTE DE ÁGUA E CONTAMINANTE	131
6.1 CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA (K).....	131
6.1.1 Solo sem estabilizante.....	131
6.1.2 Misturas SCA.....	132
6.1.3 Misturas SC.....	139
6.1.4 Misturas SA.....	143
6.2 RETENÇÃO DE CONTAMINANTES (RCO).....	147
6.2.1 Ensaios de Equilíbrio em Lote.....	147
6.2.2 Ensaios de Percolação em Colunas.....	154
6.3 CAPACIDADE DE TROCA CATIÔNICA (CTC).....	164
6.3.1 Misturas SCA.....	165
6.3.2 Misturas SC.....	168
6.3.3 Misturas SA.....	171
6.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS DE FLUXO E TRANSPORTE DE CONTAMINANTES.....	175
7. PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA	179

7.1	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES (RCS)	179
7.1.1	<i>Solo sem estabilizante</i>	179
7.1.2	<i>Misturas SCA</i>	179
7.1.3	<i>Misturas SCA Sem Imersão</i>	188
7.1.4	<i>Misturas SC</i>	197
7.1.5	<i>Misturas SA</i>	204
7.2	RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO (CD)	208
7.2.1	<i>Misturas SCA (c e Φ)</i>	209
7.2.2	<i>Misturas SCA (Tensão cisalhante)</i>	218
7.2.3	<i>Misturas SC</i>	221
7.2.4	<i>Misturas SA</i>	227
7.3	ANÁLISE DOS PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA	231
8.	EXPANSÃO E CONTRAÇÃO	233
8.1	EXPANSÃO (EX)	233
8.1.1	<i>Misturas SCA</i>	233
8.1.2	<i>Misturas SC</i>	240
8.1.3	<i>Misturas SA</i>	241
8.1.4	<i>Análise da Expansão das Misturas</i>	243
8.2	CONTRAÇÃO (CO)	244
8.2.1	<i>Misturas SCA</i>	244
8.2.2	<i>Misturas SC</i>	250
8.2.3	<i>Misturas SA</i>	253
8.2.4	<i>Análise da Contração das Misturas</i>	255
9.	COMPOSIÇÃO E MICROESTRUTURA DAS MISTURAS	259
9.1	Análise Térmica Diferencial (ATD)	259
9.2	Porosimetria por Intrusão de Mercúrio (PIM)	267
10.	DISCUSSÕES E ANÁLISES FINAIS	277
10.1	Fluxo e Transporte de Contaminantes	277
10.2	Parâmetros de Resistência	279
10.3	Expansão e Contração das Misturas	280
10.4	Determinação da Zona Admissível	281
11.	CONCLUSÕES	283
11.1	SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	285

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	287
APÊNDICE A	313
APÊNDICE B	325
APÊNDICE C	339
I. Misturas Solo-Cimento-Argila	341
II. Misturas Solo-Cimento	342
III. Misturas Solo-Argila.....	343
a. Fatorial 3^2	343
a. Fatorial 2^2 composto.....	344
APÊNDICE D	345
I. Misturas Solo-Cimento	347
b. Fatorial 3^2	347
c. Fatorial 2^2 composto.....	349
II. Misturas Solo-Argila.....	351
APÊNDICE E	353
I. Misturas Solo-Cimento-Argila	355
a. Dados dos ensaios após 7 dias de cura	355
b. Dados dos ensaios após 28 dias de cura	362
II. Misturas Solo-Cimento	369
a. Dados dos ensaios após 7 dias de cura	369
b. Dados dos ensaios após 28 dias de cura	374
III. Misturas Solo-Argila.....	380
APÊNDICE F	387
I. Misturas Solo-Cimento-Argila	389
II. Misturas Solo-Cimento	391
III. Misturas Solo-Argila.....	392
APÊNDICE G	395
I. Misturas Solo-Cimento-Argila	397
II. Misturas Solo-Cimento	398
III. Misturas Solo-Argila.....	400

1. INTRODUÇÃO

O aterramento de resíduos sólidos é um dos métodos mais antigos para disposição final. A diferenciação dos aterros modernos se dá pelas técnicas de projeto e operação que minimizam os impactos ambientais causados.

As barreiras de proteção, termo normalmente utilizado para descrever camadas de baixa permeabilidade, são dispositivos comuns em aterros sanitários e tem a finalidade de minimizar os efeitos do fluxo de percolado. Esta impermeabilização pode ser executada com materiais naturais e artificiais, ou ainda com uma combinação de ambos. Quando aplicada na base dos aterros, impede que os percolados atinjam os solos do entorno e o lençol freático e quando empregada na impermeabilização da cobertura e fechamento do aterro tem a finalidade de impedir a infiltração de água na camada de resíduos.

O solo é um material muito variável e complexo e, dependendo da situação, pode ou não atender as características e propriedades exigidas nos projetos. A partir deste ponto uma decisão deve ser tomada que é aceitar o material com suas características naturais adaptando o projeto, descartar o material local ou alterar as propriedades do solo a fim de se criar um novo material que atenda os requisitos do projeto. Esta última opção é atrativa, devido à possibilidade de se eliminar os custos com escavações e aterros e ao baixo custo dos materiais empregados, em comparação a remoção de solos impróprios e empréstimo de materiais, o que a torna útil para regiões desprovidas de material adequado e, portanto, justifica sua utilização em grande escala em obras de engenharia (INGLES e METCALF, 1972).

No ano de 2010 foi instituído o Plano Nacional de Resíduos Sólidos, através da Lei N° 12.305/2010 e foi estabelecida a meta de eliminar e recuperar locais de descarte irregulares e lixões em todo o território nacional. Desde então, os municípios brasileiros devem elaborar Planos de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos, encerrar as atividades de lixões ou aterros controlados e construir aterros sanitários e industriais para armazenar os resíduos que não podem ser reutilizados, reciclados ou recuperados.

Muitas regiões do Brasil apresentam falta de material adequado para construção de barreiras de proteção ambiental e os trabalhos de escavações,

empréstimos e aterro de solo apropriado podem elevar o custo destas obras de engenharia.

A técnica do solo-cimento há muitos anos é empregada com sucesso na área de pavimentação, revestimentos de barragens de terra, como melhoria de solo para assentamento de fundações superficiais, em canais de irrigação, etc (INGLES & METCALF, 1972; PORBAHA et al., 1998; SEGANTINI, 2000; THOMÉ et al., 2005).

Pesquisas com solo-cimento para utilização em diferentes tipos de barreiras de proteção ambiental foram desenvolvidas (EPA, 1983; HAXO Jr. et al., 1985; HAXO Jr. et al., 1986; BRODERICK & DANIEL, 1990; RIZZO & LOLLO, 2006; LEMOS, 2006; KNOP, 2007; SAHA et al., 2008), porém há falta de estudos que determinem a influência integrada dos fatores variáveis e suas interações na avaliação do comportamento das barreiras de proteção para uso em aterros sanitários.

Neste contexto, torna-se necessário o aprimoramento do conhecimento referente a estabilização química de solos com cimento e a compreensão das suas variáveis que promovem as alterações na condutividade hidráulica e capacidade de retenção de contaminantes e outros parâmetros que venham a intervir na execução e funcionamento das barreiras de proteção ambiental para aplicação em aterros sanitários.

Nesta pesquisa é proposto um procedimento de análise dessas variáveis com o uso integrado do planejamento fatorial de experimentos, modelos de regressão e superfícies de resposta. Com o uso de ferramentas estatísticas e matemáticas será possível modelar, simular e otimizar as propriedades desejadas das misturas solo-cimento em função de seus componentes. Assim, pretende-se compreender o comportamento destas misturas e os fenômenos envolvidos no processo.

Procedimentos de modelagem de uma determinada propriedade usando metodologia similar de otimização é uma prática usual em diversas áreas (HARE, 1974; ANDERSON & WHITCOMB, 1996; HUNG et al., 2002; CORREIA et al., 2004; CORREIA et al., 2010a; CORREIA et al., 2010b; LOCH et al., 2012) e têm permitido, em todos os casos relatados, obter uma maior confiança nos resultados e eficiência na determinação dos fatores influentes. Loch (2013) avaliou misturas de solo-cal e solo-cimento através de um projeto fatorial e obteve resultados capazes de prever o comportamento hidráulico do solo estabilizado.

As pesquisas usuais com barreiras empregam solos altamente argilosos ou utilizam apenas misturas com argilas. Esta proposta, portanto, pretende fornecer uma opção alternativa para construção de barreiras de proteção ambiental em aterros sanitários com o uso de um solo arenoso modificado com pequena adição de argila e estabilização química com cimento. A metodologia proposta de planejamento e análise experimental que difere do usual utilizado na área de Geotecnia, é capaz de otimizar os resultados e permitir uma avaliação global do comportamento do material.

1.1 OBJETIVOS

Investigar o comportamento das misturas de solo, cimento e argila e o efeito da estabilização com a finalidade de gerar resultados que auxiliem futuros projetos construtivos de barreiras de proteção ambiental. Serão testadas várias misturas de solo-cimento-argila e, através da metodologia de planejamento experimental e análise estatística proposta, pretende-se determinar a influência dos fatores intervenientes e suas interações.

Alguns objetivos específicos são:

- Determinar os parâmetros de condutividade hidráulica e fator de retardamento das misturas;
- Determinar as propriedades de resistência à compressão simples das amostras;
- Determinar as propriedades de resistência ao cisalhamento das misturas de solo;
- Determinar a variação volumétrica das misturas com ensaios de contração e expansão;
- Avaliar a alteração da textura do solo promovida pela estabilização;
- Avaliar as variáveis das misturas simultaneamente para melhor compreensão dos seus efeitos;
- Estabelecer modelos de previsão dos parâmetros avaliados.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 BARREIRAS DE PROTEÇÃO

Segundo Leite (1997), as barreiras de proteção são caracterizadas por uma camada de baixa permeabilidade, construída com material natural, artificial ou, ainda, pela combinação dos dois. O objetivo das barreiras é a impermeabilização do solo para que se possa evitar a percolação de fluidos. São aplicadas em diversas obras de engenharia, tais como: canais, reservatórios, diques, aterros sanitários e lagoas de tratamento de resíduos.

A escolha do tipo de barreira de proteção empregada, conforme Folkes (1982) é influenciada pelos contaminantes ou resíduos em contato, ambiente físico (a geologia, geoquímica, topografia, pedologia, clima e uso), material constituinte do liner; taxa de infiltração e vida útil do projeto.

2.1.1 Barreiras de Proteção em Aterros Sanitários

Os aterros sanitários e industriais são instalações de destinação final de resíduos, projetados para contê-los e confiná-los de maneira adequada, sob controle técnico e operacional constante. Assim sendo, os aterros necessitam de camadas impermeabilizantes, denominadas de barreiras de proteção, cuja finalidade é evitar alterações prejudiciais ao meio no qual estão inseridos (IBGE, 2010).

Conforme Daniel (1993) os requisitos mínimos recomendados para os materiais empregados nas barreiras de fundo de solo compactado, considerando solos de clima temperado e, visando obter uma condutividade hidráulica inferior a 10^{-7} cm/s, são os seguintes: porcentagem de finos maior do que 20 a 30%; índice de plasticidade maior do que 7 a 10%; porcentagem de pedregulhos menor do que 30%; tamanho máximo das partículas entre 25 e 50 mm.

No Estado de São Paulo, a CETESB (1993) determina que os solos utilizados em aterros devem apresentar as seguintes características: classificação unificada: CL, CH, SC ou OH; $K < 10^{-7}$ cm/s; porcentagem que passa na peneira nº 200 maior que

30%; limite de plasticidade maior que 30%; índice de plasticidade maior que 15%; apresentar característica neutra ou básica, com pH maior ou igual a 7.

As características essenciais da barreira de proteção, para que seja garantido o bom desempenho, de acordo com Quigley et al. (1987), são: minimização da ação do contaminante; alta capacidade de adsorção e retardamento dos contaminantes; elevada resistência a substâncias químicas e aos processos erosivos; habilidade natural de autodepuração; boa flexibilidade; baixas taxas de expansão e contração.

A Figura 2-1 apresenta todas as camadas constituintes das barreiras de proteção superior e inferior de um aterro. A Figura 2-1 (A) mostra as camadas correspondentes ao revestimento final e célula de resíduo, e as camadas apresentadas na Figura 2-1 (B) correspondem a célula de resíduo e ao revestimento de fundo.

Figura 2-1 - Seção esquemática das barreiras de proteção: (A) Superior e (B) Inferior de um aterro sanitário.

Fonte: Modificado de Boscov (2008).

A condutividade hidráulica é o parâmetro determinante para avaliação da qualidade e escolha do material empregado na execução de uma barreira impermeabilizante. Esta propriedade está diretamente relacionada às propriedades do solo utilizado, ao grau de compactação e as características do fluido percolante ao qual a barreira estará sujeita.

2.2 CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA

Segundo Souza (1976) e Pinto (2002) a condutividade hidráulica pode ser definida como a propriedade de um meio poroso de permitir a passagem de água ou outro fluido, com determinada vazão por unidade de área. Nos solos saturados o estudo do fluxo baseia-se na Lei de Darcy. A condutividade hidráulica pode determinar a relação entre a descarga específica e o gradiente hidráulico que a origina e é representada pelo coeficiente de permeabilidade (Eq. 2-1).

$$K = Q \cdot i \cdot A \quad (\text{Eq. 2-1})$$

Onde:

Q = vazão percolada;

K = coeficiente de permeabilidade;

i = gradiente hidráulico;

A = área da seção transversal à direção do fluxo.

O gradiente hidráulico (Eq. 2-2) é adimensional e corresponde a perda de carga por unidade de comprimento. É determinado pela divisão da diferença de carga hidráulica total (ΔH) pela distância horizontal (L).

$$i = \frac{\Delta H}{L} \quad (\text{Eq. 2-2})$$

A condutividade hidráulica está diretamente relacionada às propriedades do solo utilizado, ao grau de compactação e as características do fluido percolante. É o parâmetro decisivo para avaliação e escolha do material utilizado para a execução de uma barreira impermeabilizante.

2.2.1 Fatores que influenciam a condutividade hidráulica

Os principais fatores que afetam a condutividade hidráulica dos solos são: a estrutura, a composição mineralógica, o grau de saturação; a granulometria; o índice de vazios do meio e as características do fluido percolante (LAMBE, 1958; MITCHELL et al., 1965; BENSON et al., 1994; PINTO, 2002).

I) Estrutura do solo

A estrutura do solo é um dos principais fatores que definem a permeabilidade das barreiras de proteção ambiental. A estrutura dos solos argilosos pode ser floculada ou dispersa. Segundo Lambe (1958), o teor de umidade de compactação do solo influencia diretamente a sua estrutura. A Figura 2-2 mostra como a estrutura dos solos argilosos pode variar em função do teor de umidade e energia de compactação.

Quando o teor de umidade é baixo a estrutura tende a ser floculada. Nesta situação o arranjo das partículas permite a ocorrência de vazios e consequentemente uma maior percolação de fluidos.

O aumento do teor de umidade promove a hidratação das partículas causando a expansão da dupla camada difusa. Deste modo apresentam a tendência de se orientarem de maneira paralela e as partículas se encontram mais dispersas.

Figura 2-2 - Variação da estrutura do solo em função da energia de compactação e teor de umidade

Fonte: Modificado de Lambe (1958).

Na Figura 2-2, ponto A e E, é possível observar que nos casos em que a umidade é inferior a umidade ótima há ocorrência de estrutura floculada. Quando a umidade é superior ao ponto ótimo, pontos C e D da Figura 2-2, há tendência de formação de uma estrutura dispersa, com arranjo paralelo das partículas.

II) Teor de Umidade e Energia de Compactação

O teor de umidade de compactação, segundo Mitchell et al. (1965), exerce influência na condutividade hidráulica. Os autores identificaram, em solos argilosos, que são obtidos menores valores de condutividade hidráulica em amostras compactadas no ramo úmido da curva de compactação. Com base nos solos avaliados foi feita a recomendação de utilização do teor de umidade entre 2 e 4% acima do ponto de umidade ótima. Na Figura 2-3 são apresentados os resultados de condutividade hidráulica em função do teor de umidade.

O aumento da energia de compactação pode promover a redução da condutividade hidráulica, pois com o aumento da energia há um decréscimo da quantidade de grandes poros, que gera uma redução da permeabilidade (MITCHELL et al., 1965; ACAR & OLIVIERI, 1989). Na Figura 2-3 são apresentados os resultados de Mitchell et al. (1965). Os autores observaram que há uma grande redução da permeabilidade no ponto próximo a umidade ótima. O aumento da energia de compactação causa uma redução da condutividade hidráulica desde os pontos com menor teor de umidade.

Daniel & Benson (1990) investigaram a condutividade hidráulica e valores de teor de umidade (w), massa específica aparente seca (ρ_d) e energia de compactação. Foi definida, através de uma análise abrangente, uma zona admissível considerando os intervalos de variação dos valores destas variáveis que geram uma condutividade hidráulica desejada.

A definição da zona admissível indicada por Daniel & Benson (1990) foi feita através da prática construtiva. O objetivo foi atender os requisitos necessários de resistência ao cisalhamento, compressibilidade e condutividade hidráulica de barreiras impermeáveis.

Figura 2-3 - Resultados de condutividade hidráulica para diferentes energias de compactação.

Fonte: Modificado de Mitchell et al. (1965).

Daniel & Benson (1990) determinaram os métodos para alcançar a zona admissível, através de ensaios de compactação e permeabilidade. O procedimento segue quatro etapas.

Na primeira etapa, conforme demonstrado na Figura 2-4 (A), os solos são compactados com três diferentes energias de compactação: proctor modificado (ASTM D1557), normal (ASTM D698) e reduzido para obtenção das curvas de compactação. O proctor reduzido consiste na execução do proctor normal com apenas 15 golpes por camada (DANIEL & BENSON, 1990).

Na segunda etapa, Figura 2-4 (B), as amostras de solo compactado são sujeitas ao ensaio de permeabilidade. A saturação das amostras deve ser monitorada durante o procedimento. Os valores de condutividade hidráulica obtidos devem ser plotados em função do teor de umidade.

Na terceira etapa deve-se identificar as amostras com resultados de condutividade hidráulica igual ou inferior ao padrão admissível para, então, fazer a identificação da zona aceitável, Figura 2-5 (A).

A quarta etapa compreende a consideração dos outros fatores, tais como: resistência ao cisalhamento, atrito interfacial com geomembrana, consideração de expansão e contração e informações de trabalhabilidade e práticas locais. Deste modo a zona admissível pode ser modificada, Figura 2-5 (B).

Figura 2-4 - (A) Curvas de Compactação para diferentes energias; (B) Condutividade Hidráulica vs. Teor de Umidade.

Fonte: Modificado de Daniel & Benson (1990).

III) Granulometria e Índice de Vazios

Quanto menor o valor do índice de vazios de um solo, menor serão os valores da condutividade hidráulica. A textura do solo deve ser avaliada, pois se em sua

composição granulométrica foi de material granular ou se houver pouca quantidade de finos há tendência de apresentar uma permeabilidade maior devido aos vazios deixados entre os grãos (PINTO, 2002). A Tabela 2-1 apresenta algumas aproximações entre os tipos de solo e valores típicos de condutividade hidráulica.

Figura 2-5 – (A) Zona admissível em termos de teor de umidade (w_{ot}), massa específica seca (ρ_d) e condutividade hidráulica (K); (B) Zona admissível considerando outros fatores.

Fonte: Modificado de Daniel & Benson (1990).

Tabela 2-1 – Valores típicos de condutividade hidráulica em relação aos tipos de solo.

Tipo de Solo	Condutividade Hidráulica (m/s)
Argilas	$< 10^{-9}$
Siltes	10^{-6} a 10^{-9}
Areias argilosas	10^{-7}
Areias finas	10^{-5}
Areias médias	10^{-4}
Areias grossas	10^{-3}

Fonte: Pinto (2002).

Benson et al. (1994) investigaram a influência da composição granulométrica do solo na permeabilidade de barreiras de solos compactados. Os autores compararam a porcentagem de cada fração granulométrica com os resultados de condutividade obtidos. Para atingir uma condutividade inferior a 10^{-7} cm/s em

amostras de solo sem tratamentos é preciso ter um valor mínimo de 30% de finos, conforme a Figura 2-6.

Figura 2-6 - Condutividade Hidráulica versus: (A) Porcentagem de pedregulho; (B) Porcentagem de areia; (C) Porcentagem de finos; (D) Porcentagem de argila.

Fonte: Modificado de Benson et al. (1994).

IV) Mineralogia

A composição mineralógica do solo exerce grande influência nos valores de condutividade hidráulica. Mesri & Olson (1971) estudaram o comportamento hidráulico dos argilominerais montmorilonita, illita e caulinita. A montmorilonita apresenta ligações mais fracas entre suas camadas constituintes, deste modo permite uma maior superfície de contato que ocasiona uma maior interação com as partículas de água, em relação aos outros dois argilominerais.

Segundo Mesri & Olson (1971) as principais variáveis mecânicas dos argilominerais, que diferem o seu comportamento quanto a permeabilidade, são o tamanho, formato e arranjo das partículas de argila. Os autores observaram que a montmorilonita apresenta menor condutividade hidráulica, em segundo lugar a illita e

em terceiro a caulinita. A caulinita é de cerca de 200.000 vezes mais permeável do que a montmorilonita e a illita é de cerca de 200 vezes mais permeável, considerando um mesmo índice de vazios.

V) Características do fluido

Segundo Sharma & Lewis (1994) as propriedades dos líquidos percolantes influenciam a condutividade hidráulica das barreiras de proteção ambiental construídas com solo compactado. Por exemplo se o fluido apresenta viscosidade elevada a tendência é de apresentar uma condutividade hidráulica baixa. Como a viscosidade dos fluidos é dependente das variações de temperatura, esta também pode alterar a condutividade hidráulica.

Nos solos argilosos há, ainda, outras variáveis como as interações físico-químicas entre o fluido e as partículas do solo. Nesses solos devem ser consideradas outras características como: troca iônica, concentração de cátions e constante dielétrica (SHARMA & LEWIS, 1994).

2.3 MECANISMOS DE TRANSPORTE DE CONTAMINANTES

Os mecanismos de migração de contaminantes em subsuperfície envolvem os processos de advecção e dispersão hidrodinâmica, sendo que este último pode ser subdividido em dispersão mecânica e difusão molecular.

2.3.1 Advecção

No processo da advecção os solutos são carregados pela água em movimento, de modo que a direção e taxa de transporte coincidem com a da água. Nesta situação os solutos não reativos, ou seja, aqueles que não estão sujeitos a reações químicas e biológicas, são transportados com uma velocidade igual a velocidade linear média da água (SHACKELFORD, 1993; SCHINCARIOL & ROWE, 2000). Segundo Fetter (1999) a velocidade linear média é a taxa correspondente ao fluxo de água que ocorre através da seção transversal do espaço poroso (Eq. 2-3).

$$v_s = \frac{v}{\eta} \quad (\text{Eq. 2-3})$$

Sendo que v_s corresponde a velocidade linear média da água, v a velocidade de percolação da água e η a porosidade do solo.

Shackelford (1993) lembra que a (Eq. 2-3) pressupõe que todos os vazios do material poroso podem conduzir os fluídos e que o fluxo conforme a lei de Darcy, para uma situação unidimensional é descrita pela (Eq. 2-4).

$$v = \frac{Q}{A} = -K \frac{\partial h}{\partial x} = Ki \quad (\text{Eq. 2-4})$$

Sendo Q a vazão da água, A corresponde a área da seção transversal ortogonal à direção do fluxo, K a condutividade hidráulica, h a carga hidráulica total, X é a distância da direção do fluxo e i o gradiente hidráulico.

Considerando que todos os solutos são carregados pelo fluxo, com uma velocidade " v_s ", o fluxo advectivo pode ser expresso através da (Eq. 2-5).

$$J_A = vc = Kic = \eta v_s c \quad (\text{Eq. 2-5})$$

Onde J_A representa o fluxo de massa advectivo e c corresponde a concentração de soluto na fase líquida, ou seja, massa de soluto por volume da solução.

Conforme Fetter (1999), a equação do transporte por advecção em uma direção é descrita pela (Eq.2-6).

$$\frac{\partial C}{\partial h} = -vx \frac{\partial C}{\partial x} \quad (\text{Eq.2-6})$$

2.3.2 Dispersão Hidrodinâmica

No interior de meios porosos os íons e moléculas podem se afastar da trajetória principal, alguns com velocidades maiores do que outros, o que causa a diluição da solução. Este fenômeno ocorre devido a dois processos diferentes: dispersão

mecânica e difusão molecular (FREEZE & CHERY, 1979; SCHINCARIOL & ROWE, 2000).

A dispersão hidrodinâmica, segundo Freeze & Cherry (1979), compreende o espalhamento de massa em áreas além do que pode ser atingido pela advecção, ou seja, em direções diferentes ou no mesmo sentido do fluxo. O coeficiente de dispersão hidrodinâmica é expresso pela (Eq. 2-7).

$$D_h = D_m + D^* \quad (\text{Eq. 2-7})$$

Sendo que D_h corresponde ao coeficiente de dispersão hidrodinâmica, D_m ao coeficiente de dispersividade e D^* ao coeficiente de difusão efetiva.

2.3.2.1 Difusão molecular

As moléculas se movimentam para as regiões de menor concentração até o equilíbrio ser atingido, ou seja, até o momento no qual não houver gradiente de concentração. Os íons e moléculas se movem sob a influência da atividade cinética na direção do gradiente de concentração, este processo é denominado como difusão molecular, ou difusão. Este processo pode ocorrer mesmo na ausência de qualquer movimento hidráulico da solução (FREEZE & CHERY, 1979).

Segundo Shackelford (1993), a massa de substância difusiva passando por uma determinada seção transversal por unidade de tempo é proporcional ao gradiente de concentração. O fluxo dessa massa, considerando movimento em uma dimensão, pode ser expressa pela primeira lei de Fick (Eq. 2-8).

$$J_D = -D_0 \frac{\partial c}{\partial x} \quad (\text{Eq. 2-8})$$

Sendo que J_D corresponde ao fluxo de massa difusiva, c a concentração do soluto, x a distância da direção do fluxo, D_0 o coeficiente de difusão da solução livre e $\partial c / \partial x$ o gradiente de concentração.

Em meios porosos é utilizada a lei de Fick modificada (Eq. 2-9) para representar fluxo de massa difusiva (SHACKELFORD, 1993).

$$J_D = -D^* \eta \frac{\partial c}{\partial x} \quad (\text{Eq. 2-9})$$

O coeficiente D^* representa o coeficiente de difusão efetivo (Eq. 2-10) é função da tortuosidade do meio (τ). A tortuosidade é uma propriedade definida como a relação entre o comprimento em linha reta entre os extremos de um caminho de fluxo tortuoso (L_r) e o comprimento real deste caminho (L_e), conforme apresentado na (Eq. 2-11).

$$D^* = \tau D_0 \quad (\text{Eq. 2-10})$$

$$\tau = \left(\frac{L_r}{L_e} \right)^2 \quad (\text{Eq. 2-11})$$

Como o comprimento de L_e é maior do que L_r , τ será sempre menor que 1,0 e, conseqüentemente D^* é menor que D_0 .

Segundo Fetter (1999) nos sistemas em que a concentração muda em relação ao tempo, o processo difusivo é representado pela segunda lei de Fick (Eq. 2-12).

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D^* \eta \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (\text{Eq. 2-12})$$

Sendo que $\partial c / \partial t$ representa a variação da concentração ao longo do tempo.

2.3.2.2 Dispersão mecânica

A dispersão mecânica, de acordo com Shackelford (1993), envolve o espalhamento do soluto devido a variações da velocidade de fluxo. Com uma visão microscópica, o fluido irá se mover mais rápido no centro do poro, diminuindo nas regiões próximas as paredes do poro devido ao atrito. Em um poro entre duas partículas, a velocidade do fluxo será maior onde o poro apresentar uma menor área transversal.

Segundo Fetter (1999) e Shackelford (1993) o fluxo da dispersão mecânica é usualmente descrito pela Lei de Fick (Eq.2-13) para uma situação unidimensional.

$$J_m = -D_m \eta \frac{\partial c}{\partial x} \quad (\text{Eq.2-13})$$

Onde J_m corresponde ao fluxo de dispersão dinâmica, c é a concentração do soluto e x é a distância da direção do fluxo.

Segundo Fetter (1999) deve-se fazer duas considerações referentes ao fluxo do soluto para a determinação do coeficiente de dispersividade. Considerando que o fluxo do soluto não ocorre apenas no sentido do fluxo de água temos dispersão longitudinal (Eq.2-14) que acompanha a mesma direção e a dispersão transversal que ocorre na direção perpendicular ao fluxo (Eq.2-15).

$$D_m = \alpha_L v_L \quad (\text{Eq.2-14})$$

$$D_m = \alpha_T v_T \quad (\text{Eq.2-15})$$

Onde α_L corresponde ao coeficiente de dispersividade longitudinal, α_T ao coeficiente de dispersividade transversal, v_L e v_T correspondem a velocidade linear média na direção longitudinal e transversal, respectivamente.

Segundo Shackelford (1993) o fluxo total de massa unidimensional do soluto, ou contaminante, pode ser definido como a soma dos fluxos de advecção e dispersão hidrodinâmica (Eq.2-16 e 2-17).

$$J = J_A + J_D + J_m \quad (\text{Eq.2-16})$$

$$J = \eta v_s c - D_h \eta \frac{\partial c}{\partial x} \quad (\text{Eq.2-17})$$

Segundo Fetter (1999), considerando o balanço de massa de um soluto conservativo num meio poroso homogêneo e isotrópico, o fluxo unidimensional na direção x é representado pela (Eq.2-18).

$$\frac{\partial C}{\partial h} = D_h \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v_x \frac{\partial C}{\partial x} \quad (\text{Eq.2-18})$$

2.4 RETENÇÃO DE CONTAMINANTES

Segundo Freezy & Chery (1979) o transporte de massa em materiais porosos é descrito através de equações diferenciais baseadas no fluxo de soluto que passa por volume elementar do solo. O transporte de massa em materiais pode ser descrito pela (Eq.2-19) apresentada por Fetter (1999).

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D_h \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - v_s \frac{\partial c}{\partial x} - \frac{\rho_d}{\theta} \frac{\partial c^*}{\partial t} + \left(\frac{\partial c}{\partial t} \right)_{rxm} \quad (\text{Eq.2-19})$$

(dispersão) (advecção) (sorção) (outras reações)

Onde c corresponde a concentração do soluto; t ao tempo; D_h é o coeficiente de dispersão; v_s a velocidade linear média da água; ρ_d a massa específica do meio poroso; θ representa o teor de umidade volumétrico ou porosidade nos meios saturados; c^* a quantidade de soluto sorvido por unidade de peso do sólido e rxm é uma indicação de outra reação (biológica ou química).

Quando os solutos percolados sofrem reações quando entram em contato com o solo, podem sofrer atração pelas partículas do solo e serem retidos. Uma opção para descrever o transporte destes solutos reativos, de acordo com Sharma & Lewis (1994), pode ser descrito pela (Eq. 2-20).

$$R_d \frac{\partial c}{\partial t} = D_h \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - v_s \frac{\partial c}{\partial x} \quad (\text{Eq. 2-20})$$

Onde R_d é o fator de retardamento, que pode ser obtido experimentalmente. Este fator serve para que as reações que ocorrem entre o soluto e o solo sejam mais facilmente representadas.

De acordo com Freeze & Cherry (1979), o retardamento R_d é definido como a razão entre o fluxo médio de espécies químicas que não são adsorvidas v , e a

velocidade média de migração do centro de massa das espécies adsorvidas v_c (Eq. 2-21).

$$R_d = \frac{v}{v_c} = \frac{vt_c}{L} \quad (\text{Eq. 2-21})$$

Onde t_c é o tempo necessário para que o centro de massa do soluto em migração atinja o final da coluna de comprimento L . Solutos reativos migram mais devagar ($R_d > 1$) que os solutos não reativos ($R_d = 1$).

Segundo Shackelford (1994), o número de Peclet P_e representa o efeito relativo do transporte por advecção baseado na velocidade de percolação v , sobre o transporte dispersivo-difusivo baseado no valor D_h (Eq. 2-22). Este parâmetro permite determinar qual o mecanismo de transporte predominante. Se $P_e < 1$ o efeito de difusão é dominante, caso $P_e > 50$, significa que o processo predominante é o de advecção.

$$P_e = \frac{vL}{D_h} \quad (\text{Eq. 2-22})$$

2.4.1 Ensaios de Equilíbrio em Lote

A sorção é usualmente definida como um processo de equilíbrio e pode ser determinada experimentalmente. Para determinação deste parâmetro são realizados ensaios de equilíbrio em lote, onde solutos com diferentes concentrações são misturados com sedimentos, solo ou rochas e, então, pode ser determinada a quantidade de soluto removida. Os resultados dos experimentos são plotados em gráficos, denominados como isotermas de sorção, nos quais são apresentadas as concentrações de soluto versus a quantidade adsorvida (FREEZY & CHERY, 1979; FETTER, 1999; ROWE et al. 2004).

No caso de haver tempo suficiente para a solução atingir um ponto onde não ocorra mais sorção a isoterma é denominada como “isoterma de equilíbrio”. Os modelos mais utilizados destas isotermas são: isoterma linear, isoterma de Freundlich e isoterma de Langmuir, sendo que cada uma delas é regida pelas suas equações características. Após a identificação da isoterma mais apropriada é possível obter o

coeficiente de distribuição (K_d) para, então, obter o coeficiente de retardamento (R_d) (FETTER, 1999; ROWE et al. 2004).

Segundo Giles et al. (1974) as isotermas de sorção podem ser classificadas em quatro categorias: isotermas S (forma sigmoidal), L (do tipo Langmuir), H (alta afinidade) e C (participação constante) e, ainda dividida em 4 subgrupos conforme apresentado na Figura 2-7. O autor estabeleceu estas categorias de acordo com as inclinações iniciais e nas curvaturas.

Figura 2-7 – Categorias e subgrupos de isotermas.

Fonte: Giles et a. (1974)

Do ponto de vista matemático, conforme Hinz (2001), as isotermas podem ser agrupadas como racionais, potenciais e transcendentais. As funções racionais são, normalmente, quocientes de polinômios e compreendem as equações de Langmuir, Langmuir-two site, Brunauer-Emmett-Teller e Farley Dzombak-morel. As isotermas potenciais são regidas por funções de potências, como as equações de Freundlich, Geral de Langmuir-Freundlich, Geral de Freundlich, Tóth, Redlich-Peterson e Aranovich-Donhoue. As equações transcendentais raramente são utilizadas e compreendem as funções de Temkin, Fowler–Guggenheim e Dubinin–Radushkevich.

Os métodos mais usados para determinar a adsorção do solo são descritos por Roy et al. (1992). Segundo o autor há dois tipos de procedimentos: ECI (Environmental Conservative Isotherm) e CSI (Constant Soil: solution ratio Isotherms). O primeiro utiliza uma única concentração da solução contaminante variando as quantidades de solo (razão solo-solução - RSS). No segundo método são utilizadas soluções de várias concentrações e as massas de solo são mantidas constantes.

A quantidade de soluto sorvido por unidade de massa de solo, ou sorção (S), é determinada através da (Eq. 2-23).

$$S = \frac{(c_0 - c_e)}{M} V \quad (\text{Eq. 2-23})$$

Onde c_0 é a concentração inicial da solução, c_e é a concentração final da solução em equilíbrio, V é o volume utilizado e M a massa de solo.

Definindo os valores de sorção, constrói-se a isoterma de adsorção para os ensaios de equilíbrio. No caso das isotermas linear e Freundlich, elas estabelecem que o solo tem capacidade infinita de sorção, o que não acontece nos solos que tem capacidade de adsorção limitada. Por isto a formulação de Langmuir é mais realista para os solos, porque impõe um valor máximo de adsorção (FETTER, 1999).

A isoterma com comportamento linear, conforme Freeze & Cherry (1979), é descrita pela (Eq. 2-24).

$$S = K_d \cdot c_e \quad (\text{Eq. 2-24})$$

Sendo que S é a quantidade de soluto adsorvido por massa de solo, C_e a concentração de equilíbrio da solução e K_d é o coeficiente de distribuição.

A isoterma de Freundlich (Eq. 2-25) é uma das mais usadas nos estudos de equilíbrio.

$$S = K_F \cdot c_e^N \quad (\text{Eq. 2-25})$$

Sendo que S é a quantidade de soluto adsorvido por massa de solo, C_e a concentração de equilíbrio da solução, K_F é a constante de Freundlich e N o coeficiente

experimental de ajuste. Quando $N = 1$ a sorção se iguala ao modelo linear. Se $N > 1$ a sorção é favorável e se $N < 1$ a sorção é desfavorável.

A isoterma de Langmuir (Eq. 2-26) considera um valor máximo de adsorção s_m , C_e representa a concentração de equilíbrio da solução e K_L é o coeficiente de ajuste.

$$S = \frac{s_m K_L C_e}{(1 + K_L C_e)} \quad (\text{Eq. 2-26})$$

Existem vários métodos para determinar o fator de retardamento (R_d) a partir dos ensaios de equilíbrio em lote. Para o ajuste linear da isoterma o valor do coeficiente de participação K_p (coeficiente angular da reta) é obtido diretamente e o R_d pode ser obtido pela (Eq. 2-27). O K_p representa a taxa de adsorção do soluto pelo solo.

$$R_d = 1 + \frac{\rho_d K_d}{\theta} \quad (\text{Eq. 2-27})$$

Onde ρ_d é a massa específica seca, θ é a umidade volumétrica da barreira de proteção ambiental, sendo que para solos saturados coincide com a porosidade n (FREEZY & CHERRY, 1979).

Segundo Roy et al.(1992), para o caso da isoterma de Freundlich o R_d pode ser obtido pela (Eq. 2-28) . O autor observa que considerar que o R_d depende da concentração pode gerar problemas para determinar a solução da equação, e propõe a determinação de um valor médio de R_d , usando uma secante a curva (Eq. 2-29).

$$R_d = 1 + \frac{\rho_d K_F N C_e^{N-1}}{\theta} \quad (\text{Eq. 2-28})$$

$$R_d = 1 + \frac{\rho_d K_F C_0^{N-1}}{\theta} \quad (\text{Eq. 2-29})$$

Fetter (1999) propõe que o fator de retardamento (R_d), para a isoterma de Freundlich, seja calculada segundo (Eq. 2-28) e para o ajuste de Langmuir tradicional pela (Eq. 2-30).

$$R_d = 1 + \frac{\rho_d K_L S_m}{\theta(1 + K_L c_e)^2} \quad (\text{Eq. 2-30})$$

Valores de $R_d > 1$ indicam que os solutos migram mais devagar e são reativos, e $R_d = 1$ indica que os solutos não são reativos (FREEZE & CHERRY, 1979).

Os modelos de equilíbrio assumem que a variação da concentração devido a sorção é maior que a provocada por outros fatores e que o fluxo é baixo o bastante para o equilíbrio ser atingido. Caso o equilíbrio não seja alcançado um modelo cinético de sorção é mais apropriado para avaliar o efeito (FETTER, 1999).

2.4.2 Ensaios de Percolação em Coluna

Segundo WISE (1993) as isotermas, lineares e não lineares, determinadas em ensaio de equilíbrio em lote são insuficientes para determinar os processos de sorção sob condições de equilíbrio local, visto que representam meios homogêneos. Atualmente, o ensaio que melhor representa o comportamento do fluxo e retenção de contaminantes no solo é o ensaio de percolação em coluna. Este ensaio é capaz de simular de maneira mais adequada as condições de campo.

O procedimento padrão de ensaios em coluna primeiramente estabelece um fluxo através do meio poroso, geralmente com água. Em sequência é iniciada a percolação de uma solução com uma concentração conhecida (c_0) dos seus elementos químicos. São realizadas medidas periódicas das concentrações dos mesmos elementos químicos na solução efluente (c_e). Os resultados deste ensaio são, então, plotados em gráficos de concentração relativa c_e/c_0 vs. tempo ou volume de poros. As curvas geradas, denominadas de curvas de chegada (Figura 2-8), são então avaliadas por modelos de transporte para determinar os parâmetros de fluxo, como a dispersão hidrodinâmica (D_h) e fator de retardamento (R_d) (SHACKELFORD, 1993, 1994 e 1995).

Assim como os ensaios de equilíbrio, para os ensaios de coluna existem diversos métodos para determinação do R_d . Segundo Freeze & Cherry (1979), considerando uma fonte contínua, se assume que o centro de massa ocorre para a concentração relativa de $c/c_0 = 0,5$.

Shackelford (1994) propôs determinar o fator de retardamento pelo método da área acima da curva de chegada, sendo esta área equivalente ao R_d (Figura 2-8).

Vários modelos teóricos foram desenvolvidos para descrever o transporte de solutos no solo (van GENUCHTEN & WIERENGA, 1986). O STANMOD (Studio of Analytical Models) é um pacote de modelos que permite verificar o ajuste entre os dados experimentais e os simulados, fornece os parâmetros de transporte R_d e o coeficiente de dispersão D (ŠIMŮNEK *et al.*, 2008). O pacote determina os parâmetros de transporte de solutos por meio de concentrações obtidas em laboratório (problema inverso) ou prevê as concentrações de solutos em condições de escoamento permanente (problema direto) através das soluções analíticas da equação de transporte de solutos de convecção-dispersão. O pacote inclui os seguintes modelos para problemas de transporte unidimensionais: CFITM (van GENUCHTEN, 1980), CFITM (van GENUCHTEN, 1981), CHAIN (van GENUCHTEN, 1985), 3DADE (LEIJ & BRADFORD, 1994) E N3DADE (LEIJ & TORIDE, 1997).

Figura 2-8 – Determinação do fator de retardamento R_d .

Fonte: Modificado de Shackelford (1994).

A Tabela 2-2 apresenta um resumo dos parâmetros que podem ser determinados através do ensaio de percolação em coluna e seus respectivos métodos para obtenção.

Tabela 2-2 – Parâmetros que podem ser determinados a partir do ensaio de percolação em coluna.

Parâmetro	Método para Cálculo	Características
Fator de retardamento (Rd)	I - Diretamente da curva de chegada para um valor correspondente a concentração relativa de $c/c_0 = 0,5$ (FREEZE & CHERRY, 1979); II - Calculando a área acima da curva de chegada (SHACKELFORD, 1994); III – Através de modelos teóricos (van GENUCHTEN & WIERENGA, 1986)	Método de Freeze & Cherry (1979) é indicado para solos de alta permeabilidade. Método de Shackelford (1994) é mais indicado para os solos de baixa permeabilidade
Coeficiente de Dispersão Hidrodinâmica (Dh)	Soluções analíticas, modelos teóricos e relações empíricas.	Compreende a somatória da difusão molecular e dispersão mecânica.
Número de Peclet (Pl)	Solução de Shackelford (1994) identificada no início do tópico.	Permite identificar o tipo de transporte predominantes. Se $Pe < 1$ o efeito de difusão é dominante, caso $Pe > 50$, significa que o processo predominante é o de advecção.

Fonte: Modificada de Silva (2005).

2.5 EXPANSÃO

Segundo Nelson & Miller (1992), a expansão de um material pode ser explicada fundamentalmente pelos seguintes fatores: propriedades do material, condições do meio ambiente e do estado de tensões a que se encontra submetido.

Para que um solo seja potencialmente expansivo é necessário que esteja na condição não saturada. Assim, quando o seu teor de umidade sofre alguma alteração devido à sucção e eventual saturação a atividade expansiva se manifesta (FREDLUND & RAHARDJO, 1993).

Os fatores que afetam a expansibilidade podem ser classificados em intrínsecos e extrínsecos. Os condicionantes intrínsecos correspondem as propriedades do material, como a composição mineralógica, textura e estrutura. Estes fatores podem determinar a capacidade expansiva teórica. Os condicionantes extrínsecos são: disponibilidade hídrica, biota e atuação antrópica, sendo que estes podem determinar a concretização do potencial expansivo (CHEN, 1988).

A expansibilidade dos solos, geralmente, está relacionada à quantidade de material argiloso presente e principalmente ao tipo de mineral existente na fração argila. Os argilominerais de maior característica expansiva são aqueles que apresentam estrutura 2:1, as esmectitas, mais especificamente as vermiculitas e

montmorilonitas. O fenômeno também está presente nos minerais interestratificados que possuem espécie expansiva, como a montmorilonita com clorita e mica com vermiculita. Outros fatores condicionantes são: a porosidade, a orientação mineralógica, a cimentação, o perfil estratigráfico, a espessura do solo, a descontinuidade litológica, entre outros (MITCHELL, 1976; CHEN, 1983).

As argilas expansivas, como a bentonita, são amplamente empregadas na construção de barreiras de proteção ambiental. O uso deste material é indicado em locais onde o solo apresenta característica inadequada à construção das barreiras (DANIEL, 1993). Segundo Rowe (2000) é importante estabelecer uma proporção ótima de bentonita e teor de umidade ótima para cada caso específico.

O uso integrado de cimento e argilas expansivas em barreiras de proteção ambiental pode ser benéfico, pois ambos os materiais são capazes de promover alterações nas propriedades hidráulicas do solo. Quando empregado em solos altamente argilosos, o cimento pode promover uma redução do potencial de expansão. Como o material argiloso é capaz de reagir com o cimento, uma maior cimentação do solo pode ser promovida (INGLES & METCALF, 1972; ADASKA, 1985; PRUSINSKI & BHATTACHARJA, 1999). Assim, em situações nas quais há apenas solos arenosos disponíveis, misturas de solos arenosos com argilas e cimento podem ser benéficas para o uso em barreiras de proteção.

2.6 CONTRAÇÃO

A contração e posterior fissuramento devido a perda de umidade pode ser observado principalmente em material argiloso expansivo. Com a perda de umidade ocorre uma redução de volume do solo devido a diminuição dos espaços entre as partículas de argila. As poropressões provocam um aumento na tensão efetiva do solo e conseqüentemente uma redução de volume. Como esta tensão atua em todas as direções o solo tende a contrair e, então, podem ocorrer fissuras (BILLINGS, 1954; GEORGE, 1968; KLEPPE & OLSON, 1985).

Segundo Freeze & Chery (1979) a presença de fissuras pode alterar as características hidráulicas da barreira de proteção e assim alterar o transporte de contaminantes, resultando em uma alteração da previsão dos processos de interação solo-contaminante. Portanto, o estudo do comportamento de expansão-contração e

fatores envolvidos é de vital importância para o projeto de barreiras de proteção ambiental.

Kleppe & Olson (1985) realizaram análises em amostras de solo argiloso e misturas areia-argila com o objetivo de avaliar o comportamento em relação à contração e à abertura de fissuras. Os ensaios realizados foram de contração volumétrica, abertura de fissuras e condutividade hidráulica. Foi observado que as fissuras aumentaram linearmente com o incremento do teor de umidade de compactação e que a adição de areia provocou um aumento na condutividade hidráulica, mas deixou as amostras mais resistentes ao fissuramento.

Omidi et al. (1996) testaram solos argilosos para barreiras de proteção e observaram aumento no valor de condutividade hidráulica quando estes materiais foram sujeitos a contração e fissuramento por perda de umidade.

Albrecht & Benson (2001) avaliaram amostras de solos utilizados em 8 barreiras de diferentes aterros nos EUA. O objetivo foi determinar a influência das condições de compactação, composição, mineralogia e número de ciclos de secagem na contração, fissuramento e condutividade hidráulica dos liners. Foi observado que a contração volumétrica é diretamente proporcional ao aumento da porcentagem de argila e índice de plasticidade.

2.7 PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA

Além dos parâmetros de condutividade hidráulica e retenção de contaminante é importante que os materiais utilizados para construção de barreiras de proteção ambiental tenham os parâmetros de resistência analisados. As barreiras estão sujeitas a diversos carregamentos. Podem sofrer solicitações devido à acomodação e peso próprio dos resíduos, cargas pontuais e eventuais mudanças de temperatura.

Na construção de aterros sanitários, por exemplo, as camadas de resíduos sólidos posicionadas sobre as barreiras podem atingir dezenas de metros de altura, causando uma compressão que deve ser suportada pela barreira sem comprometer sua função de isolamento.

Quando executadas sobre taludes, pode ocorrer à presença de superfícies de baixa resistência ao cisalhamento e que podem causar deslizamentos ou a ruptura. A

determinação dos parâmetros de resistência ao cisalhamento é, então, importante para a verificação da estabilidade das barreiras.

Segundo Sharma & Lewis (1994) a estabilidade dos aterros sanitários depende da análise das propriedades de suporte do solo, características de resistência dos resíduos, inclinação dos taludes, nível e movimentação do lixiviado dentro do aterro, tipo de cobertura e resistência da cobertura frente a erosão.

A resistência ao cisalhamento pode ser definida como um limite de resistência à deformação oferecida por uma massa ou amostra de solo quando submetida a um esforço de carregamento ou descarregamento (HEAD, 1986). Segundo Pinto (2002) a resistência ao cisalhamento dos solos é governada pelas propriedades de coesão e ângulo de atrito.

A ruptura dos solos é, quase sempre, um fenômeno de cisalhamento, pois as deformações em um maciço de terra são resultantes de deslocamentos relativos entre as partículas constituintes dos maciços (HEAD, 1986; PINTO, 2002)

O estudo da resistência ao cisalhamento de um solo pode ser realizado em laboratório através dos ensaios de cisalhamento direto e o ensaio de compressão triaxial.

2.8 ESTABILIZAÇÃO QUÍMICA COM CIMENTO

As misturas solo-cimento constituem um tipo de estabilização química do solo. Segundo Caputo (1987) estabilização química é a técnica que incorpora ao solo uma substância capaz de provocar um aumento da sua coesão ou que o impermeabilize, diminuindo a perda de resistência pela ação da água. A adição de resinas, cloretos, betumes, cimento e cal são exemplos de estabilizantes empregados neste procedimento.

A estabilização química do solo com cimento, de acordo com ABCP (1986), tem como produto as misturas de solo-cimento. Neste processo o solo é misturado com uma determinada quantidade de cimento e água. A dosagem dos constituintes da mistura deve ser definida através de ensaios de laboratório.

As principais aplicações do solo-cimento são: fabricação de tijolos, pavimentação de pátios industriais e estacionamentos de veículos, material para base

e sub-base de pavimentação, revestimentos de barragens de terra, construção de silos aéreos e subterrâneos, em canais de irrigação e outros (SEGANTINI, 2000).

A adição e mistura de cimento ao solo promove modificações na resistência à compressão, cisalhamento e flexão e módulos de elasticidade e permeabilidade (BUILDING RESEARCH ADVISORY BOARD, 1969).

Na estabilização química com cimento, os principais fatores que exercem influência nas propriedades das misturas são: tipo de solo, quantidade de cimento, teor de água, grau de compactação e o processo de mistura adotado (SILVEIRA, 1966).

O tipo de solo pode interferir na técnica de estabilização devido a quantidade de material fino, matéria orgânica e sulfatos presentes em sua composição. A experiência adquirida na utilização do solo-cimento em fins diversos mostra que é necessário a existência de aproximadamente 5% de finos e não mais que 35%, visto que para estabilizar um solo argiloso com cimento ou um solo granular sem finos é necessário uma quantidade muito grande de cimento (SILVEIRA, 1966; ADASKA, 1985).

A determinação do teor de cimento adequada, segundo Silveira (1966), deve ser feita através de procedimento experimental com ensaios de durabilidade e resistência à compressão simples. A dosagem do solo-cimento deve ser realizada através de ensaios com diferentes teores de cimento até se obter o menor teor capaz de estabilizar o solo e que atendam aos requisitos da aplicação do material (ABCP, 1986).

Ingles & Metcalf (1972) lembram que, para a estabilização química com cal ou cimento, é importante que sejam garantidas as condições de cura do solo tratado para permitir que as reações de duração lenta ocorram adequadamente.

A mistura de solo-cimento com solo argiloso é mais sensível a umidade do que misturas com solo arenoso. Quando misturado com solo argiloso é recomendado que seja feita a compactação com teor de umidade igual ou superior a ótima, e para solos arenosos deve ser igual ou levemente inferior à ótima (FREIRE, 1976).

O atraso na compactação é uma das principais causas de perda de resistência de misturas solo-cimento, pois após a mistura o processo de hidratação é iniciado e os produtos cimentantes começam a ser formados entre as partículas não

compactadas. Quando isso acontece a compactação da mistura é dificultada e a densidade final alcançada é menor (INGLES & METCALF, 1972).

O aumento de temperatura durante o processo de cura afeta as reações de estabilização e pode aumentar a resistência final do solo, porém temperaturas muito elevadas podem causar ressecamento e fissuramento do solo. Nos solos estabilizados com cal este efeito é mais evidente (INGLES & METCALF, 1972).

A técnica do solo-cimento modifica o solo através de reações químicas que ocorrem a partir da hidratação do cimento e mistura com o solo. O principal produto da hidratação do cimento é o silicato de cálcio hidratado (C-S-H). O C-S-H promove uma maior resistência e altera a matriz de poros do solo. O hidróxido de cálcio (CH) é outro produto importante, que disponibiliza cálcio para as reações de troca catiônica, floculação e aglomeração das partículas de argila e através das reações pozolânicas aumenta a produção de C-S-H (MEHTA & MONTEIRO, 1994; PRUSINSKI & BHATTACHARJA, 1999).

As reações pozolânicas, segundo Transportation Research Board (1976), ocorrem entre a sílica e alumina do solo e o hidróxido de cálcio (CH) oriundo do cimento adicionado ao solo. Essas reações formam agentes estabilizantes como o C-S-H. As possíveis fontes de sílica no solo incluem os minerais de argila, quartzo, feldspatos, micas e outros silicatos e alumino-silicatos similares, tanto na forma cristalina como amorfa.

Segundo Adaska (1985) a ocorrência isolada das reações de troca catiônica, floculação e aglomeração das partículas de argila, causadas pela estabilização química com cal ou cimento, podem promover um aumento da condutividade hidráulica. Com as reações pozolânicas e, também, de hidratação do cimento os vazios são preenchidos e o material se torna mais denso, o que pode causar uma redução na condutividade hidráulica.

Diversos autores (SILVEIRA, 1966; INGLES & METCALF, 1972; ADASKA, 1985; PRUSINSKI & BHATTACHARJA, 1999; RIZZO & LOLLO, 2006; LOCH & PEJON, 2013) mostraram que as principais alterações resultantes da adição de estabilizantes químicos como cal ou cimento ao solo são redução do índice de plasticidade do solo, aumento da resistência à compressão, redução da variação volumétrica, aumento do peso específico e redução da condutividade hidráulica.

2.9 MISTURAS DE SOLOS

2.9.1 Misturas Solo-Cimento

A permeabilidade do solo-cimento apresenta, normalmente, uma função inversa do teor de cimento empregado, quando aplicado em solos arenosos. Nos solos argilosos, com grande quantidade de finos, é possível ocorrer um aumento da permeabilidade. A adição de aglomerantes hidráulicos como a cal ou o cimento levam a floculação e aglomeração das partículas do solo, como consequência da liberação de íons Ca^{2+} . Os solos argilosos, nesse processo, tendem a apresentar um aumento da permeabilidade. Porém com a ocorrência das reações pozolânicas e cimentantes há tendência de preenchimento dos vazios e densificação da matriz do solo, resultando, assim, numa redução da permeabilidade do solo.

As reações iniciais da estabilização química (troca de cátions, floculação e aglomeração) são as principais responsáveis pela alteração da plasticidade, retração e trabalhabilidade dos solos (ADASKA, 1985; PRUSINSKI & BHATTACHARJA, 1999).

Segundo Segantini (1994) e Rizzo & Lollo (2006) a adição de cimento ao solo promove uma redução da quantidade de vazios a medida que ocorre a cimentação entre os poros e interação com as partículas do solo. O peso específico seco do solo estabilizado tende a ser maior e o teor de umidade ótimo apresenta pequena elevação em relação ao solo natural.

Segundo Adaska (1985) o solo-cimento pode apresentar contração e eventuais fissuras se estiver sujeito ao ressecamento. O autor mostra dados de lagoas de estabilização onde foram encontradas fissuras com tamanhos inferiores a 1,6 mm e com espaçamento, para solos granulares, de 3 a 6 m. Segundo o autor não houveram alterações significativas na permeabilidade, porém não há dados suficientes na literatura que permitam esta avaliação para as situações de barreiras de proteção ambiental em aterros sanitários.

O solo-cimento apresenta comportamento similar ao concreto, com acréscimo dos valores de resistência ao longo do tempo. A resistência a compressão típica após 7 dias do solo-cimento é de 3,5 a 7,0 MPa e após 28 dias é de 5,5 a 10,0 MPa (ADASKA, 1985).

A percolação de agentes químicos pode provocar mudanças na estrutura do solo e alterar a sua condutividade hidráulica. A adição de cimento pode prevenir que estas alterações ocorram, garantindo que o solo apresente melhores propriedades físicas como resistência mecânica e menor permeabilidade.

Em testes realizados pela EPA (1983), liners de solo-cimento foram expostos à percolados de resíduos sólidos urbanos. O solo-cimento testado apresentou comportamento similar ao do concreto em relação ao avanço da resistência e se tornou menos permeável durante o tempo de exposição.

Broderick & Daniel (1990) realizaram testes de ataque químico em solos estabilizados com cal e cimento. Quatro tipos de solo foram ensaiados, caulinita, ilita, atapulgita e uma mistura de areia com bentonita. Tanto as amostras de solo-cal como de solo-cimento apresentaram condutividade hidráulica inferiores as amostras sem tratamento. Os autores recomendam mais estudos quanto à estabilização química com cal.

Ribeiro (2002) avaliou o efeito da adição do cimento em uma areia argilosa (SC) e observou uma redução na condutividade hidráulica. Rizzo (2004) ampliou os estudos e testou a DQO após a percolação de soluções de KCl e NaCl.

Knop (2007) empregou a técnica de mistura solo-cimento em amostras de areia, para avaliar o efeito sob a percolação de ácido sulfúrico. Foram utilizadas as variáveis: gradiente hidráulico, quantidade de cimento e concentração da solução e o uso de células edométricas modificadas para realização dos ensaios. O autor, no entanto, manteve constantes os valores de teor de umidade e massa específica aparente seca (ρ_d), desconsiderando o efeito da adição do cimento sob estas propriedades.

Korf (2011) utilizou o mesmo equipamento de Knop (2007) para realizar testes de adição de cimento em um solo argiloso com percolação de soluções de cádmio e chumbo. Foi utilizado um planejamento fatorial para avaliação dos experimentos que apresentou falta de ajuste e não foram obtidos modelos adequados. As variáveis testadas foram o teor de cimento, carga aplicada e pH da solução. Este autor também ignorou a modificação provocada pelo cimento e manteve o w e ρ_d constantes.

Loch (2013) avaliou misturas de solo-cal e solo-cimento e demonstrou que a técnica de projeto fatorial de experimentos pode ser empregada para avaliação de misturas de solo. Foram avaliadas as propriedades de condutividade hidráulica e

resistência à compressão simples, tais parâmetros foram descritos em função dos fatores w e teor de estabilizante.

2.9.2 Misturas Solo-Bentonita

Segundo Daniel (1993) o acréscimo de bentonita a um solo é recomendado quando este apresenta características inadequadas para a construção de barreiras de proteção. Uma quantidade pequena de bentonita pode causar uma diminuição em várias ordens de grandeza no valor da condutividade hidráulica de determinados tipos de solos.

Rowe (2000) comenta que existe uma quantidade adequada de bentonita a ser adicionada no solo que varia entre 4 e 10%. O autor lembra que não é recomendado seguir esse este parâmetro sem realizar ensaios para determinar o teor ótimo de bentonita para cada caso.

Daniel & Koerner (1995) relatam que a qualidade de uma bentonita pode ser avaliada através dos limites de Atterberg e de ensaios de expansão livre. Quanto maior for o limite de plasticidade e o limite de liquidez, melhor será a bentonita. Assim como, quanto maior a capacidade de expansão de uma bentonita melhor a sua qualidade. O limite de liquidez (LL) de uma bentonita cálcica pode variar entre 100 e 150% e o LL de uma bentonita sódica varia entre 300 e 500%.

Lukiantchuki (2007) avaliou o comportamento hidráulico e mecânico de misturas solo-bentonita. Foi observado que para adições de bentonita acima de 5% as misturas foram indicadas para uso em barreiras de proteção.

Watabe et al. (2011) investigaram o efeito das frações areia-bentonita sobre a permeabilidade, realizando vários ensaios odeométricos em diferentes solos. Foi indicado que não há alteração na permeabilidade quando as partículas de areia são independentes na matriz argilosa. No entanto, a permeabilidade aumentou significativamente com o aumento da fração areia.

Barros (2013) verificou o comportamento hidráulico de misturas solo-bentonita para aplicação em barreiras de proteção e indicou o uso de uma adição de 4% ao solo estudado para atingir os critérios de projeto.

Dafalla (2013) verificou a influência da quantidade de argila e teor de umidade nos parâmetros de resistência ao cisalhamento de misturas solo-argila. Foi observado

que o aumento do teor de umidade acima do teor de umidade ótima causou uma diminuição no ângulo de atrito e na coesão.

Silva (2015) avaliou o comportamento hidráulico de misturas solo-bentonita para aplicação em barreiras impermeabilizantes em aterros sanitários. Os resultados mostraram que uma adição de 4% de bentonita ao solo avaliado provocou uma redução da condutividade hidráulica, chegando a valores na ordem de 10^{-10} m/s.

2.9.3 Misturas Solo-Cimento-Bentonita

Heineck et al. (2010) avaliaram misturas de solo-bentonita e solo-cimento-bentonita, para aplicação em barreiras verticais. Foi verificado que, após percolação de solução contaminante NaOH, as misturas com adição de cimento não apresentaram alteração nos valores de condutividade hidráulica, indicando que a matriz de cimento formada atenuou os efeitos da solução.

Elkady et al. (2014) realizaram ensaios de cisalhamento direto em misturas de areia-argila atapulgita compactada e cimento (faixa de bentonita de 0-60%) com o objetivo de definir a mistura mais econômica a ser usada para o núcleo argiloso de barragens de aterros e revestimentos de resíduos sólidos. O objetivo principal foi determinar a influência do teor de argila, condições iniciais de moldagem, tensão normal e condições de umidade no comportamento de resistência ao cisalhamento. A mistura de areia e argila com 10% de bentonita de 90% de areia foi a mistura mais econômica. A literatura mencionada descreveu a importância de otimizar a mistura areia-bentonita e investigar suas características de resistência, para integridade da estrutura; entretanto, os resultados podem depender do tipo de areia (gradação) e da bentonita usada.

Askarani & Pakbaz (2016) fizeram ensaios de cisalhamento direto em misturas de areia-bentonita com e sem adições de cimento. Foi concluído que a resistência ao cisalhamento drenada aumenta com a cimentação e tempo de cura.

2.9.4 Pesquisas anteriores com misturas de solos

Vários autores demonstraram que misturas de solo com bentonita, cal, cimento, o combinação de materiais podem promover uma redução na condutividade hidráulica

(K). Os trabalhos mais relevantes na avaliação de fluxo e transporte de contaminantes com misturas são apresentados na Tabela 2-3. A

Tabela 2-4 apresenta algumas pesquisas que determinaram parâmetros de resistência de misturas de solos.

Os tipos de solo identificados nas Tabela 2-3 e 2-4 seguem o padrão do Sistema Unificado de Identificação de Solos (ASTM D2487:2011). Na Tabela 2-3 são identificados também os tipos de mistura utilizados, os parâmetros de fluxo e atenuação de contaminantes avaliados e quais os contaminantes utilizados. Na Tabela 2-4 são identificados quais as misturas, os ensaios e propriedades avaliadas, que servem de comparação para este estudo.

Tabela 2-3 - Pesquisas na área de fluxo de contaminantes em barreiras.

Autor	Solo	Mistura	Medidas	Contaminantes
Broderick & Daniel (1990)	Arenoso	Bentonita-Cimento	K	$C_2H_4O_2$; C_2H_7NO ;
	Silte orgânico (OH) e Argila pouco plástica (CL)	Cimento; Cal	K	C_7H_{16} ; CH_4O ;
McCallister (1990)	Silte elástico (MH)	Cal	K	C_2HCl_3
Kenney et al. (1992)	Areia mal graduada (SP)	Bentonita	K	nd.
Ribeiro (2002)	Areia Argilosa (SC)	Cimento; Cal	K	NaCl
Basso (2003)	Areia argilosa (SC) e Argila inorgânica pouco plástica (CL)	Solos SC + CL	K, R_d , D_h	nd.
Azambuja (2004)	Areia siltosa (SM)	Bentonita-Cimento	K	KCl; $CuCl_2 \cdot 2H_2O$
Rizzo (2004)	Areia Argilosa (SC)	Cimento; Cal	K, DQO	nd.
Knop (2007)	Areia siltosa (SM)	Cimento	K, R_d , D_h	KCl; NaCl
Lukiantchuki (2007)	Areia Argilosa (SC)	Bentonita	K	H_2SO_4
Saha et al. (2008)	Argila pouco plástica (CL)	Bentonita; Cimento; Cal	C_0-C	nd.
Korf (2011)	Argila de alta plasticidade (CH)	Cimento	K, R_d , D^*	Pb; Cd; Cu; Ni
Soares (2012)	Silte de baixa plasticidade (ML)	Bentonita	K	Soluções de Cd e Pb
Loch (2013)	Areia mal graduada com argila (SP-SC)	Cal; Cimento	K	nd.
Wang et al. (2013)	Areia bem graduada (SW)	Bentonita	K	nd.

Nota: K – coeficiente de condutividade hidráulica, DQO - Demanda Química de Oxigênio, C_0-C - diferença de concentração, D^* - coeficiente de difusão efetiva, R_d - fator de retardamento, D_h - coeficiente de dispersão hidrodinâmica.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 2-4 - Pesquisas sobre parâmetros mecânicos para barreiras de proteção.

Autor	Solo	Mistura	Ensaio	Parâmetros
Cho et al. (2002)	Areia	Bentonita	RCS	q_u
Azambuja (2004)	Areia siltosa (SM)	Bentonita- Cimento	RCS, T	q_u, τ
Chew et al. (2004)	Argila	Cimento	RCS	q_u
Consoli et al. (2004)	Areia mal graduada (SP)	Cimento-Fibras	TR	q_u
Lukiantchuki (2007)	Areia Argilosa (SC)	Bentonita	RCS, T	q_u, τ
Visudmedanukul et al. (2007)	Bentonita e outros	Bentonita- Cimento		
Consoli et al. (2008)	Argila arenosa (CL)	Cimento	RCS	q_u
Vitali (2008)	Areia siltosa (SM)	Cimento	RCS	q_u
Consoli et al. (2009)	Areia mal graduada (SP)	Cimento	RCS	q_u
Fonseca & Consoli (2009)	Areia mal graduada (SP) e Areia siltosa (SM)	Cimento	RCS	q_u
Sachetti et al. (2009)	Areia siltosa (SM)	Cimento; Fibras	RCS	q_u
Consoli et al. (2011)	Silte (ML)	Cimento	RCS	q_u
Consoli et al. (2012a)	Areia mal graduada (SP)	Cimento	RCS, T	q_u, c, ϕ
Consoli et al. (2012b)	Silte inorgânico (ML)	Cal	RCS	q_u
Consoli et al. (2012c)	Areia siltosa (SM) e Areia mal graduada (SP)	Cimento	RCS	q_u
Soares (2012)	Silte de baixa plasticidade (ML)	Bentonita	CD	c, ϕ
Consoli et al. (2013)	Areia mal graduada (SP)	Cimento	RCS	q_u
Dingwen et al. (2013)	Silte de alta plasticidade (MH)	Cimento	RCS	q_u
Loch (2013)	Areia mal graduada com argila (SP-SC)	Cimento; Cal	RCS	q_u
Bittencourt et al. (2014)	Argila Arenosa (CL)	Cimento	RCS, CD	q_u, c, ϕ
Kumar & Dutta (2014)	Bentonita	Bentonita; Cal; Fibras	RCS	q_u
Ghazi (2015)	Areia mal graduada (SP)	Bentonita	RCS, CD	q_u, c, ϕ
Askarani & Pakbaz (2016)	Areia mal graduada (SP)	Bentonita; Cimento	CD	q_u, c, ϕ
Heineck et al. (2016)	Areia siltosa (SM)	Bentonita; Cimento	T	c, ϕ
Martins (2017)	Areia siltosa (SM)	Bentonita; Zeólita	RCS	q_u

Nota: RCS - resistência à compressão simples, T - triaxial, CD - cisalhamento direto, q_u - resistência à compressão não confinada, τ - resistência ao cisalhamento, c - coesão, ϕ - ângulo de atrito do solo.

Fonte: Elaborado pelo autor.

2.10 PROJETO E ANÁLISE DE EXPERIMENTOS

Os métodos de planejamento experimental são amplamente empregados na engenharia no desenvolvimento de novos produtos ou modificação de materiais existentes. Suas principais aplicações na engenharia envolvem a avaliação e comparação de configurações básicas, avaliação de materiais alternativos, seleção de parâmetros que determinem o melhor comportamento de um produto sob determinada circunstância e melhore o seu desempenho (MONTGOMERY, 2009).

O uso de técnicas estatísticas permite estudar diversas variáveis simultaneamente, separando seus efeitos; determinar a confiabilidade dos resultados; selecionar as variáveis que influem num processo com número reduzido de ensaios; e representar o processo estudado através de expressões matemáticas (MONTGOMERY & RUNGER, 2003; HINKELMAN & KEMPTHORNE, 2008; MONTGOMERY, 2009).

A estatística, segundo Montgomery & Runger (2003), trata da coleta de dados, apresentação, análise e o uso dos dados para tomada de decisões, resolução de problemas e design de produtos e processos. A Figura 2-9 descreve o método de engenharia para planejamento e análise de experimentos com uso de ferramentas estatísticas.

Figura 2-9 - Método de planejamento dos experimentos.

Fonte: Modificado de Montgomery & Runger (2003).

2.10.1 Planejamento Fatorial de Experimentos 2^K

Muitos fenômenos ou processos envolvem o estudo do efeito de dois, três ou vários fatores. Com o projeto fatorial de experimentos em toda e qualquer rodada e réplica dos ensaios todas as combinações possíveis dos fatores em seus diferentes

níveis é investigada. Se um processo conta com x níveis do fator X e y níveis do fator Y , então cada réplica de experimentos contará com xy níveis (MONTGOMERY, 2009).

Uma propriedade que é regida por 3 variáveis (x_1 , x_2 e x_3) pode ser avaliada por um planejamento fatorial 2^3 , onde cada um dos fatores conta com dois níveis de variação (Figura 2-10 a). Como este fatorial conta com dois pontos de variação para cada fator, permite apenas a obtenção de um modelo linear (MYERS et al., 2009).

Uma maneira de otimizar os ensaios, permitir a obtenção de um modelo quadrático e reduzir a quantidade de amostras é a adoção de um planejamento composto central. Neste projeto fatorial é adicionado um ponto central e, assim, cada fator pode ser descrito por 3 níveis. Para garantir o ajuste de segunda ordem das superfícies de resposta é recomendável, além dos pontos centrais, o uso de pontos axiais, localizados fora do intervalo de variação dos fatores. O modelo, então, adquire a forma apresentada na Figura 2-10 b. O planejamento fatorial 2^3 composto conta com 16 pontos, sendo 8 pontos dos ensaios 2^3 , 6 pontos axiais e mais 2 pontos centrais (BOX & HUNTER, 1957; BOX & DRAPPER, 2007; HINKELMAN & KEMPTHORNE, 2008; MONTGOMERY, 2009; MYERS et al., 2009).

Figura 2-10 - Representação espacial dos ensaios de um planejamento fatorial 2^3 simples (a) e composto com adição de pontos axiais e central (b).

Fonte: Modificado de Montgomery (2009).

Este procedimento de modelagem de uma determinada propriedade com o uso do planejamento fatorial composto central 2^3 foi utilizado por diversos autores em diferentes áreas de pesquisa (CARVALHO et al., 1997; RAMÍREZ et al., 2001; GAO et al., 2002; GÜRSES et al., 2002; ARBIZU & PÉREZ, 2003; BURKERT et al., 2004; OBENG et al., 2005; CAPELLA-PEIRÓ et al., 2006; BOUAID et al., 2007; CHO & ZOH, 2007; ZHANG et al., 2007; ASLAN, 2008) e permitiu a determinação da influência e significância dos fatores variáveis com uma maior confiabilidade nos resultados.

2.10.2 Planejamento Fatorial de Experimentos 3^k

Uma propriedade que pode ser descrita em função de 2, 3 ou mais variáveis independentes pode ser avaliada por um planejamento fatorial 3^k , onde cada um dos fatores conta com três níveis de variação. Este tipo de fatorial é útil para descrever modelos que apresentam curvatura, pois permite a obtenção de um modelo quadrático (MONTGOMERY, 2009; MYERS et al., 2009).

Se considerarmos um parâmetro que pode ser explicado por 2 variáveis, com a combinação dos 3 níveis de cada, teremos então 9 pontos (amostras ou misturas), conforme a Figura 2-11 (a). Se adicionarmos mais uma variável independente, também com 3 níveis, teremos 27 pontos (amostras ou misturas), conforme a Figura 2-11 (b). Considerando esta última situação, a fim de reduzir a quantidade de ensaios, é comum a utilização do fatorial 2^3 composto que exige a realização de apenas 16 pontos (HINKELMAN & KEMPTHORNE, 2008; MONTGOMERY, 2009).

Figura 2-11 - Representação espacial dos ensaios de um planejamento fatorial 3^2 (a) e 3^3 (b)

Fonte: Modificado de Montgomery (2009).

2.10.3 Análise de variância

A ferramenta estatística mais apropriada para análise e comparação entre diferentes grupos é a Análise de Variância (ANOVA), a qual permite uma avaliação completa dos dados. Utiliza-se esse método para avaliar numericamente a qualidade do ajuste do modelo (BARBETTA et al., 2004; HINKELMAN & KEMPTHORNE, 2008).

Considerando o tipo mais simples de experimento fatorial, com dois fatores, A e B , há a níveis do fator A e b níveis do fator B . A Tabela 2-5 apresenta o arranjo dos dados para um planejamento fatorial com dois fatores. O experimento tem n réplicas

e cada réplica contém todas as ab combinações dos tratamentos. Considera-se que a ordem das observações é aleatória.

Tabela 2-5 - Arranjo geral do projeto fatorial com dois fatores.

Planejamento fatorial dois fatores		Fator B			
		1	2	...	b
Fator A	1	$y_{111}, y_{112},$..., $y_{11n},$	$y_{121}, y_{122},$..., $y_{12n},$	...	$y_{1b1}, y_{1b2},$..., $y_{1bn},$
	2	$y_{211}, y_{212},$..., $y_{21n},$	$y_{221}, y_{222},$..., $y_{22n},$	...	$y_{2b1}, y_{2b2},$..., $y_{2bn},$
	...	...	...	...	...
	a	$y_{a11}, y_{a12},$..., $y_{a1n},$	$y_{a21}, y_{a22},$..., $y_{a2n},$	...	$y_{ab1}, y_{ab2},$..., $y_{abn},$

Fonte: Montgomery (2009)

Sendo que as observações y_{ijk} podem ser descritas pelo modelo dos efeitos:

$$y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \tau_{ii} + \beta_{jj} + \varepsilon_{ijk} \quad (\text{Eq.2-31})$$

Onde: $i = 1, 2, \dots, a$

$j = 1, 2, \dots, b$

$k = 1, 2, \dots, n$

μ = média global dos efeitos

τ_i = efeito do i -ésimo nível do fator A

β_j = efeito do j -ésimo nível do fator B

$(\tau\beta)_{ij}$ = efeito da interação dos fatores A e B

ε_{ijk} = componente aleatória do erro

A análise de variância é usada para testar as seguintes hipóteses:

$$H_0 : \tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_a = 0$$

$$H_1 : \text{pelo menos um } \tau_i \neq 0$$

$$H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_b = 0$$

$$H_1 : \text{pelo menos um } \beta_j \neq 0$$

$$H_0 : (\tau\beta)_{ij} = 0$$

$$H_1 : \text{pelo menos um } (\tau\beta)_{ij} \neq 0$$

A hipótese H_0 é aceita se todos os termos para a variável em questão forem nulos. Caso contrário, se pelo menos um dos efeitos não for nulo, a hipótese alternativa é aceita.

A análise de variância pode ser realizada obtendo-se o total de todas as observações do i-ésimo nível das variáveis ($y_{i..}$, $y_{.j.}$, $y_{ij.}$ e $y_{...}$) e definindo $\bar{y}_{i..}$, $\bar{y}_{.j.}$, $\bar{y}_{ij.}$ e $\bar{y}_{...}$ como as médias das linhas, colunas, células e total, respectivamente:

$$\begin{aligned} y_{i..} &= \sum_{j=1}^3 \sum_{k=1}^n y_{ijk} & \bar{y}_{i..} &= \frac{y_{i..}}{bn} \\ y_{.j.} &= \sum_{i=1}^3 \sum_{k=1}^n y_{ijk} & \bar{y}_{.j.} &= \frac{y_{.j.}}{an} \\ y_{ij.} &= \sum_{k=1}^n y_{ijk} & \bar{y}_{ij.} &= \frac{y_{ij.}}{n} \\ y_{...} &= \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \sum_{k=1}^n y_{ijk} & \bar{y}_{...} &= \frac{y_{...}}{abn} \end{aligned} \quad (\text{Eq. 2-32})$$

A próxima etapa da análise é a determinação da soma dos quadrados para A, B e AB, que consiste na soma dos quadrados das diferenças entre os valores de uma curva ajustada e os dados obtidos. A soma total dos quadrados (SQ_T), a soma subtotal dos quadrados (SQ_{ST}), a soma dos quadrados dos erros (SQ_E), a soma dos quadrados do tratamento A (SQ_A), a soma dos quadrados do tratamento B (SQ_B) e a soma dos quadrados da Interação (SQ_{AB}) podem ser escritas como:

$$SQ_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n y_{ijk}^2 - \frac{y_{...}^2}{abn} \quad (\text{Eq. 2-33})$$

$$SQ_A = \frac{1}{bn} \sum_{i=1}^a y_{i..}^2 - \frac{y_{...}^2}{abn} \quad (\text{Eq. 2-34})$$

$$SQ_B = \frac{1}{an} \sum_{j=1}^b y_{.j.}^2 - \frac{y_{...}^2}{abn} \quad (\text{Eq. 2-35})$$

$$SQ_{AB} = SQ_{ST} - SQ_A - SQ_B \quad (\text{Eq. 2-36})$$

$$SQ_{ST} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b y_{ij.}^2 - \frac{y_{...}^2}{abn} = SQ_A + SQ_B + SQ_{AB} \quad (\text{Eq. 2-37})$$

$$SQ_E = SQ_T - SQ_{ST} \quad (\text{Eq. 2-38})$$

Cada soma dos quadrados dividida pelos seus respectivos graus de liberdade corresponde a média dos quadrados (MQ_A , MQ_B , MQ_{AB} e MQ_E). A Tabela 2-6 apresenta a tabela de análise de variância (ANOVA).

Tabela 2-6 - Análise de variância para o projeto fatorial de dois fatores.

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Média dos Quadrados	F_0
Fator A	SQ_A	$a - 1$	$MQ_A = \frac{SQ_A}{a - 1}$	$F_0 = \frac{MQ_A}{MQ_E},$ $F_0 > F_{\alpha, a-1, ab(n-1)}$
Fator B	SQ_B	$b - 1$	$MQ_B = \frac{SQ_B}{b - 1}$	$F_0 = \frac{MQ_B}{MQ_E},$ $F_0 > F_{\alpha, b-1, ab(n-1)}$
Interação	SQ_{AB}	$(a - 1)(b - 1)$	$MQ_{AB} = \frac{SQ_{AB}}{(a - 1)(b - 1)}$	$F_0 = \frac{MQ_{AB}}{MQ_E},$ $F_0 > F_{\alpha, (a-1)(b-1), ab(n-1)}$
Erro	SQ_E	$ab(n - 1)$	$MQ_E = \frac{SQ_E}{ab(n - 1)}$	
Total	SQ_T	$abn - 1$		

Fonte: Modificado de Montgomery (2009).

A hipótese nula H_0 é rejeitada avaliando-se a estatística F_0 para um determinado nível de significância α ($p \leq \alpha$).

A variabilidade da resposta também pode ser avaliada através do coeficiente de determinação R^2 , explicado pelos fatores envolvidos.

$$R^2 = \frac{SQ_{MODELO}}{SQ_T} \quad (\text{Eq. 2-39})$$

$$SQ_{MODELO} = SQ_A + SQ_B + SQ_{AB} = SQ_{ST} \quad (\text{Eq. 2-40})$$

2.10.4 Modelo de regressão

Através da análise de regressão pode-se determinar qual a relação entre as variáveis de entrada ou independentes e a variável de saída ou dependente, descrevendo-a em uma equação matemática. Assim é possível encontrar o valor para a variável de saída gerada com todas as combinações possíveis, dentro dos intervalos

considerados para as variáveis independentes. O modelo de regressão pode, ainda, quantificar os valores das variáveis de entrada necessários para a obtenção da solução ótima (MONTGOMERY & RUNGER, 2003). A (Eq. 2-41) demonstra um modelo, sem interações entre os fatores.

$$Y = \beta_1 x_1 + \beta_{11} x_1^2 + \beta_2 x_2 + \beta_{22} x_2^2 + \varepsilon \quad (\text{Eq. 2-41})$$

Onde Y é a variável dependente, x_1 e x_2 são as variáveis independentes na forma linear, x_1^2 e x_2^2 são as variáveis independentes na forma quadrática, β_1 , β_2 , β_{11} e β_{22} são os coeficientes de regressão e ε o componente de erro aleatório. Pode, ainda, haver interação entre os fatores.

Segundo Charnet et al. (2008) as suposições básicas de um modelo de regressão linear, referentes ao erro ε , são: independência das variáveis erro (ε); homogeneidade das variâncias de ε ; normalidade de ε e relação linear entre y_i e x_i .

Quando se aplica a técnica de regressão às observações obtidas por meio de um experimento pode haver fatores não significativos para o projeto. Estes fatores devem ser descartados na elaboração da equação de regressão, considerando, então, apenas os fatores significantes (HINKELMAN & KEMPTHORNE, 2008).

2.10.5 Análise dos Resíduos

Segundo Montgomery (2009), a análise de variância é eficaz para avaliar a significância dos fatores envolvidos em um modelo, mas para que seja adequada é preciso que os erros sejam normalmente e independentemente distribuídos em torno de uma média zero e com uma variância constante.

Na prática os erros podem não seguir uma distribuição normal, portanto não é aconselhável confiar apenas na análise de variância. Além da verificação da falta de ajuste é recomendável verificar a validade do modelo conferindo a distribuição dos erros (HINKELMAN & KEMPTHORNE, 2008; MONTGOMERY, 2009).

A verificação da suposição da normalidade dos erros pode ser feita através da distribuição dos resíduos, visto que estes são as diferenças entre os valores experimentais e os preditos pela equação do modelo (MONTGOMERY, 2009).

Os resíduos de um modelo de regressão (e_i) podem ser obtidos através da (Eq. 2-42).

$$e_i = y_i - \hat{y}_i \quad (\text{Eq. 2-42})$$

Onde y_i corresponde à observação real e $\hat{y}_i$, ao valor ajustado previsto pelo modelo de regressão.

A análise de resíduos permite a verificação da suposição de que os erros são distribuídos de forma aproximadamente normal e com variância constante. Construindo um gráfico de probabilidade normal dos resíduos pode-se afirmar que os resíduos obedecem ou não a distribuição normal (MONTGOMERY et al., 2004b).

Outra maneira eficiente de analisar os resíduos pode ser feita através dos gráficos de resíduos vs. sequência temporal, y_i , $\hat{y}_i$ ou x_i . Estes gráficos (Figura 2-12) podem indicar várias inadequações dos modelos.

O padrão a apresentado na Figura 2-12 representa a situação ideal. Os padrões b-d da Figura 2-12 indicam deficiências no modelo. Na Figura 2-12 (b) a variância das observações pode estar crescendo com o tempo ou com a magnitude de y_i e x_i . Os gráficos com o padrão Figura 2-12 (c) também indicam desigualdade de variância. Os gráficos com residuais com a aparência de Figura 2-12 (d) mostram que o modelo não é linear. Quando a análise gráfica dos resíduos identifica uma anormalidade é possível solucionar o problema realizando transformações na variável resposta, y_i e/ou variável independente x_i (MONTGOMERY et al., 2004b).

2.10.6 Superfície de Resposta

O método de Superfície de Resposta abrange técnicas matemáticas e estatísticas para a modelagem e análise de problemas empíricos influenciados por várias variáveis e suas interações. Com um delineamento apropriado pode-se relacionar a resposta ou variável dependente com a entrada ou variáveis independentes. Tem-se como objetivo mapear a resposta dentro do intervalo estudado das variáveis, otimizar a resposta, e identificar a influência de cada uma das

variáveis independentes (BOX & DRAPPER, 2007; HINKELMAN & KEMPTHORNE, 2008; MYERS et al., 2009; MONTGOMERY, 2009).

Figura 2-12 – Padrões de comportamento para gráficos de resíduos: (a) satisfatório; (b) funil; (c) arco duplo; (d) não linear. O eixo horizontal pode ser o tempo, y_i , $\hat{y}_i$ ou x_i .

Fonte: Montgomery et al. (2004a).

O uso de procedimentos de modelagem de uma determinada propriedade usando metodologia do planejamento fatorial de experimentos e superfície de resposta é muito comum em diversas áreas (CARVALHO et al., 1997; GAO et al., 2002; CORREIA et al., 2004; CAPELLA-PEIRÓ et al., 2006; CHO & ZOH, 2007; CORREIA et al., 2010a; CORREIA et al., 2010b; LOCH et al., 2012) e tem permitido, em todos os casos relatados, obter uma maior confiança nos resultados e eficiência na determinação dos fatores influentes.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais utilizados (solo, bentonita sódica e o cimento), os equipamentos desenvolvidos e empregados e os métodos experimentais adotados.

3.1 MATERIAIS UTILIZADOS

3.1.1 Solo

O solo estudado é proveniente da cobertura de material inconsolidado da Formação Botucatu. As amostras de solo foram coletadas na cidade de São Carlos, região nordeste do Estado de São Paulo, Brasil.

Segundo IPT (1981), a Fm. Botucatu, no Estado de São Paulo, ocorre associada às serras basálticas. É mais provável que tenha se acumulado entre o Jurássico Médio-Superior e o Cretáceo Inferior pré-Aptiano.

A Fm. Botucatu ocupa uma área de aproximadamente 60% da superfície total do município de São Carlos-SP. E seu substrato rochoso é de difícil visualização, exceto em cortes de estradas (MURO, 2000). Segundo Fagundes (2010), os materiais inconsolidados dessa formação foram gerados pela alteração dos arenitos friáveis, e apresentam espessuras que podem passar os 10,0 m.

Os arenitos da Fm. Botucatu apresentam alta porosidade e permeabilidade. As regiões onde ocorrem afloramentos desta formação permitem uma maior infiltração de água, caracterizando-se como regiões de recarga de aquífero (PAIVA NETO, 1951; EMBRAPA, 2011; FAGUNDES, 2010).

Esta Formação apresenta grande continuidade e dimensão, e, deste modo compõem o principal sistema de aquífero do Brasil, conhecido como Aquífero Guarani. (EMBRAPA, 2011). As mesmas características que permitem a existência do aquífero, podem facilitar o transporte de contaminantes e poluir as reservas de água, por isso a escolha desse material e a preocupação com as barreiras de proteção.

3.1.1.2 Localização da Coleta

As amostras foram coletadas nas proximidades da rodovia SP – 310, com coordenadas UTM Fuso 23 (Córrego Alegre) E 209.748 m e N 7.551.410 m (Figura 3-1), a uma profundidade entre 1,0 e 1,5 m.

Figura 3-1 – Mapa de materiais inconsolidados da cidade de São Carlos e Localização do ponto de coleta.

Fonte: Modificado de Muro (2000).

Segundo classificação de Oliveira & Prado (1984) a amostra de solo coletada se encontra na região classificada como Areias Quartzosas profundas (AQ, álicas, A moderado) e Latossolo Vermelho Amarelo (LV-2, álico, A moderado, textura média, Unidade Coqueiro).

Conforme o Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos (EMBRAPA, 2009), a amostra é caracterizada como Neossolos Quartzarênicos Órticos. Este solo apresenta a textura areia ou areia franca em todos os horizontes até o contato lítico ou, no mínimo, até 150 cm de profundidade a partir da superfície do solo. É

essencialmente quartzoso, apresentando 95% ou mais de quartzo, calcedônia e opala, e é comum a ausência de minerais primários alteráveis.

3.1.2 Cimento

Foi utilizado o cimento Portland CP II-Z32, marca Itaú, comercializado pela Votorantim Cimentos. Segundo a NBR 11578:1991 este tipo de cimento Portland pode possuir a adição de 6 a 14% de pozolanas em sua composição e massa específica de 2,990 g/cm³. A sua resistência à compressão aos 28 dias deve ser maior ou igual a 32 MPa. O CP II-Z32 foi escolhido, pois é o tipo de cimento mais comercializado e utilizado na região.

3.1.3 Bentonita

A argila utilizada foi a BRASGEL AÇO DS (sódica ativada), fornecida pela Indústria Bentonit União Nordeste (BUN), localizada na cidade de Campina Grande – PB. Esta é uma argila esmectita naturalmente cálcica e modificada quimicamente para a forma sódica. As bentonitas sódicas apresentam elevado índice de inchamento e alta capacidade de troca de cátions.

3.1.4 Solução Contaminante

Serão determinados os parâmetros de fluxo e retenção frente a uma solução contaminante de cloreto de potássio (KCl). A avaliação deste material se justifica, pois é comum a presença de potássio em aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos e é uma solução de fácil manuseio. O objetivo é conhecer o comportamento da barreira compactada ao longo do tempo e seu efeito no retardamento da passagem da solução iônica.

A solução contaminante de KCl foi preparada com uma concentração de 0,023M, correspondente a 1713,5 mg/L de solução. O cálculo da concentração foi efetuado através da química estequiométrica dos compostos, baseado na massa atômica de cada íon.

3.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Os procedimentos experimentais foram executados nas seguintes etapas:

- 1) Coleta das amostras;
- 2) Caracterização dos materiais;
- 3) Dosagem das misturas e planejamento experimental;
- 4) Montagem dos equipamentos para ensaios;
- 5) Realização dos ensaios de laboratório;
- 6) Análise dos resultados.

Após a análise das características naturais das amostras foram feitas as misturas com cimento e argila, em laboratório. Foram produzidos também amostras padrão sem cimento e/ou argila para obter padrão comparativo.

3.3 COLETA DAS AMOSTRAS

O solo usado nesta pesquisa foi coletado em um talude de corte a uma profundidade entre 1,0 e 1,5 m (Figura 3-2). Foi removida a camada superior com maior quantidade de matéria orgânica e então feito o corte para coleta de amostra deformada. Também foram coletados três cilindros de amostras indeformadas para caracterização do solo em sua condição natural.

Figura 3-2 – Local de coleta das amostras de solo da Fm. Botucatu.

Fonte: Do autor.

3.4 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Foram realizados os seguintes ensaios de caracterização do solo: análise granulométrica conjunta (NBR 7181:1984), massa específica dos sólidos (NBR 6508:1984; NOGUEIRA, 1995), limites de Atterberg (NBR 6459:1984 e 7180:1984), pH do solo (Camargo et al., 2009), teor de matéria orgânica (NBR 13600:1996) e os parâmetros de compactação através de ensaios Proctor Normal (NBR 7182:1986).

A mineralogia da fração argila foi identificada por ensaios de Difração de Raios-X e Análise Térmica Diferencial (ATD), segundo os critérios de Grim (1953), Mackenzie (1957), Brindley & Brown (1980), Wilson (1987) e Santos (1989). Capacidade de Troca Catiônica (CTC) foi determinada de acordo com o método de Adsorção de Azul de Metileno descrito por Pejon (1992).

Para caracterização das misturas foram realizados ensaios de massa específica dos sólidos (NBR 6508:1984; NOGUEIRA, 1995), limites de Atterberg (NBR 6459:1984 e 7180:1984) e os ensaios de compactação foram realizados segundo a NBR 12023:2012. Também foram realizados ensaios de ATD e CTC para as diferentes misturas seguindo o mesmo procedimento descrito para amostras de solo.

3.5 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL DAS MISTURAS

Neste trabalho foi empregado o uso do planejamento fatorial de experimentos 2^k e 3^k , onde k representa a quantidade de variáveis independentes com dois e três níveis de variação cada, respectivamente.

Os níveis de variação de cada fator foram determinados após a realização de ensaios preliminares de caracterização. Foram utilizados os softwares Statistica 11 (STATSOFT, 2012) e Wolfran Matematica 9 (WOLFRAN, 2013) para o planejamento experimental, análise estatística e apresentação dos dados.

Para as misturas de solo-cimento-argila, os fatores fundamentais são a porcentagem de argila, o volume de cimento e o teor de umidade, resultando assim em um projeto 2^3 . Para avaliação do comportamento das misturas, então, é necessário a realização de 8 amostras ($2 \times 2 \times 2$).

Com a realização dos primeiros ensaios e obtenção dos dados foi possível estabelecer modelos de regressão linear. Através da análise de variância pode ser

verificado se o modelo linear é representativo ou não, e então optar pela adição de um ponto central e seis pontos axiais, assim, com três níveis de variação é possível obter um modelo com termos quadráticos.

Segundo Montgomery (2009) é recomendável utilizar, pelo menos, dois pontos centrais para um ajuste adequado dos modelos. Assim, um ajuste de segunda ordem pode ser alcançado com a realização de 16 ensaios, ou misturas.

Foram adotados dois níveis para cada fator mais um ponto central e pontos axiais, de modo que se tenha um intervalo de estudo capaz de mostrar a variação e influência da estabilização química com cimento e adição de argila.

Considerando os dados da literatura de pesquisas anteriores na área (Item 2.9.4) foram determinados os níveis inferiores e superiores de argila (3,0 e 9,0%) e de cimento (3,0 e 9,0%). Foi usado um nível intermediário de 6,0 % (ponto central) para ambas as variáveis e posteriormente foram definidos os pontos axiais considerando a rotabilidade do modelo (MONTGOMERY, 2009).

Foram realizadas misturas de solo-cimento e solo-argila para comparação e melhor entendimento do comportamento dos materiais. Para essas misturas foram utilizados os planejamentos 3^2 e 2^2 composto. Foram adotadas as mesmas variáveis e níveis principais usados para as misturas solo-cimento-argila.

Os níveis do teor de umidade foram determinados após a caracterização do solo pelo ensaio de Proctor, de modo que o intervalo adotado compreenda os valores de umidade ótima de cada um dos teores de estabilizante. Os traços de cada mistura estão descritos no capítulo 5.

Além das misturas solo-cimento-argila, solo-cimento e solo-argila, foram realizadas amostras padrão, apenas com solo sem o processo de estabilização para permitir a comparação dos resultados.

3.6 ENSAIO DE PERCOLAÇÃO EM COLUNA

Para a realização do ensaio de percolação foram montados dois equipamentos que são capazes de impor um gradiente hidráulico constante sobre os corpos-de-prova. O primeiro sistema, montado por Loch (2013), funciona através do controle da altura de coluna d'água. O segundo sistema trabalha com aplicação de carga por ar pressurizado.

3.6.1 Sistema por controle da altura da coluna d'água

Neste trabalho foram feitos dois equipamentos com sistema por controle da altura da coluna d'água (Figura 3-3 a), e também foi utilizado equipamento montado por Loch (2013) que possui o mesmo princípio para realização dos ensaios (Figura 3-3 b). Cada um destes equipamentos pode ser dividido em três partes distintas, são elas: sistema de alimentação e distribuição de fluido percolante, colunas de percolação e sistema de descarte do fluido percolado.

Figura 3-3 - Vista Geral dos Equipamentos de Percolação: (a) Equipamentos novos; (b) Equipamento de Loch (2013); (c) Reservatório para controle da altura da coluna d'água; (d) Coluna sobre a bancada principal; (1) Reservatórios afluentes; (2) Bancada Principal; (3) Provetas para coleta de efluente; (4) Bancada Inferior e (5) Colunas de percolação.

Fonte: Do Autor.

O sistema de alimentação e distribuição do fluido percolante é composto por reservatórios de água, reservatório intermediário e tubos de distribuição.

Cada um dos reservatórios de armazenagem (Figura 3-3) é ligado ao sistema através de registros gaveta. O abastecimento de água ou solução contaminante é feito através do primeiro reservatório. Como os demais reservatórios estão ligados em série, foi mantida uma reserva constante de solução.

O reservatório intermediário (Figura 3-4) possui um sistema de boia para manter o nível de água constante, servindo, assim, para o controle e regulagem da altura da coluna d'água aplicada sobre as colunas de percolação.

Figura 3-4 - Sistema de alimentação e distribuição do fluido: (1) Duto de Alimentação; (2) Reservatório intermediário e (3) Tubo de distribuição

Fonte: Loch (2013).

As células de percolação utilizadas neste trabalho foram baseadas nos equipamentos confeccionados por Musso (2008) e modificados por Souza (2009). Cada célula de percolação foi feita com tubos e placas de acrílico, que constituem, respectivamente, o cilindro e as bases. As placas servem para o fechamento de topo e base das colunas e possuem sulcos concêntricos para ajuste dos cilindros, evitando, assim, possíveis vazamentos. Em cada um dos sulcos foram utilizados *o-rings* para vedar a interface base-cilindro. Os cilindros apresentam 40 mm de altura e 94 mm de diâmetro interno. Em cada placa de acrílico foram feitos orifícios para a entrada ou saída de solução. As placas são fixadas através de quatro tirantes com roscas e porcas, após o encaixe com o cilindro (Figura 3-5).

Figura 3-5 - Peças da coluna de percolação: tubo e placas de acrílico com seus tirantes.

Fonte: Loch (2013).

As colunas foram dispostas sobre o tabuleiro principal, no qual foram instaladas conexões para leitura da percolação. A coleta de fluido percolado foi realizada com provetas, dispostas no tabuleiro inferior (Figura 3-3). Com as leituras do volume de líquido coletado, em função do tempo, foram obtidos os valores de vazão.

3.6.2 Sistema por controle de ar pressurizado

O sistema de percolação em colunas com aplicação de carga através de ar pressurizado foi baseado no equipamento construído por Leite et al. (1998), Boff (1999) e Leite (2000), modificado por Basso (2003).

Neste trabalho foram montados dois equipamentos completos com controle de ar pressurizado. Este ensaio em coluna conta com um equipamento que pode ser dividido em três partes: o sistema de alimentação, as colunas de solo e os reservatórios de coleta de efluente.

O sistema de alimentação é constituído pelos reservatórios da solução afluenta e sistema de aplicação e controle de pressão. É empregado um sistema de ar comprimido para aplicar pressão sobre a solução e forçar a percolação na coluna de solo. A solução é armazenada no reservatório afluenta e a pressão é imposta através de uma interface confeccionada por uma bexiga flexível. Assim, conforme o ar entra na bexiga, a pressão é transmitida para a solução no interior do reservatório. A Figura 3-6 mostra uma visão do sistema de ar pressurizado, reservatórios e colunas de percolação.

Figura 3-6 – Vista Geral dos Equipamentos de Percolação com aplicação de ar pressurizado (a e b): (1) painéis de controle de pressão de ar; (2) sistemas de distribuição e aplicação de ar; (3) reservatórios afluentes com interface de aplicação de pressão; (4) bancadas principais com colunas de percolação; (5) provetas para coleta do afluente e (6) bancadas inferiores.

Fonte: Do autor.

As colunas de percolação utilizadas são as mesmas do sistema por altura de coluna d'água. Da mesma maneira, são dispostas sobre o tabuleiro principal e a coleta do efluente é realizada através de provetas.

3.6.3 Moldagem dos Corpos de Prova

A moldagem dos corpos de prova pode ser dividida em duas etapas: mistura dos materiais e compactação.

No procedimento de mistura adotado (Figura 3-7) primeiramente é separada a quantidade de solo necessária e, então, foi adicionada a quantidade especificada de cimento Portland e bentonita. O solo, o cimento e a argila foram misturados completamente, até apresentar homogeneidade, perceptível pela coloração uniforme em toda a massa. Nesta mistura seca de solo e aditivos foi adicionada a água referente ao teor de umidade e feita a mistura até atingir novamente coloração uniforme. Após o procedimento foi executada a compactação.

As misturas foram realizadas seguindo uma ordem aleatória, gerada pelo software Statistica 11.0 (STATSOFT, 2012).

Figura 3-7 – Procedimento de mistura.

Fonte: Elaborado pelo autor.

A compactação das misturas de solo foi realizada no interior dos cilindros de acrílico usados diretamente no ensaio de percolação. Os corpos de prova foram moldados em duas camadas e compactados de forma estática com um macaco hidráulico. Antes da compactação da segunda camada foram realizadas escarificações no topo da camada anterior para aumentar a aderência. A massa utilizada em cada corpo de prova (M_{CP}) foi obtida através da (Eq. 3-1), apresentada por Nogueira (1995). Após compactação os espécimes apresentaram 94mm de diâmetro e aproximadamente 25mm de altura.

$$M_{CP} = V_{CP} \rho_d (1 + w) GC \quad (\text{Eq. 3-1})$$

Sendo que V_{CP} corresponde ao volume do corpo de prova, ρ_d a massa específica seca máxima da mistura de solo, w a umidade da mistura de solo e GC ao grau de compactação utilizado. A massa específica seca de cada mistura de solo foi obtida através dos ensaios de compactação Proctor Normal e o grau de compactação utilizado foi de 100%.

3.6.4 Montagem da Coluna de Percolação

A Figura 3-8 apresenta algumas etapas do procedimento de compactação e montagem das colunas de percolação.

Figura 3-8 – Procedimento de compactação e montagem da coluna de percolação: (a) Compactação do corpo de prova; (b) Escarificação da primeira camada; (c) Topo e base da coluna com o-rings na concavidade; (d) Pedras porosas e malhas de nylon; (e) Coluna de percolação montada; (f) Coluna ligada ao sistema.

Fonte: Loch (2013).

Após a realização da estabilização e compactação do solo, foram inseridas malhas de nylon (# 400 mesh) e pedras porosas no topo e base de cada cilindro. As malhas servem para manter a integridade dos corpos de prova. As pedras porosas, confeccionadas de acordo com o método de Stancati (1991), permitem uma melhor distribuição do fluido percolante.

Os cilindros foram, então, encaixados nas placas de base e topo e os tirantes foram tensionados. As colunas foram conectadas aos tubos de distribuição do fluido por meio de mangueiras flexíveis de silicone. A entrada de fluido foi feita através do orifício da base de cada uma das colunas e pelo orifício do topo foram realizadas as coletas para leituras de percolação e o descarte do fluido.

As colunas foram mantidas em saturação, sem carga hidráulica, por um período de 8 dias, para então serem submetidas ao gradiente hidráulico de ensaio e as medidas de vazão foram iniciadas.

3.6.5 Procedimento do Ensaio de Percolação

3.6.5.1 Etapa de Percolação de Água

Inicialmente foi utilizada água fornecida pela concessionária local, para saturação e avaliação da condutividade hidráulica. Posteriormente foi trocada por água deionizada.

Cada coluna de percolação possui mangueiras flexíveis de silicone para entrada e saída do fluido. Para a realização das leituras de vazão, a mangueira conectada a saída de cada coluna de percolação foi ligada a sua respectiva conexão de leitura (Figura 3-9). Sob cada conexão foi posicionada uma proveta graduada para leitura e coleta do fluido.

Durante a realização dos ensaios foram anotados em uma planilha os dados de coleta: data, hora, volume percolado, temperatura da solução e os parâmetros físico-químicos medidos.

A temperatura do ambiente foi controlada durante a execução dos ensaios, a fim de não promover grandes alterações na viscosidade dinâmica da água, o que interfere diretamente na condutividade hidráulica. Foi observado um intervalo de variação da temperatura de 21 a 24°C.

Figura 3-9 – Mangueira flexível ligada a conexão de leitura.

Fonte: Do autor.

3.6.5.2 Etapa de Percolação de Solução Contaminante

Nesta fase a percolação foi realizada com soluções aquosas de cloreto de potássio. O procedimento para leitura foi idêntico ao estabelecido na fase de percolação com água, porém foram estabelecidos o monitoramento da condutividade hidráulica e análise quantitativa dos íons K^+ e Cl^- . Também foi realizada a caracterização físico-química dos efluentes. A frequência dos intervalos de leitura foi diária, porém a coleta de efluentes foi realizada em intervalos entre 2 a 4 dias, dependendo da condutividade hidráulica.

3.6.6 Condutividade Hidráulica

Para a obtenção dos valores da condutividade hidráulica foram medidos os volumes de fluido percolado em determinados períodos de tempo, obtendo, assim, a vazão de cada corpo de prova. A condutividade hidráulica foi calculada aplicando-se a equação de Darcy (Eq. 6-4).

$$K = QiA = Q \frac{\Delta H}{L} A \quad (\text{Eq. 3-2})$$

Onde: k corresponde ao coeficiente de condutividade hidráulica, i é o gradiente hidráulico, A é a área transversal, L é a altura da amostra, ΔH é a carga hidráulica aplicada e Q é a vazão.

Segundo Caputo (1987) o coeficiente de condutividade hidráulica deve ser corrigido e expresso para uma temperatura de 20°C (Eq. 3-3) devido a alteração de viscosidade dos líquidos em função da temperatura ambiente.

$$K_{20} = K \frac{\eta_T}{\eta_{20}} \quad (\text{Eq. 3-3})$$

Sendo que K_{20} corresponde ao valor do coeficiente de permeabilidade corrigido, η_T a viscosidade da água a uma determinada temperatura e η_{20} a viscosidade da água a 20°C. A viscosidade da água (Eq. 3-4) varia conforme a temperatura (T) (Nogueira, 1995).

$$\eta_T = \frac{17,756 \cdot 10^{-4}}{1 + 0,0337T + 0,000221T^2} \quad (\text{Eq. 3-4})$$

3.6.7 Parâmetros Físico-Químicos do Efluente

Concomitante com as leituras de volume de efluente percolado foram realizadas as leituras de pH e condutividade elétrica (CE) das soluções efluentes e afluentes de cada amostra. As leituras de pH e de condutividade elétrica foram realizadas através de um pHmetro digital da Jenway, modelo 3540.

3.6.8 Análise Química Quantitativa do Efluente

Foram determinados os parâmetros de fluxo e retenção frente a uma solução contaminante de cloreto de potássio (KCl). As análises químicas do efluente foram realizadas no Laboratório de Geoquímica - Departamento de Geotecnia, da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) - Universidade de São Paulo (USP).

3.6.8.1 Potássio (K^+)

Segundo Tchobanoglous et al. (1993), a concentração de potássio típica em líquidos percolados de aterros sanitários está na faixa de referência de 200 a 1000 mg/L e em aterros antigos de 50 - 400 mg/L. A concentração de K^+ utilizada para a pesquisa foi de 899 mg/L.

Para a análise quantitativa de K^+ foi utilizada a técnica da fotometria em chama em um fotômetro da marca MICRONAL modelo B262. A faixa de leitura deste equipamento está entre 1 - 12 mg/L, portanto foi necessário diluir as amostras coletadas em água destilada deionizada.

3.6.8.2 Cloro (Cl^-)

A concentração de Cl^- utilizada para a pesquisa foi de 815 mg/L. A análise química deste ânion foi determinada através de um espectrofotômetro da marca HACH 2010. Assim, como o fotômetro de chama, as amostras coletadas foram diluídas em razões de acordo com o aumento da passagem de concentração de cloro pelo corpo-de-prova.

3.7 ENSAIO DE EQUILÍBRIO EM LOTE (BATCH TEST)

Os parâmetros de adsorção das misturas foram determinados através dos ensaios de Batch Test, seguindo as recomendações de Roy et al. (1992). O ensaio consiste na suspensão e agitação do solo seco em solução com determinadas concentrações químicas de seus elementos constituintes, até que o equilíbrio físico-químico seja estabelecido.

O ensaio de equilíbrio em lote foi realizado de acordo com o método ECI (*Environmental Conservative Isotherm*). A concentração de KCl usada foi de 0,023 M e as razões solo-solução adotadas variaram conforme a composição das misturas a fim de permitir a construção das isotermas de acordo com as indicações de Roy et al. (1992). Para agitação das amostras foi utilizada uma mesa agitadora de solos da marca Solab, com capacidade para 176 frascos.

3.7.1 Preparo das Amostras para o Batch Test

Foram realizados ensaios de equilíbrio em lote para todas as misturas de solo-cimento-argila. As amostras das diferentes misturas foram obtidas após os ensaios e contração. Foram selecionados os corpos-de-prova do ensaio de contração após 28 dias de cura. Os corpos-de-prova passaram pelo ensaio de contração e, após o fim do ensaio, foram particionados. Os corpos-de-prova foram desagregados até atingir a textura de pó. As amostras de cada mistura foram, então, identificadas e guardadas em embalagens individuais em um ambiente de temperatura controlada ($21^{\circ} \pm 2^{\circ} \text{ C}$) até o início do ensaio Batch.

3.7.2 Determinação do da Razão Solo:Solução

Inicialmente foi determinada a Razão Solo:Solução (RSS) usada no ensaio. A RSS corresponde à massa equivalente seca do solo a ser utilizada com um determinado volume da solução. Foram escolhidas, no mínimo, cinco razões para cada ensaio, em um intervalo na qual ao menos uma delas tivesse sorção entre 10-30% para ser usada, posteriormente, para determinar o tempo de equilíbrio da amostra. Foi realizada também uma amostra branca, em cada ensaio, para verificar a ocorrência de interação entre a fase líquida e a superfície do frasco utilizado no ensaio.

Em cada ensaio as amostras das misturas foram colocadas em tubos do tipo Falcon e, então, foi adicionado a solução contaminante. Os frascos contendo as amostras e solução foram posicionados em uma mesa agitadora de solo, com capacidade para até 176 amostras simultâneas. Foi realizada agitação por um período de 24 horas, com uma rotação de 100 rpm em um ambiente de temperatura controlada ($21^{\circ} \pm 2^{\circ} \text{ C}$).

Após período de agitação os tubos foram levados para uma centrífuga para realizar a separação entre as fases da solução. Após a centrifugação foi realizada a filtragem com papel filtro (filtração média, ϕ 15 cm) para separar a solução e os sólidos. A análise química da solução foi feita conforme descrito no item 3.6.8.

Os resultados de concentração inicial foram comparados com a concentração de equilíbrio da amostra branca. Conforme Roy et al. (1992), quando a diferença foi maior que 3%, os dados de sorção foram corrigidos.

3.7.3 Determinação do Tempo de Equilíbrio

A próxima etapa do ensaio de equilíbrio em lote foi a determinação do tempo de equilíbrio (TE) de uma RSS que teve um intervalo de 10-30% de adsorção para cada amostra. Nesta etapa é verificado o tempo mínimo de contato necessário entre a solução e a amostra de solo para que ocorra o processo de sorção máximo de soluto por essa amostra. Para esta etapa, as amostras foram agitadas em períodos de 1h, 12h, 24h, 48h e 72h para determinar a concentração de equilíbrio em cada intervalo de tempo.

Com os resultados da etapa de determinação do tempo de equilíbrio, foi calculada a taxa de mudança na concentração da solução nos diferentes intervalos. A taxa de mudança deve ser igual ou menor que 5% em um intervalo de 24h entre os diferentes períodos. Se isso for respeitado, as concentrações obtidas nas RSS no ensaio de 24h podem ser utilizadas para a construção da isoterma pelo método ECI.

3.7.4 Ajuste das Isotermas de Sorção

Após determinação das concentrações de equilíbrio e da sorção (S) foram realizados os ajustes linear, Freundlich e Langmuir. Cada isoterma de sorção tem seu comportamento característico e foi tratada de forma distinta.

O parâmetro do modelo linear foi obtido a partir do ajuste da reta da curva S vs. c_e , sendo o K_d o coeficiente angular da reta. Para os modelos de Freundlich e Langmuir foi preciso fazer a linearização dos dados para, então, obter os parâmetros.

Para linearizar a equação de Freundlich é preciso construir a isoterma em escala logarítmica em ambos em eixo, assim tem-se $\log S$ vs. $\log c_e$ (Eq. 3-5). Neste caso N se torna o coeficiente angular da reta e o $\log K_f$ o coeficiente linear (Roy et al., 1992).

$$\log S = \log K_f + N \log c_e \quad (\text{Eq. 3-5})$$

Existem duas linearizações recomendadas para o modelo de Langmuir. A primeira, Langmuir I (Eq. 3-6), é também chamada de Langmuir tradicional (ROY et al., 1992). Nesta condição o sistema original (S vs. c_e) deve ser transformado em c_e/S

vs. c_e . Depois de ajustadas a reta, tem-se como coeficiente angular $1/S_m$ e como intercepto $1/K_L S_m$.

$$\frac{c_e}{S} = \frac{1}{K_L S_m} + \frac{c_e}{S_m} \quad (\text{Eq. 3-6})$$

A segunda opção para linearizar o modelo de Langmuir, Langmuir II (Eq. 3-7), é através do sistema $1/S$ vs. $1/c_e$. Neste caso o coeficiente angular é $1/K_L S_m c_e$ e o intercepto é $1/S_m$ (Roy et al., 1992).

$$\frac{1}{S} = \frac{1}{K_L S_m c_e} + \frac{1}{S_m} \quad (\text{Eq. 3-7})$$

Como visto, através da linearização das equações é possível obter os parâmetros através de uma regressão linear simples. Considerando a equação da reta como ($y = a + bx$) a Tabela 3-1 apresenta um resumo das linearizações realizadas neste trabalho.

Tabela 3-1 – Resumo da linearização das equações das isotermas de sorção.

Ajuste	Linear	Freundlich	Langmuir I	Langmuir II
y	S	log S	c_e/S	$1/S$
a	--	log Kf	$1/K_L S_m$	$1/S_m$
b	Kd	N	$1/S_m$	$1/K_L S_m$
x	c_e	log c_e	c_e	$1/c_e$

Fonte: Do autor.

3.8 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

O ensaio de resistência à compressão simples seguiu as referências normativas da NBR 12025:2012 para as misturas de solo-cimento-argila (SCA) e solo-cimento (SC) e da NBR 12770:1992 para as misturas solo-argila (SA).

Segundo a NBR 12770:1992 materiais que contenham areia ou silte, ou ambos, frequentemente apresentam resistência maiores quando ensaiados em confinamento, como o solo avaliado apresenta uma quantidade baixa de finos optou-se pela realização dos ensaios não confinados.

A resistência à compressão simples permite uma avaliação adequada do parâmetro de resistência de modo prático e rápido. Com este ensaio foi determinado o comportamento das misturas de solo sem confinamento lateral.

O procedimento de mistura dos materiais para confecção dos corpos de prova foi apresentado no item 3.6.3. Os corpos-de-prova SCA e SC foram moldados de acordo com a NBR 12024:2012, com diâmetro de 100 mm e altura de 127,3 mm. A energia de compactação usada foi igual a do Proctor Normal resultando em uma energia de 583 KJ/m³ por unidade de volume. Os corpos-de-prova SA, também foram compactados na energia Normal, com diâmetro de 50 mm e altura de 100 mm (NBR 12770:1992).

Os corpos-de-prova foram submetidos à compressão simples no Equipamento Universal de Ensaio EMIC DL2000 , com capacidade máxima de 2000kgf, do Laboratório de Geossintéticos - Departamento de Geotecnia, da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) - Universidade de São Paulo (USP).

Durante a realização dos ensaios foi verificado que alguns corpos-de-prova apresentavam resistência superior a capacidade máxima da prensa EMIC DL 2000. Então optou-se pelo uso da Prensa de Ensaio da marca “MTS”, com capacidade de carga de 3000 kN do Laboratório de Mecânica das Rochas - Departamento de Geotecnia, da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) - Universidade de São Paulo (USP).

3.9 ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO

Os ensaios de cisalhamento direto foram realizados de acordo com a ASTM D 3080:2004 e tem como objetivo determinar os parâmetros de resistência do solo: coesão e ângulo de atrito. Foram compactados espécimes com diâmetro de 63 mm e altura de 25 mm.

O procedimento de mistura dos materiais para confecção das amostras foi apresentado no item 3.6.3. Os corpos-de-prova foram moldados em um anel bipartido (Figura 3-10), a compactação foi realizada de forma estática com um macaco hidráulico, semelhante ao procedimento usado para compactação das colunas. Depois de compactados os corpos-de-prova foram retirados do molde e armazenados em uma câmara úmida durante o período de cura. Ao final da cura os corpos-de-prova foram levados para o ensaio de cisalhamento direto.

Figura 3-10 - Molde utilizado para compactação dos corpos-de-prova de 63x25 mm (a) imagem e (b) esquema das peças: (1) compactador; (2) anel para colocação do material e (3) molde bipartido.

Fonte: Do autor.

Os ensaios foram realizados em uma prensa de cisalhamento, no Laboratório de Mecânica dos Solos - Departamento de Geotecnia, da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) - Universidade de São Paulo (USP).

Foram realizados ensaios de cisalhamento direto não inundados, com velocidade de 0,5 mm/min. A velocidade de cisalhamento adotada, sem os parâmetros de consolidação, não permitiu garantir condição drenada ou não-drenada das amostras.

3.10 ENSAIO DE EXPANSÃO

Os ensaios de expansão livre foram realizados segundo os procedimentos da ASTM D 4829:2011. Neste ensaio a amostra é imersa em um recipiente com água e mede-se a variação da altura da amostra em função do tempo, em relação à altura inicial para determinação do índice de expansão (IE). Os resultados são plotados em um gráfico de deformação (%) vs. tempo.

O procedimento de mistura dos materiais para confecção das amostras foi apresentado no item 3.6.3. Os corpos-de-prova foram compactados em um anel cilíndrico com altura de aproximadamente 21,5 mm e diâmetro de 73,0 mm com o auxílio de uma prensa automática (Figura 3-11).

Para realizar a compactação foi necessário um anel superior (Figura 3-11 a e b) que permitiu a colocação da massa de solo não compactada, um compactador e suportes de aço para a base e topo do conjunto (Figura 3-11 c).

Figura 3-11 – Esquema para compactação: (a) Molde com anel superior e amostra; (b) Molde com anel superior e compactador; (c) Prensa para compactação com conjunto; (1) compactador; (2) anel superior; (3) anel para compactação e (4) base metálica para suporte.

Fonte: Do autor.

Antes de cada compactação foram posicionadas as placas de base e topo. A compressão do conjunto foi realizada até ocorrer a união completa entre o anel superior e o compactador, indicando que a amostra foi compactada até o limite superior do anel metálico (molde) em que a amostra ficará contida. Posteriormente, cada anel metálico foi extraído do conjunto e as amostras junto aos seus respectivos anéis (Figura 3-12 a) foram levadas para uma câmara úmida onde ficaram armazenados durante o período de cura.

Para a realização do ensaio de expansão, cada amostra foi colocada dentro de um recipiente de acrílico (Figura 3-12 b), posicionada sobre uma pedra porosa de maneira a permitir fluxo de água na base inferior da amostra. Sobre a amostra de solo,

foi posicionada uma pequena placa de vidro e uma peça plástica cilíndrica, sobre a qual foi posicionado um relógio comparador (Figura 3-12 c).

O conjunto foi então inundado e foram realizadas medições do relógio após 1, 2, 4, 8, 15, 30, 60, 120, 240 e 480 minutos a partir do início do ensaio.

Figura 3-12 – (a) Corpo-de-prova do ensaio de expansão; (b) Esquema para realização do ensaio de expansão antes da inundação e (c) Câmara inundada - detalhe da parte superior do esquema de ensaio de expansão, com a ponta do relógio comparador posicionada sobre peça cilíndrica que está apoiada sobre a pequena placa de vidro.

Fonte: Do autor.

O índice de expansão foi calculado através da (Eq. 3-8). Sendo o H_1 a altura inicial da amostra em milímetros e o ΔH a diferença de altura, obtida entre a leitura final (D_2) e a leitura inicial (D_1) em milímetros.

$$IE = \frac{\Delta H}{H_1} \cdot 1000 \quad (\text{Eq. 3-8})$$

A Tabela 3-2 apresenta a classificação do potencial de expansão dos solos de acordo com os valores de IE (ASTM D 4829:2011).

Alguns autores estabeleceram sistemas de classificação do potencial de expansão dos solos em função dos limites de consistência. Chen (1983) elaborou uma classificação em função do índice de plasticidade e do limite de liquidez do solo (Tabela 3-3).

Tabela 3-2 - Classificação do potencial de expansão usando o IE

Índice de Expansão	Potencial de Expansão
0-20	Muito baixo
21-50	Baixo
51-90	Médio
91-130	Alto
>130	Muito Alto

Fonte: ASTM D 4829:2011.

Tabela 3-3 - Classificação do potencial de expansão usando o LL e IP.

Potencial de Expansão	IP	LL
Baixo	0 a 15	<30
Médio	10 a 35	30 a 40
Alto	20 a 55	40 a 60
Muito Alto	>35	>60

Fonte: Chen (1983).

3.11 ENSAIO DE CONTRAÇÃO

Foram realizados ensaios de contração em amostras com, aproximadamente, 50 mm de diâmetro e 50 mm de altura, moldados de acordo com a metodologia MCT (NOGAMI & VILLIBOR, 1995). O procedimento de mistura dos materiais para confecção das amostras foi apresentado no item 3.6.3.

A compactação dos corpos-de-prova foi realizada em duas camadas através de processo manual por meio do aparelho apresentado na Figura 3-13. Cada amostra foi compactada no interior de um cilindro metálico com 50 mm de diâmetro interno. A massa de mistura utilizada foi tal que permitisse confeccionar uma amostra com 50 mm de altura. Após a compactação da primeira camada foi realizada a escarificação do topo, de modo a garantir homogeneidade e impedir a formação de uma área de fragilidade e, então, foi realizada a compactação da segunda camada. A compactação foi controlada em relação a altura final de cada camada.

As amostras foram mantidas confinadas nos cilindros durante a etapa de cura das misturas. Foram posicionadas duas camadas de geossintéticos interceptadas por uma pedra porosa em ambas as extremidades dos corpos-de-prova e depois as amostras foram levadas para um sistema onde foi feita a saturação (Figura 3-13 b).

Após o período de saturação, as amostras foram extraídas dos cilindros de compactação (Figura 3-13 c). Logo após a extração (Figura 3-13 d), as amostras foram pesadas, e realizaram-se medições de altura e diâmetro com auxílio de um paquímetro.

Figura 3-13 – Ensaio de Contração - equipamentos e amostra: (a) compactador; (b) sistema de saturação dos corpos-de-prova; (c) extrator e (d) amostra saturada após extração.

Fonte: Do autor.

As amostras foram transportadas para suporte específico equipado com relógios comparadores (Figura 3-13), que permitiram a realização da medição da contração das mesmas à medida que a secagem e retração ocorreram. Foram realizadas leituras diárias até que se atingiu o equilíbrio.

Figura 3-14 – Corpos-de-prova preparados para ensaio de contração.

Fonte: Do autor.

3.12 AVALIAÇÃO DA ALTERAÇÃO MICROESTRUTURAL DO SOLO

Foram realizados ensaios de porosimetria por intrusão de mercúrio para avaliação da alteração microestrutural do solo provocada pela estabilização química com cimento e adição de bentonita.

Os ensaios de porosimetria foram realizados no Instituto de Física de São Carlos (IFSC) da Universidade de São Paulo (USP), com o equipamento PoreSizer 9320, da Micrometrics Instrument Corporation, que apresenta capacidade máxima de aplicação de 30.000 psi de pressão. Esta limitação do equipamento permite o preenchimento de poros maiores que 60Å (6 nm).

4. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

4.1 GRANULOMETRIA

A curva granulométrica obtida para o solo estudado é apresentada na Figura 4-1. Como pode ser observado, o solo apresenta grande quantidade das frações areia fina e média e uma pequena fração de argila e de silte. A Tabela 4-1 mostra as porcentagens das frações do solo.

Tabela 4-1 – Porcentagens das frações granulométricas do solo.

Fração Granulométrica		Porcentagem (%)
Argila (<0,002 mm)		5,9
Silte (0,002-0,06 mm)		4,1
Areia	Fina (0,06 – 0,2 mm)	45,7
	Média (0,2 – 0,6 mm)	44,0
	Grossa (0,6 – 2,0 mm)	0,6

Fonte: Do autor.

Como pode ser observada na Figura 4-2, a bentonita apresenta frações predominantes de silte e argila. A Tabela 4-2 mostra as porcentagens das frações da bentonita.

Figura 4-1 – Curva granulométrica do solo.

Fonte: Do autor.

Tabela 4-2 – Porcentagem das frações granulométricas da bentonita.

Fração Granulométrica		Porcentagem (%)
Argila (<0,002 mm)		82,7
Silte (0,002-0,06 mm)		16,5
Areia	Fina (0,06 – 0,2 mm)	0,8
	Média (0,2 – 0,6 mm)	0,0
	Grossa (0,6 – 2,0 mm)	0,0

Fonte: Do autor.

Figura 4-2 – Curva granulométrica da bentonita.

Fonte: Do autor.

4.2 ÍNDICES FÍSICOS

A Tabela 4-3 apresenta a massa específica dos sólidos e demais índices físicos do solo e na Tabela 4-4 são apresentados os dados da bentonita. Os índices foram obtidos através de ensaios em amostras indeformadas. Como se trata de um solo altamente arenoso não foi possível a obtenção dos limites de consistência.

Tabela 4-3 – Índices físicos e limites de consistência do solo.

ρ (g/cm ³)	ρ_s (g/cm ³)	ρ_d (g/cm ³)	w_{nat} (%)	e	η (%)	S_r (%)	LL	LP	IP
1,761	2,629	1,693	4,0	0,55	36,0	18,99	--	--	NP

Fonte: Loch (2013).

Tabela 4-4 – Massa específica dos sólidos e limites de consistência da bentonita.

ρ_s (g/cm ³)	LL (%)	LP (%)	IP (%)
2,649	420	63	357

Fonte: Do autor.

Onde: ρ – massa específica do solo; ρ_s – massa específica dos sólidos; ρ_d – massa específica aparente seca; w_{nat} – teor de umidade natural no momento da coleta; e – índice de vazios; η – porosidade; S_r – grau de saturação; LL – limite de liquidez; LP – limite de plasticidade; IP – índice de plasticidade.

Conforme o Sistema Unificado de Classificação dos Solos – SUCS (ASTM D2487:2011) o solo estudado pode ser identificado como SM (areia siltosa) e a bentonita como CH, argila de alta plasticidade. Segundo a classificação AASHTO M-145-91:2004, o solo pertence ao grupo A-2-4 (areia siltosa ou argilosa) e a bentonita ao A-7-6 (argila).

4.3 ENSAIO DE COMPACTAÇÃO PROCTOR NORMAL

Foram realizados ensaios de compactação Proctor na energia Normal para o solo natural (PD-01) e para cada mistura solo-cimento-argila. As curvas de compactação são apresentadas na Figura 4-3.

O solo estudado apresentou teor de umidade ótima (w_{ot}) de 6,4% e uma massa específica aparente seca máxima ($\rho_{d,máx}$) de 1,934 g/cm³.

Figura 4-3 - Curvas de compactação das misturas solo-cimento-argila.

Fonte: Do autor.

4.4 CAPACIDADE DE TROCA CATIÔNICA (CTC)

No ensaio de CTC foi utilizada a concentração de azul de metileno de 1,5g/l. Com os dados da fração argila dos materiais, obtidos no ensaio de análise granulométrica, foi possível obter o valor da atividade da fração argila. A Tabela 4-5 apresenta os resultados do ensaio de adsorção de azul de metileno.

Tabela 4-5 – Valores de CTC, SE, V_b e A_{cb} .

Material	CTC (mEq/100g)	CTC Arg (mEq/100g)	SE (m ² /g)	V_b (g/100g)	A_{cb} (g/100g)
Fm. Botucatu ^a	0,80	13,10	6,24	0,26	4,18
Bentonita ^b	137,9	160,36	1076,89	44,01	51,18

Fonte: ^a Loch (2013); ^b do autor.

Onde, CTC é a capacidade de troca catiônica, CTC Arg é a capacidade de troca catiônica da fração argila, SE é a superfície específica, V_b é o valor de azul de metileno e A_{cb} é a atividade do solo.

Segundo Pejon (1992), os resultados de CTC do solo (Tabela 4-5) indicam a presença de caulinita. O valor de V_b indica predomínio de caulinita e é possível que a amostra contenha pequena quantidade de illita. O valor de A_{cb} mostra que a argila presente no solo é pouco reativa. Os resultados da bentonita sódica comprovam que corresponde a uma argila do grupo da montmorilonita.

4.5 pH DO SOLO

Os dados de pH da amostra de solo da Formação Botucatu, determinados conforme Camargo et al.(2009), são apresentados na Tabela 4-6. Foi determinado o pH do solo dissolvido em água e em cloreto de potássio (1N), com uma proporção 1:2,5. O resultado do ΔpH do solo indica a predominância de cargas negativas em sua superfície.

Tabela 4-6 – pH do solo da Formação Botucatu.

pH (KCl)	pH (H ₂ O)	ΔpH
5,57	6,84	-1,27

Fonte: Loch (2013).

4.6 MATÉRIA ORGÂNICA NO SOLO (M.O.)

Silveira (1966) recomenda que, para melhor desempenho da estabilização química com cimento, o teor de matéria orgânica no solo não ultrapasse 2%. Foram realizadas quatro determinações de M.O. conforme a NBR NBR 13600:1996. Os resultados mostraram que a quantidade de M.O. das amostras de solo é de 0,4%.

4.7 ANÁLISE TÉRMICA DIFERENCIAL (ATD)

A Figura 4-4 apresenta as curvas de análise térmica diferencial para a Formação Botucatu e bentonita utilizada. As interpretações mineralógicas dos gráficos de ATD foram baseadas em Grim (1953), Mackenzie (1957), Wilson (1987) e Santos (1989).

Figura 4-4 – Termograma da amostra de solo da Formação Botucatu (a) e da bentonita (b).

Fonte: Do autor.

O termograma do solo da Fm. Botucatu (Figura 4-4 a) apresenta dois picos endotérmicos acentuados configurando os argilominerais gibsita e caulinita, e um pico exotérmico à 918°C da nucleação da mulita. A curva da amostra de bentonita (Figura 4-4 b) apresentou um pico endotérmico peculiar de argilominerais do grupo das esmectitas sódicas, e um segundo pico possivelmente do quartzo. Segundo Santos (1989), o pico que se destaca na bentonita é característico de argilominerais montmorilonítico sódico.

4.8 DIFRAÇÃO DE RAIOS-X (DRX) DO SOLO

A Figura 4-5 apresenta os difratogramas de raios X do solo da Formação Botucatu e da bentonita para a condição normal e com os tratamentos de aquecimento a 550°C e solvatação de etilenoglicol.

Foram identificados os picos predominantes e na Figura 4-5 são exibidos os valores correspondentes da distância interplanar basal, d (ângstrons). Os argilominerais e outros compostos presentes nas amostras foram identificados com base nas informações de Brindley & Brown (1980) e Moore & Reynolds (1989). São identificados na Figura 4-5: (G) gibbsite, (Ka) caulinita, (Qt) quartzo e (Mt) montmorilonita.

Figura 4-5 – Difratogramas de Raio-X do solo da Fm. Botucatu (a) e Bentonita (b) para os tratamentos: normal (N), Aquecido a 550°C (H) e Etilenoglicol (E).

Nota: 1) Difratorômetro de Raio-X utilizado nos ensaios possui tubo de cobre;

2) Para cada pico foi identificado o respectivo valor 2θ .

Fonte: Do autor.

5. CARACTERIZAÇÃO E DEFINIÇÃO DAS MISTURAS

Este capítulo apresenta os resultados da caracterização e definições das misturas. Primeiramente foram estabelecidos os fatores iniciais de cimento e argila com base na literatura (item 2.9.4), então foram realizados os ensaios de compactação para conhecer quais os teores de umidade ótimo das combinações. Após a realização destes ensaios foram definidos os níveis e os tipos de planejamento fatorial adotados. A definição das misturas é detalhada no item 5.3.

Foi estabelecida a nomenclatura com sigla do material utilizado, sendo C para cimento e A para argila, seguido do teor utilizado de cada material. Deste modo para as misturas solo-cimento-argila tem-se C-A-, para misturas solo-cimento tem-se C-A0 e para as misturas solo-argila C0A-, onde “-” é substituído pela porcentagem utilizada.

5.1 ENSAIO DE COMPACTAÇÃO PROCTOR NORMAL

Foram realizados ensaios de compactação Proctor na energia Normal para o solo natural (PD-01) e para cada mistura solo-cimento-argila. As curvas de compactação são apresentadas na Figura 5-1. O solo estudado apresentou teor de umidade ótima (w_{ot}) de 6,4% e uma massa específica aparente seca máxima (ρ_d) de 1,934 g/cm³.

Figura 5-1 - Curvas de compactação das misturas solo-cimento-argila.

Fonte: Do autor.

Foram observadas mudanças na curva de compactação para todos os teores de estabilizante e argila empregados. A Tabela 5-1 mostra os valores de w_{ot} e ρ_d para cada mistura solo-cimento-argila (SCA).

Tabela 5-1 – Valores da massa específica aparente seca e teor de umidade ótima para cada mistura SCA.

Mistura	Composição		w_{ot} (%)	ρ_d (g/cm³)
	C (%)	A (%)		
C3A3	3	3	9,4	1,961
C3A9	3	9	12,6	1,870
C6A1	6	0,955	8,4	1,952
C6A6	6	6	12,6	1,910
C6A11	6	11,045	13,0	1,815
C9A3	9	3	9,0	1,999
C9A9	9	9	12,2	1,895
C1A6	0,955	6	12,2	1,930
C11A6	11,045	6	11,0	1,922

Fonte: Do autor.

As curvas de compactação das misturas (Figura 5-1) são diferentes entre si e, com o aumento da quantidade de argila, apresentam tendência de aumento da w_{ot} . A massa específica seca máxima (ρ_d) aumentou nas misturas com menor quantidade de argila (0,955 e 3,0%). As misturas com teor de argila a partir de 6% apresentaram tendência de diminuição de ρ_d , quando comparadas com o solo compactado.

Também foram realizados os ensaios de compactação para as misturas solo-cimento e solo-argila. A Figura 5-2 apresenta as curvas de compactação das misturas com cimento e a Figura 5-3 das misturas solo-argila. A Tabela 5-2 apresenta os valores de massa específica seca máxima e teor de umidade ótimo das misturas solo-cimento e solo-argila.

A adição de cimento causou um aumento da massa específica aparente seca máxima e aumenta o teor de umidade ótima (Figura 5-2). A adição de argila reduziu o valor de massa específica seca máxima e aumentou o teor de umidade ótima (Figura 5-3).

Figura 5-2 - Curvas de compactação das misturas solo-cimento.

Fonte: Do autor.

Figura 5-3 - Curvas de compactação das misturas solo-argila.

Fonte: Do autor.

Tabela 5-2 - Valores da massa específica aparente seca e teor de umidade ótima para cada mistura SC e SA.

Mistura	Composição		w _{ot} (%)	ρ_d (g/cm³)
	C (%)	A (%)		
C3A0	3	0	6,5	1,940
C6A0	6	0	7,0	1,959
C9A0	9	0	8,5	1,990
C2A0	1,75	0	6,4	1,936
C10A0	10,24	0	8,9	1,999
C0A3	0	3	8,8	1,932
C0A6	0	6	12,8	1,900
C0A9	0	9	13,1	1,860
C0A2	0	1,75	8,6	1,932
C0A10	0	10,24	13,2	1,850

Fonte: Do autor.

5.2 MASSA ESPECÍFICA DOS SÓLIDOS

A Tabela 5-3 apresenta os valores de massa específica dos sólidos para as misturas SCA e a Tabela 5-4 para as misturas SC e SA.

Tabela 5-3 - Valores da massa específica dos sólidos para cada mistura SCA.

Mistura	Composição		ρ_s (g/cm³)
	C (%)	A (%)	
C3A3	3	3	2,615
C3A9	3	9	2,642
C6A1	6	0,955	2,558
C6A6	6	6	2,637
C6A11	6	11,045	2,709
C9A3	9	3	2,635
C9A9	9	9	2,671
C1A6	0,955	6	2,619
C11A6	11,045	6	2,670

Fonte: Do autor.

Tabela 5-4 - Valores da massa específica dos sólidos para cada mistura SC e SA.

Mistura	Composição		ρ_s (g/cm³)
	C (%)	A (%)	
C3A0	3	0	2,635
C6A0	6	0	2,641
C9A0	9	0	2,644
C2A0	1,75	0	2,634
C10A0	10,24	0	2,703
C0A3	0	3	2,646
C0A6	0	6	2,663
C0A9	0	9	2,674
C0A2	0	1,75	2,659
C0A10	0	10,24	2,692

Fonte: Do autor.

O ensaio para determinação de massa específica dos sólidos (NBR 6508:1984) pode apresentar variabilidade de leituras, o que pode justificar a ocorrência de valores de ps das misturas superiores aos valores dos materiais utilizados (Tabela 5-4). A adição de cimento e a adição de argila, conforme dados apresentados na Tabela 5-4, causa um aumento dos valores de massa específica dos sólidos.

5.3 DEFINIÇÃO DAS MISTURAS

Para o planejamento experimental das misturas solo-cimento-argila, foi utilizado um projeto fatorial 2^3 , variando-se os fatores: teor de cimento, quantidade de argila e teor de umidade.

Primeiramente foram estabelecidos os níveis de cimento em 3,0 e 9,0% e argila, também, em 3,0 e 9,0% (Tabela 5-5). O intervalo do teor de umidade (w) foi estabelecido após a execução dos ensaios Proctor, a fim de que os níveis adotados pudessem abranger os valores do teor de umidade ótima. Assim ficaram definidos os valores dos limites inferior e superior de w em 9,0 e 13,0 %. Considerando os pontos centrais e axiais as misturas foram estabelecidas conforme a Tabela 5-5.

Tabela 5-5 – Traços das misturas solo-cimento-argila (SCA).

Mistura	Composição			Sigla	
	w (%)	C (%)	A (%)	w-	C-A-
SCA01	9,0	3,0	3,0	W9	C3A3
SCA02	9,0	3,0	9,0		C3A9
SCA03	9,0	9,0	3,0		C9A3
SCA04	9,0	9,0	9,0		C9A9
SCA05	13,0	3,0	3,0	W13	C3A3
SCA06	13,0	3,0	9,0		C3A9
SCA07	13,0	9,0	3,0		C9A3
SCA08	13,0	9,0	9,0		C9A9
SCA09	7,636	6,0	6,0	W7	C6A6
SCA10	14,364	6,0	6,0	W14	C6A6
SCA11	11,0	0,955	6,0	W11	C1A6
SCA12	11,0	11,045	6,0		C11A6
SCA13	11,0	6,0	0,955		C6A1
SCA14	11,0	6,0	11,045		C6A11
SCA15	11,0	6,0	6,0		C6A6
SCA16	11,0	6,0	6,0		C6A6

Nota: w – teor de umidade; C – quantidade de cimento; A – quantidade de argila.

Fonte: Do autor.

Definidas as misturas de solo do planejamento fatorial, descritas na Tabela 5-5, foram adotadas as seguintes nomenclaturas: “SCA” para identificar as misturas solo-

cimento-argila, seguidas do número identificador da mistura. As amostras de solo natural foram identificadas como “PD”.

Para as misturas de solo-cimento (SC) foram realizados dois planejamentos fatoriais (3^2 e 2^2 composto). Foram estabelecidas na Tabela 5-6 as misturas SC referentes ao fatorial 3^2 e na Tabela 5-7 ao fatorial 2^2 composto. Foi adotado a nomenclatura de “SC-3” seguida do número da mistura para identificar as amostras de solo-cimento do fatorial 3^2 e foram nomeadas como “SC-2” seguidas do número de identificação as misturas de solo-cimento do fatorial 2^2 composto.

Tabela 5-6 - Traços das misturas solo-cimento (SC) com Fatorial 3^2 .

Mistura	Composição		Sigla	
	w (%)	C (%)	w-	C-A-
SC-301	6,4	3	W6	C3A0
SC-302	6,4	6		C6A0
SC-303	6,4	9		C9A0
SC-304	7,6	3	W7	C3A0
SC-305	7,6	6		C6A0
SC-306	7,6	9		C9A0
SC-307	8,8	3	W8	C3A0
SC-308	8,8	6		C6A0
SC-309	8,8	9		C9A0

Fonte: Do autor.

Tabela 5-7 - Traços das misturas solo-cimento (SC) com Fatorial 2^2 composto.

Mistura	Composição		Sigla	
	w (%)	C (%)	W-	C-A-
SC-201	6,4	3	W6	C3A0
SC-202	6,4	9		C9A0
SC-203	8,8	3	W8	C3A0
SC-204	8,8	9		C9A0
SC-205	5,9	6	W5	C6A0
SC-206	9,3	6	W9	C6A0
SC-207	7,6	1,75	W7	C2A0
SC-208	7,6	10,24		C10A0
SC-209	7,6	6		C6A0
SC-210	7,6	6		C6A0

Fonte: Do autor.

Para as misturas de solo-argila (SA) também foram realizados dois planejamentos fatoriais (3^2 e 2^2 composto). Foram estabelecidas na Tabela 5-8 as misturas SA referentes ao fatorial 3^2 e na Tabela 5-9 ao fatorial 2^2 composto. Foi adotada a nomenclatura de “SA-3” seguida do número da mistura para identificar as amostras de solo-argila do fatorial 3^2 e foram nomeadas como “SA-2” seguidas do número de identificação as misturas de solo-argila do fatorial 2^2 composto.

Tabela 5-8 - Traços das misturas solo-argila (SA) com Fatorial 3².

Mistura	Composição		Sigla	
	w (%)	A (%)	W-	C-A-
SA-301	6,4	3	W6	C0A3
SA-302	6,4	6		C0A6
SA-303	6,4	9		C0A9
SA-304	9,8	3	W10	C0A3
SA-305	9,8	6		C0A6
SA-306	9,8	9		C0A9
SA-307	13,2	3	W13	C0A3
SA-308	13,2	6		C0A6
SA-309	13,2	9		C0A9

Fonte: Do autor.

Tabela 5-9 - Traços das misturas solo-argila (SA) com Fatorial 2² composto.

Mistura	Composição		Sigla	
	w (%)	A (%)	W-	C-A-
SA-201	6,4	3	W6	C0A3
SA-202	6,4	9		C0A9
SA-203	13,2	3	W13	C0A3
SA-204	13,2	9		C0A9
SA-205	4,99	6	W4	C0A6
SA-206	14,6	6	W14	C0A6
SA-207	9,8	1,75	W10	C0A2
SA-208	9,8	10,24		C0A10
SA-209	9,8	6		C0A6
SA-210	9,8	6		C0A6

Fonte: Do autor.

5.4 LIMITES DE CONSISTÊNCIA

A Tabela 5-10 apresenta os resultados dos ensaios de limites de consistência (LL e LP) para a amostra de solo e misturas SCA.

As misturas foram classificadas quanto a plasticidade de acordo com as classes apresentadas por Burmister (1950), sendo que entre $1 < IP < 5$, podem ser consideradas como plasticidade leve, $5 < IP < 10$ baixa, $10 < IP < 20$ média, $20 < IP < 40$ alta e $IP > 40$ muito alta. A partir da adição de 6,0% de bentonita as misturas começaram a apresentar comportamento plástico, a mistura com 0,955% de bentonita e 6,0% de cimento (SCA-13) ainda demonstrou comportamento não plástico.

Tabela 5-10 – Limites de Consistência das misturas SCA.

Mistura	Composição		Limites de Consistência			Plasticidade*
	C (%)	A (%)	LL (%)	LP (%)	IP (%)	
PD-01	0	0	--	--	np	NP
SCA-01	3	3	--	--	np	NP
SCA-02	3	9	35	16	19	Média
SCA-03	9	3	--	--	np	NP
SCA-04	9	9	32	18	15	Média
SCA-05	3	3	--	--	np	NP
SCA-06	3	9	35	16	19	Média
SCA-07	9	3	--	--	np	NP
SCA-08	9	9	32	18	15	Média
SCA-09	6	6	22	17	5	Baixa
SCA-10	6	6	22	17	5	Baixa
SCA-11	0,955	6	26	17	9	Baixa
SCA-12	11,045	6	20	18	2	Leve
SCA-13	6	0,955	--	--	np	NP
SCA-14	6	11,045	31	20	12	Média
SCA-15	6	6	22	17	5	Baixa
SCA-16	6	6	22	17	5	Baixa

Nota: *Classificação de Burmister (1950).

Fonte: Do autor.

5.5 COMPORTAMENTO DAS MISTURAS

Através dos ensaios de compactação Proctor pode-se verificar a alteração nos teores de umidade ótima (w_{ot}) e massa específica seca máxima ($\rho_{d,máx}$) das misturas. A Figura 5-4 mostra os valores de w_{ot} em função das quantidades de cimento e argila. Os resultados de ρ_d são apresentados na Figura 5-5.

Figura 5-4 – Resultados do teor de umidade ótima para misturas SCA.

Fonte: Do autor.

O acréscimo de argila promove um aumento do teor de umidade ótima (Figura 5-4) e diminui os valores da massa específica seca máxima (Figura 5-5). O aumento do cimento apresenta um efeito contrário nas misturas.

Figura 5-5 - Resultados da massa específica seca máxima para misturas SCA.

Fonte: Do autor.

A Figura 5-6 apresenta os dados de w_{ot} e $p_{d,máx}$ das misturas de solo-cimento. Como pode ser observado, o acréscimo de cimento promove um aumento do teor de umidade ótimo e da massa específica seca máxima.

Figura 5-6 – Resultados de w_{ot} (a) e $p_{d,máx}$ (b) das misturas de solo-cimento.

Fonte: Do autor.

A Figura 5-7 apresenta os dados de w_{ot} e $\rho_{d,m\acute{a}x}$ das misturas de solo-argila. Como pode ser observado, o acrscimo de argila promove um aumento do teor de umidade timo e uma diminuio da massa especfica seca mxima.

Figura 5-7 - Resultados de w_{ot} (a) e $\rho_{d,m\acute{a}x}$ (b) das misturas de solo-argila.

Fonte: Do autor.

A Figura 5-8 apresenta valores da massa especfica dos slidos de algumas misturas solo-cimento-argila. Foi verificado que tanto o acrscimo de cimento, como o acrscimo de argila promoveu um aumento da ρ_s . Esse fato ocorre porque as massas especficas do cimento e da bentonita so maiores que a do solo.

Figura 5-8 - Resultados de ρ_s das misturas solo-cimento-argila.

Fonte: Do autor.

A massa específica dos sólidos do solo é de 2,629 g/cm³, a mistura com teor de cimento e argila de 3,0% e também para combinações com 0,955% dos fatores obtiveram valores inferiores de ρ_s (Tabela 5-3). Para todas as demais adições os valores foram superiores ao do solo.

A Figura 5-9 mostra os resultados de massa específica dos sólidos das misturas solo-cimento e solo-argila. Em ambos os casos todas as adições de cimento ou argila promoveram um acréscimo de ρ_s quando comparadas com o solo.

Figura 5-9 - Resultados de ρ_s das misturas solo-cimento (a) e solo-argila (b).

Fonte: Do autor.

O fato das misturas solo-cimento-argila com teores mais baixos de argila ou cimento apresentarem valores de massas específica dos sólidos inferiores ao do solo pode ser devida as reações e combinações entre os dois fatores que podem ter gerado novos compostos com menor massa específica.

6. FLUXO E TRANSPORTE DE ÁGUA E CONTAMINANTE

6.1 CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA (K)

Neste item são apresentados todos os resultados de condutividade hidráulica obtidos através dos ensaios de percolação em coluna.

6.1.1 Solo sem estabilizante

A Figura 6-1 mostra a curva de condutividade hidráulica x tempo do teste com solo sem estabilizante.

Houve um aumento do valor de K entre o período de 40 a 60 dias (Figura 6-1). Antes deste intervalo de tempo foi realizada a troca do abastecimento de água destilada, por água da concessionária para facilitar a realização conjunta das colunas de percolação (LOCH, 2013).

Fonte: Modificado de Loch (2013).

Os corpos-de-prova permaneceram intactos e foram sujeitos a substituição gradual do influente. Segundo os relatórios da SAAE (2013) houve presença de até

0,78 mg/L de fluoretos e 1,0 mg/L de cloro residual para os meses de janeiro a setembro de 2013. Portanto, o fluido influente apresentou composição diferente, o que pode justificar a alteração temporária da condutividade (LOCH, 2013).

Mesmo com diferença de resultados de K entre 40 e 70 dias, o resultado final apresenta tendência independente desta ocorrência e semelhante entre as demais amostras de solo avaliadas por Loch (2013).

A partir de 80 dias de percolação a mistura PD-01 apresentou resultados de K com variação menor que $1,0 \times 10^{-7}$ m/s.

6.1.2 Misturas SCA

A Figura 6-2 mostra as curvas de condutividade hidráulica $\times$ tempo das misturas solo-cimento-argila, para um período de 150 dias de percolação de água.

No período entre 110 a 150 dias todas as misturas apresentaram diferenças de medidas inferiores a $2,0 \times 10^{-8}$ m/s. As misturas com menores valores de K foram SCA-10, SCA-15 e SCA-16, e o maior K foi obtidos pela mistura SCA-02.

Fonte: Do autor.

A Tabela 6-1 apresenta os resultados da condutividade hidráulica (K) do solo sem estabilizantes (mistura PD-01) e das misturas SCA. São descritos os valores médios da condutividade ($\bar{K}$) e seus respectivos desvios padrão.

Tabela 6-1 - Composições das misturas e resultados de condutividade hidráulica.

Mistura	Composição			Condutividade Hidráulica (m/s)	
	w (%)	C (%)	A (%)	$\bar{K}$	Desv.
PD-01	6,4	0	0	3,000E-07	1,812E-08
SCA-01	9	3	3	1,976E-08	6,544E-09
SCA-02	9	3	9	5,380E-08	1,076E-08
SCA-03	9	9	3	2,768E-09	2,124E-09
SCA-04	9	9	9	2,649E-09	3,146E-09
SCA-05	13	3	3	3,048E-09	3,831E-09
SCA-06	13	3	9	2,708E-08	9,508E-09
SCA-07	13	9	3	3,481E-09	3,030E-09
SCA-08	13	9	9	3,699E-09	2,522E-09
SCA-09	7,636	6	6	4,778E-09	4,179E-09
SCA-10	14,364	6	6	3,859E-10	1,715E-10
SCA-11	11	0,955	6	1,653E-08	3,984E-09
SCA-12	11	11,045	6	1,464E-09	1,175E-09
SCA-13	11	6	0,955	5,447E-09	2,719E-09
SCA-14	11	6	11,045	3,411E-09	2,506E-09
SCA-15	11	6	6	4,012E-10	1,874E-10
SCA-16	11	6	6	4,451E-10	1,859E-10

Fonte: Do autor.

A Tabela 6-2 mostra os resultados da análise de variância dos dados experimentais da condutividade hidráulica das misturas de solo-cimento. Adotando um nível de significância (α) de 0,05, para o teste de hipóteses ($p \leq \alpha$ para a rejeição da hipótese nula), os fatores w linear (X_1), w quadrático (X_1^2), C linear (X_2), C quadrático (X_2^2), A linear (X_3), A quadrático (X_3^2) e as interações $X_1 \cdot X_2$, $X_1 \cdot X_3$ e $X_2 \cdot X_3$, mostraram-se significantes para o modelo " K_{SCA} ".

Tabela 6-2 - Análise de variância do K para as misturas SCA.

Fonte	Soma dos Quadrados	Graus de liberdade	Média dos quadrados	F	p
w (X_1)	1,762E-16	1	1,762E-16	182409	0,001491
w(X_1^2)	7,455E-17	1	7,455E-17	77174	0,002292
C (X_2)	9,925E-16	1	9,925E-16	1027393	0,000628
C (X_2^2)	2,414E-16	1	2,414E-16	249894	0,001274
A (X_3)	2,195E-16	1	2,195E-16	227215	0,001336
A (X_3^2)	1,128E-16	1	1,128E-16	116790	0,001863
$X_1 \cdot X_2$	2,553E-16	1	2,553E-16	264303	0,001238
$X_1 \cdot X_3$	1,171E-17	1	1,171E-17	12125	0,005781
$X_2 \cdot X_3$	4,202E-16	1	4,202E-16	434965	0,000965
Falta de ajuste	6,797E-16	5	1,359E-16	140720	0,002024
Erro	9,660E-22	1	9,660E-22		
Total	3,018E-15	15			

Fonte: Do autor.

O coeficiente de determinação (R^2) do K_{SCA} , que é explicado pelos fatores w , C e A foi de 0,77. A análise de variância mostra que há falta de ajuste ($p=0,0020 <$

$\alpha=0,05$), portanto o modelo linear não é adequado para descrever K em função de w , C e A .

Além da falta de ajuste, deve ser verificada a suposição da normalidade dos erros. A Figura 6-3 apresenta a distribuição dos resíduos do modelo K_{SCA} , como pode ser observado, os resíduos apresentam pequenos desvios da distribuição normal.

Fonte: Do autor.

Na Figura 6-4 foram plotados os valores de resíduos versus os valores previstos de K_{SCA} (10^{-8} m/s). O padrão de comportamento dos resíduos mostra que há uma tendência de aumento da variância diretamente proporcional com o aumento dos valores previstos.

Quando a variância dos resíduos não segue um comportamento com distribuição independente e aleatória é recomendável a transformação dos dados de resposta y para eliminar este problema (MONTGOMERY et al., 2004a).

Charnet et al. (2008) recomenda a transformação logarítmica na base e para estabilizar a variância quando esta tende a crescer com o aumento da variável resposta. A transformação $\ln(Y)$ também é indicada quando a relação entre as variáveis independentes e dependentes são do tipo exponencial.

Fonte: Do autor.

A Tabela 6-3 apresenta os valores médios de K e a transformação $\ln(K)$ realizada para regularizar a variância dos resíduos.

Mistura	Composição			Condutividade Hidráulica	
	w (%)	C (%)	A (%)	$\bar{K}$ (m/s)	$\ln(\bar{K})$
PD-01 *	6,4	0	0	3,000E-07	--
SCA-01	9	3	3	1,976E-08	-17,740
SCA-02	9	3	9	5,380E-08	-16,738
SCA-03	9	9	3	2,768E-09	-19,705
SCA-04	9	9	9	2,649E-09	-19,749
SCA-05	13	3	3	3,048E-09	-19,609
SCA-06	13	3	9	2,708E-08	-17,425
SCA-07	13	9	3	3,481E-09	-19,476
SCA-08	13	9	9	3,699E-09	-19,415
SCA-09	7,636	6	6	4,778E-09	-19,159
SCA-10	14,364	6	6	3,859E-10	-21,676
SCA-11	11	0,955	6	1,653E-08	-17,918
SCA-12	11	11,045	6	1,464E-09	-20,342
SCA-13	11	6	0,955	5,447E-09	-19,028
SCA-14	11	6	11,045	3,411E-09	-19,496
SCA-15	11	6	6	4,012E-10	-21,637
SCA-16	11	6	6	4,451E-10	-21,533

Fonte: * Loch (2013); Do autor.

Os resultados da análise de variância dos dados experimentais de K das misturas de SCA são exibidos na Tabela 6-4. Adotando um nível de significância (α) de 0,05, para o teste de hipóteses, os fatores w linear (X_1), w quadrático (X_1^2), C linear

(X_2), C quadrático (X_2^2), A linear (X_2), A quadrático (X_3^2) e as interações $X_1 \cdot X_2$, $X_1 \cdot X_3$ e $X_2 \cdot X_3$, mostraram-se significantes para o modelo $\ln(K)$. O modelo não apresenta falta de ajuste ($p = 0,0711 > \alpha$).

A proporção de variabilidade na medida de $\ln(K)$ que é explicada pelos fatores w, C e A, obtida na análise de variância, foi $R^2 = 0,86$. A equação final ajustada para o modelo pode ser representada pela (Eq. 6-1), na qual x_1 representa os valores do fator w, x_2 do fator C e x_3 do fator A.

Tabela 6-4 - Análise de variância do $\ln(K)$ para as misturas SCA.

Fonte	Soma dos Quadrados	Graus de liberdade	Média dos quadrados	F	p
w (X_1)	2,83677	1	2,83677	524,832	0,027771
w(X_1^2)	3,19895	1	3,19895	591,839	0,026154
C (X_2)	8,71625	1	8,71625	1612,595	0,015850
C (X_2^2)	10,07424	1	10,07424	1863,839	0,014743
A (X_3^2)	9,19052	1	9,19052	1700,341	0,015436
$X_1 \cdot X_2$	1,21551	1	1,21551	224,882	0,042390
$X_2 \cdot X_3$	1,25571	1	1,25571	232,319	0,041708
Falta de ajuste	4,42241	7	0,63177	116,885	0,071104
Erro	0,00541	1	0,00541		
Total	32,02303	15			

Fonte: Do autor.

$$\ln(K) = -0,3084 - 2,5393 \cdot x_1 + 0,0874 \cdot x_1^2 - 1,5711 \cdot x_2 + 0,0894 \cdot x_2^2 + 0,0478 \cdot x_3^2 + 0,0649 \cdot x_1 \cdot x_2 - 0,0804 \cdot x_2 \cdot x_3 \quad (\text{Eq. 6-1})$$

Para avaliar a adequação do modelo $\ln(K)$ foram plotados os gráficos da probabilidade normal dos resíduos (Figura 6-5) e a verificação dos resíduos versus valores previstos (Figura 6-6). Estes gráficos mostram que os valores residuais seguem uma distribuição normal e estão aleatoriamente distribuídos. Portanto, o modelo (Eq. 6-1) é adequado para descrever o comportamento de $\ln(K)$ como uma função do teor de umidade (w), e quantidade de cimento (C) e argila (A).

Figura 6-5 – Probabilidade Normal dos Resíduos $\ln(K)$.

Fonte: Do autor.

Figura 6-6 – Resíduos versus Valores Previstos $\ln(K)$.

Fonte: Do autor.

Foram feitas superfícies de resposta, a partir do modelo $\ln(K)$, fixando diferentes valores do teor de umidade. A Figura 6-7, representa a projeção da superfície de resposta de K (m/s), em função dos fatores C e A , fixando w em 9,0%, a Figura 6-8 em $w = 11,0\%$ e a Figura 6-9 em $w = 13,0\%$.

Figura 6-7 - Projeção da superfície de resposta de K (m/s) das misturas SCA (w=9,0%).

Fonte: Do autor.

Figura 6-8 - Projeção da superfície de resposta de K (m/s) das misturas SCA (w=11,0%).

Fonte: Do autor.

Figura 6-9 - Projeção da superfície de resposta de K (m/s) das misturas SCA (w=13,0%).

Fonte: Do autor.

As curvas da projeção da superfície de resposta de K identificaram uma região de “vale”, ou seja, de mínimo valor. Segundo o modelo de $\ln(K)$ para solo-cimento-argila (Eq. 6-1) com uma dosagem de $w = 11,56\%$, $C = 7,3\%$ e $A = 5,89\%$ pode ser obtido um ponto de menor valor de K, que corresponde a 7×10^{-10} m/s.

6.1.3 Misturas SC

A Figura 6-10 mostra as curvas de condutividade hidráulica x tempo das misturas solo-cimento (Fatorial 3^2), para um período de 150 dias de percolação de água.

No período entre 110 a 150 dias todas as misturas apresentaram diferenças de medidas inferiores a $5,0 \times 10^{-8}$ m/s. As misturas com menores valores de K foram SC-306 e SC-309.

Figura 6-10 - Curvas de condutividade hidráulica por tempo (solo-cimento).

Fonte: Do autor.

A Tabela 6-5 apresenta os resultados da condutividade hidráulica (K) do solo sem estabilizantes (mistura PD-01) e das misturas SC para o Fatorial 3^2 . São descritos os valores médios da condutividade ($\bar{K}$) e seus respectivos desvios padrão.

Tabela 6-5 - Composições das misturas SC (Fatorial 3^2) e resultados de K.

Mistura	Composição		Condutividade Hidráulica	
	w (%)	C (%)	$\bar{K}$ (m/s)	Desv.
PD-01 *	6,4	0	3,000E-07	1,812E-08
SC-301	6,4	3	6,915E-08	6,257E-09
SC-302	6,4	6	5,228E-08	1,168E-08
SC-303	6,4	9	1,192E-07	1,299E-08
SC-304	7,6	3	1,366E-07	1,239E-08
SC-305	7,6	6	1,285E-07	7,968E-09
SC-306	7,6	9	5,193E-08	2,227E-09
SC-307	8,8	3	3,186E-07	2,043E-08
SC-308	8,8	6	4,894E-08	2,152E-09
SC-309	8,8	9	6,718E-08	4,286E-09

Fonte: Do autor.

A Tabela 6-6 mostra os resultados da análise de variância dos dados experimentais da condutividade hidráulica das misturas de solo-cimento. Adotando um nível de significância (α) de 0,05, para o teste de hipóteses ($p \leq \alpha$ para a rejeição da hipótese nula).

Tabela 6-6 - Análise de variância do K para as misturas SC (Fatorial 3^2).

Fonte	Soma dos Quadrados	Graus de liberdade	Média dos quadrados	F	p
w (x_1)	1,42E-14	1	1,42E-14	3177,374	8,76E-13
C (x_2)	3,62E-14	1	3,62E-14	8109,006	1,30E-14
C (x_2^2)	9,22E-15	1	9,22E-15	2065,789	6,04E-12
$x_1 \cdot x_2$	4,42E-14	1	4,42E-14	9900,202	5,31E-15
$x_1 \cdot x_2^2$	9,67E-15	1	9,67E-15	2167,287	4,87E-12
$x_1^2 \cdot x_2$	2,20E-16	1	2,20E-16	49,292	6,18E-05
$x_1^2 \cdot x_2^2$	1,70E-14	1	1,70E-14	3820,983	3,83E-13
Falta de ajuste	3,77E-20	1	3,77E-20	0,008	0,928815
Erro	4,02E-17	9	4,46E-18		
Total	1,31E-13	17			

Fonte: Do autor.

A Tabela 6-6 também mostra que o modelo não apresenta falta de ajuste ($p = 0,9288 > \alpha$). A proporção de variabilidade na medida de K que é explicada pelos fatores w e C , obtida na análise de variância, foi $R^2 = 0,99$. A equação final ajustada para o modelo pode ser representada pela (Eq. 6-2), na qual x_1 representa os valores do fator w e x_2 do fator C . A Figura 6-11 representa graficamente o efeito de w e C sobre a condutividade hidráulica (K) em “m/s”.

$$\begin{aligned}
 K_{SC3} = & -2,049 \cdot 10^{-6} + 3,198 \cdot 10^{-7} \cdot x_1 + 1,540 \cdot 10^{-7} \cdot x_2 \\
 & + 1,644 \cdot 10^{-8} \cdot x_2^2 + 2,727 \cdot 10^{-8} \cdot x_1 \cdot x_2 - 8,735 \cdot 10^{-9} \cdot x_1 \cdot x_2^2 \\
 & - 7,554 \cdot 10^{-9} \cdot x_1^2 \cdot x_2 + 9,415 \cdot 10^{-10} \cdot x_1^2 \cdot x_2^2
 \end{aligned}
 \quad (\text{Eq. 6-2})$$

Para avaliar a adequação do modelo proposto pela (Eq. 6-2) foram plotados os gráficos da probabilidade normal dos resíduos (Figura 6-12) e a verificação dos resíduos versus valores previstos (Figura 6-13). Estes gráficos mostram que os valores residuais seguem aproximadamente uma distribuição normal (Figura 6-12) e estão aleatoriamente distribuídos (Figura 6-13). Portanto, o modelo (Eq. 6-2) é adequado para descrever o comportamento de K como uma função do teor de umidade (w) e quantidade de cimento (C).

Figura 6-11 - Projeção da superfície de resposta de K (m/s) das misturas SC (Fatorial 3^2).

Fonte: Do autor.

Figura 6-12 – Probabilidade Normal dos Resíduos (K) das misturas SC (Fatorial 3^2).

Fonte: Do autor.

Figura 6-13 - Resíduos versus Valores Previstos (K) das misturas SC (Fatorial 3²).

Fonte: Do autor.

6.1.4 Misturas SA

A Figura 6-14 mostra as curvas de condutividade hidráulica x tempo das misturas solo-argila (Fatorial 3²), para um período de 350 dias de percolação de água. Após 140 dias todas as misturas apresentaram valores de K inferiores a $6,0 \times 10^{-10}$ m/s. As misturas com menores valores de K foram SA-306 e SA-309.

A Tabela 6-7 apresenta os resultados da condutividade hidráulica (K) do solo sem estabilizantes (mistura PD-01) e das misturas SA para o Fatorial 3². São descritos os valores médios da condutividade ($\bar{K}$) em “m/s” e seus respectivos desvios padrão.

A Tabela 6-8 mostra os resultados da análise de variância dos dados experimentais da condutividade hidráulica das misturas de solo-argila. Adotando um nível de significância (α) de 0,05, para o teste de hipóteses ($p \leq \alpha$ para a rejeição da hipótese nula).

Figura 6-14 - Curvas de condutividade hidráulica por tempo (solo-argila).

Fonte: Do autor.

Tabela 6-7 - Composições das misturas SA (Fatorial 3^2), resultados de K.

Mistura	Composição		Condutividade Hidráulica	
	w (%)	A (%)	$\bar{K}$ (m/s)	Desv.
PD-01 ^a	6,4	0	3,000E-07	1,812E-08
SA-301	6,4	3	3,902E-10	2,627E-11
SA-302	6,4	6	4,598E-10	3,199E-11
SA-303	6,4	9	4,345E-10	1,555E-11
SA-304	9,8	3	4,915E-10	2,359E-11
SA-305	9,8	6	1,399E-10	2,192E-11
SA-306	9,8	9	1,776E-10	2,209E-11
SA-307	13,2	3	4,028E-10	2,455E-11
SA-308	13,2	6	2,771E-10	2,816E-11
SA-309	13,2	9	1,206E-10	1,575E-11

Fonte: ^a Loch (2013), do autor.

Tabela 6-8 - Análise de variância do K para as misturas SA (Fatorial 3^2).

Fonte	Soma dos Quadrados	Graus de liberdade	Média dos quadrados	F	p
w (x_1^2)	1,043E-19	1	1,043E-19	2382,827	3,186E-12
A (x_3)	3,915E-21	1	3,915E-21	89,410	5,690E-06
A (x_3^2)	6,459E-21	1	6,459E-21	147,521	6,947E-07
$x_1 \cdot x_3$	1,243E-21	1	1,243E-21	28,379	4,764E-04
$x_1 \cdot x_3^2$	1,497E-20	1	1,497E-20	341,788	1,815E-08
$x_1^2 \cdot x_3$	2,645E-20	1	2,645E-20	603,999	1,465E-09
$x_1^2 \cdot x_3^2$	3,396E-20	1	3,396E-20	775,519	4,822E-10
Falta de ajuste	2,110E-22	1	2,110E-22	4,820	0,056
Erro	3,941E-22	9	4,379E-23		
Total	3,447E-19	17			

Fonte: Do autor.

Conforme apresentado na Tabela 6-8 o modelo não apresenta falta de ajuste ($p = 0,056 > \alpha$). A proporção de variabilidade na medida de K que é explicada pelos fatores w e A, obtida na análise de variância, foi $R^2 = 0,998$. A equação final ajustada para o modelo pode ser representada pela (Eq. 6-3), na qual x_1 representa os valores do fator w e x_3 do fator A.

$$K_{SA3} = 4,352 \cdot 10^{-10} + 2,635 \cdot 10^{-12} \cdot x_1^2 + 9,366 \cdot 10^{-11} \cdot x_3 + 7,531 \cdot 10^{-12} \cdot x_3^2 - 2,220 \cdot 10^{-11} \cdot x_1 \cdot x_3 - 1,462 \cdot 10^{-12} \cdot x_1 \cdot x_3^2 + 1,001 \cdot 10^{-13} \cdot x_1^2 \cdot x_3 + 1,305 \cdot 10^{-13} \cdot x_1^2 \cdot x_3^2 \quad (\text{Eq. 6-3})$$

O modelo de regressão do valor de K das misturas de solo-argila (Eq. 6-3) apresentou uma disposição aproximadamente normal dos resíduos (Figura 6-15). Na Figura 6-16 foram plotados os valores de resíduos versus os valores previstos de K_{SA3} (10^{-8} m/s) e mostra que os resíduos estão aleatoriamente distribuídos. O modelo descrito pelas variáveis w e A é, deste modo, adequado para descrever o comportamento de K.

Figura 6-15 - Probabilidade Normal dos Resíduos (K) das misturas SA (Fatorial 3^2).

Fonte: Do autor.

Figura 6-16 - Resíduos versus Valores Previstos (K) das misturas SA (Fatorial 3²).

Fonte: Do autor.

A Figura 6-17 representa graficamente o efeito de w e A sobre a condutividade hidráulica (K) em “m/s”.

Figura 6-17 - Projeção da superfície de resposta de K (m/s) das misturas SA (Fatorial 3²).

Fonte: Do autor.

Para as misturas solo-argila ambos os fatores w e A influenciam na condutividade hidráulica. Todas as misturas atingiram valores de k inferiores a 10^{-9} m/s e, portanto, atendem os requisitos de permeabilidade para aplicação em barreiras de proteção ambiental.

6.2 RETENÇÃO DE CONTAMINANTES (RCO)

Neste item são apresentados todos os resultados de retenção de contaminantes obtidos através dos ensaios de percolação em coluna e de equilíbrio em lote.

6.2.1 Ensaios de Equilíbrio em Lote

A Tabela 6-9 apresenta os resultados do ajuste das isothermas lineares para as misturas de solo-cimento-argila. Também são expostos os resultados para o solo (BOT) e bentonita (BEN). São apresentados o coeficiente de distribuição (K_d), o coeficiente de determinação (R^2) e o fator de retardamento (R_d). As isothermas estão dispostas no APÊNDICE B. Para este ensaio foram realizadas amostras adicionais do ponto central para facilitar o ajuste do modelo.

Os resultados da análise de variância dos dados experimentais de R_d das misturas de SCA são exibidos na Tabela 6-10. Adotando um nível de significância (α) de 0,05, para o teste de hipóteses, os fatores w linear (x_1), w quadrático (x_1^2), C quadrático (x_2^2), A linear (x_3) e A quadrático (x_3^2) mostraram-se significantes para o modelo $R_{d,lin}$.

A Tabela 6-10 também mostra que o modelo não apresenta falta de ajuste ($p = 0,2889 \geq \alpha$). A análise de variância apresentou uma proporção de variabilidade de $R^2 = 0,8282$. A equação final ajustada para o modelo pode ser representada pela (Eq. 6-4), na qual x_1 representa os valores do fator w , x_2 do fator C e x_3 do fator A .

Tabela 6-9 - Resultados do ajuste das isotermas lineares para as misturas SCA.

Misturas	Composição			Linear		
	w (%)	C (%)	A (%)	Kd	R ²	Rd
BOT	-	-	-	2,2319	0,3185	17,4686
BEN	-	-	-	35,6400	0,8407	129,2196
SCA-01	9	3	3	1,0612	0,3194	9,1608
SCA-02	9	3	9	2,2076	0,9065	15,8435
SCA-03	9	9	3	1,4895	0,8840	13,4000
SCA-04	9	9	9	3,0892	0,9281	22,0489
SCA-05	13	3	3	1,0907	0,6936	9,3772
SCA-06	13	3	9	2,2513	0,9361	16,1373
SCA-07	13	9	3	1,5534	0,8474	13,9320
SCA-08	13	9	9	2,2287	0,9595	16,1857
SCA-09	7,636	6	6	2,1652	0,7134	16,2875
SCA-10	14,364	6	6	1,5397	0,7511	11,8711
SCA-11	11	0,955	6	1,7807	0,8224	13,7044
SCA-12	11	11,045	6	1,2459	0,5545	9,9781
SCA-13	11	6	0,955	1,1374	0,4785	9,6958
SCA-14	11	6	11,045	2,4651	0,9636	16,0588
SCA-15	11	6	6	3,1264	0,7657	23,0741
SCA-16	11	6	6	3,0059	0,5464	22,2233
SCA-17	11	6	6	3,1296	0,6721	23,0967
SCA-18	11	6	6	3,6260	0,5088	26,6016

Fonte: Do autor.

Tabela 6-10 - Análise de variância do resultado do Rd para as misturas SCA (isotermas lineares).

Fonte	Soma dos Quadrados	Graus de liberdade	Média dos quadrados	F	p
w (x ₁)	10,9853	1	10,9853	2,90468	0,186870
w (x ₁ ²)	108,9613	1	108,9613	28,81093	0,012658
C (x ₂ ²)	175,6340	1	175,6340	46,44015	0,006463
A (x ₃)	89,9382	1	89,9382	23,78096	0,016482
A (x ₃ ²)	142,8010	1	142,8010	37,75865	0,008670
Falta de ajuste	72,5366	9	8,0596	2,13108	0,288954
Erro	11,3458	3	3,7819		
Total	488,2544	17			

Fonte: Do autor.

$$Rd_{lin} = -56,1741 + 11,4617 \cdot x_1 - 0,5414 \cdot x_1^2 - 0,0058 \cdot x_2^2 + 4,3094 \cdot x_3 - 0,287874 \cdot x_3^2 \quad (\text{Eq. 6-4})$$

Para a análise dos resíduos (APÊNDICE B) foram plotados os valores de resíduos versus os valores previstos de $R_{d,lin}$. O padrão de comportamento dos resíduos mostra que há uma tendência de aumento da variância diretamente proporcional com o aumento dos valores previstos. Não foi possível estabelecer uma linearização simples dos dados, então optou-se por manter o modelo sem alterações.

A Figura 6-18 apresenta os valores de R_d para o ajuste linear das misturas SCA em função dos fatores C e A, para $w = 11,0\%$. Não houve variação significativa entre os diferentes teores de umidade, portanto apenas uma superfície foi apresentada.

Figura 6-18 - Projeção da superfície de resposta de $R_{d,lin}$ das misturas SCA, para $w = 11,0\%$.

Fonte: Do autor.

O teor de argila exerce maior influência na alteração dos valores de R_d , quando comparado com o teor de cimento. Para um mesmo teor de cimento, uma pequena variação na quantidade de argila causa uma diferença grande no fator retardamento.

A Figura 6-19 apresenta os valores de R_d para o ajuste linear das misturas SCA em função dos fatores w e A , para $C = 6,0\%$. A comparação entre os teores de argila e de umidade mostra que a argila promove maior diferença nos resultados de R_d .

A Tabela 6-11 apresenta os resultados do ajuste das isotermas pelo modelo de Freundlich para as misturas de solo-cimento-argila. Também são expostos os resultados para o solo (BOT) e bentonita (BEN).

Figura 6-19 - Projeção da superfície de resposta de $R_{d,lin}$ das misturas SCA, para $C = 6,0\%$.

Fonte: Do autor.

Tabela 6-11 - Resultados do ajuste das isotermas pelo modelo de Freundlich para as misturas SCA.

Misturas	Composição			Freundlich			
	w (%)	C (%)	A (%)	K_F	N	R^2	Rd
BOT	-	-	-	0,0347	1,6323	0,3868	17,6836
BEN	-	-	-	0,5779	1,6416	0,9538	132,0523
SCA-01	9	3	3	0,1343	1,3170	0,9095	9,5630
SCA-02	9	3	9	0,6650	1,1844	0,9454	16,0798
SCA-03	9	9	3	0,2589	1,2661	0,9259	13,4952
SCA-04	9	9	9	6,2951	0,8893	0,8991	21,8433
SCA-05	13	3	3	0,0019	1,9612	0,8951	9,5891
SCA-06	13	3	9	2,8347	0,9648	0,9438	16,1065
SCA-07	13	9	3	2,8163	0,9093	0,8421	13,8895
SCA-08	13	9	9	1,8425	1,0185	0,9649	15,1854
SCA-09	7,636	6	6	3,8761	0,9154	0,8846	16,6535
SCA-10	14,364	6	6	10,6709	0,7070	0,8633	11,7159
SCA-11	11	0,955	6	0,0195	1,6852	0,9837	14,0533
SCA-12	11	11,045	6	0,0102	1,7281	0,7611	10,2186
SCA-13	11	6	0,955	0,0000	1,7281	0,9748	10,1126
SCA-14	11	6	11,045	5,4843	0,8851	0,9795	16,7377
SCA-15	11	6	6	0,1705	1,4609	0,9931	26,1955
SCA-16	11	6	6	0,2553	1,3880	0,5007	24,3166
SCA-17	11	6	6	0,9976	1,1819	0,9830	24,4392
SCA-18	11	6	6	0,0000	2,7922	0,9195	28,3469

Fonte: Do autor.

Os resultados da análise de variância dos dados experimentais do fator de retardamento, pelo modelo de Freundlich, das misturas de solo-cimento-argila são exibidos na Tabela 6-12. Adotando um nível de significância (α) de 0,05, para o teste

de hipóteses os fatores apresentados mostraram-se significantes para o modelo. A análise mostra que o modelo não apresenta falta de ajuste ($p = 0,308 \geq \alpha$).

Assim como o modelo linear ($R_{d,lin}$) os fatores w linear (x_1), w quadrático (x_1^2), C quadrático (x_2^2), A linear (x_3) e A quadrático (x_3^2) mostraram-se significantes para o modelo de Freundlich.

Tabela 6-12 - Análise de variância do resultado do Rd para as misturas SCA (modelo de Freundlich).

Fonte	Soma dos Quadrados	Graus de liberdade	Média dos quadrados	F	p
w (x_1)	15,4274	1	15,4274	4,32819	0,128950
w (x_1^2)	171,8380	1	171,8380	48,20953	0,006127
C (x_2^2)	246,0259	1	246,0259	69,02311	0,003654
A (x_3)	83,7547	1	83,7547	23,49756	0,016753
A (x_3^2)	197,8001	1	197,8001	55,49324	0,005008
Falta de ajuste	64,1955	9	7,1328	2,00113	0,308306
Erro	10,6932	3	3,5644		
Total					

Fonte: Do autor.

A análise de variância apresentou uma proporção de variabilidade de $R^2 = 0,877$. A equação final ajustada para o modelo pode ser representada pela (Eq. 6-5), na qual x_1 representa os valores do fator w, x_2 do fator C e x_3 do fator A.

$$Rd_F = -74,0542 + 14,8029 \cdot x_1 - 0,697 \cdot x_1^2 - 0,0141 \cdot x_2^2 + 4,9027 \cdot x_3 - 0,3398 \cdot x_3^2 \quad (\text{Eq. 6-5})$$

Para a análise dos resíduos (APÊNDICE B) foram plotados os valores de resíduos versus os valores previstos de Rd_F . Os resíduos apresentaram uma tendência de aumento da variância diretamente proporcional com o aumento dos valores previstos. Não foi possível estabelecer uma linearização simples dos dados, então optou-se por manter o modelo sem alterações.

A Figura 6-20 apresenta os valores de Rd para o ajuste de Freundlich das misturas SCA em função dos fatores C e A, para w = 11,0%. A Figura 6-21 apresenta os valores de Rd para o ajuste de Freundlich das misturas SCA em função dos fatores w e A, para C = 6,0%.

Figura 6-20 - Projeção da superfície de resposta de Rd_F das misturas SCA, para $w = 11,0\%$.

Fonte: Do autor.

Figura 6-21 - Projeção da superfície de resposta de Rd_F das misturas SCA, para $C = 6,0\%$.

Fonte: Do autor.

As superfícies de respostas do modelo de Freundlich mostraram um padrão de variação do Rd muito semelhante ao ajuste linear.

Segundo Zuquette et al. (2008), quando $N = 1$ a sorção se iguala ao modelo linear. Se $N > 1$ a sorção é favorável e se $N < 1$ a sorção é desfavorável. Deste modo as misturas SCA-04, 06, 07, 09, 10 e 14, se mostraram na situação desfavorável para a sorção.

O solo sem estabilizantes apresentou valor de R_d alto para todos os ajustes. O ensaio de equilíbrio em lote foi idealizado para materiais que tenham capacidade de sorção, principalmente para aplicações com solos argilosos e outros materiais reativos. Quando testado em materiais granulares, como a areia deste estudo podem apresentar algumas discrepâncias, como mostra o baixo coeficiente de determinação ($R^2 = 0,38$) para o ajuste da adsorção do solo da Fm. Botucatu (Tabela 6-11).

A Tabela 6-13 apresenta os resultados do ajuste das isotermas pelo modelo de Langmuir, através das duas linearizações Langmuir I e Langmuir II, para as misturas de solo-cimento-argila.

Tabela 6-13 - Resultados do ajuste das isotermas pelo modelo de Langmuir para as misturas SCA.

Misturas	Composição			Langmuir I			Langmuir II		
	w (%)	C (%)	A (%)	K_L	R^2	R_d	K_L	R^2	R_d
BOT	-	-	-	-0,0005	0,0894	23,9242	-0,0007	0,4202	30,1488
BEN	-	-	-	-0,0007	0,7443	181,3093	-0,0008	0,9689	187,8438
SCA-01	9	3	3	-0,0003	0,3605	12,7460	-0,0003	0,8965	12,5512
SCA-02	9	3	9	-0,0002	0,2731	17,5232	-0,0002	0,9532	16,8370
SCA-03	9	9	3	-0,0004	0,3549	18,2088	-0,0004	0,9281	18,2022
SCA-04	9	9	9	-0,0002	0,1101	32,0061	0,0002	0,9114	19,3382
SCA-05	13	3	3	-0,0007	0,6605	17,4705	-0,0007	0,8901	16,8027
SCA-06	13	3	9	0,0001	0,0321	15,4459	0,0002	0,9483	12,8901
SCA-07	13	9	3	0,0001	0,0385	12,9133	0,0002	0,8317	12,5172
SCA-08	13	9	9	0,0000	0,0073	16,3692	0,0000	0,9698	16,2796
SCA-09	7,636	6	6	0,0001	0,0679	15,2482	0,0001	0,8870	15,8808
SCA-10	14,364	6	6	0,0007	0,4850	8,0975	0,0007	0,8596	8,2016
SCA-11	11	0,955	6	-0,0006	0,9231	24,4684	-0,0006	0,9878	24,7339
SCA-12	11	11,045	6	-0,0006	0,3540	16,3922	-0,0006	0,7655	16,9349
SCA-13	11	6	0,955	-0,0010	0,9590	30,5458	-0,0010	0,9791	30,4983
SCA-14	11	6	11,045	0,0000	0,0052	16,5496	0,0000	0,9495	16,4991
SCA-15	11	6	6	-0,0004	0,9283	34,7023	-0,0004	0,9924	34,7920
SCA-16	11	6	6	-0,0004	0,9420	31,6429	-0,0004	0,5134	32,4020
SCA-17	11	6	6	-0,0002	0,9226	27,7672	-0,0002	0,9825	27,9093
SCA-18	11	6	6	-0,0007	0,5634	49,4871	-0,0007	0,8452	48,4034

Fonte: Do autor.

Não foi possível estabelecer um modelo adequado a partir dos valores de R_d obtidos pelos ajustes de Langmuir I e II.

Fagundes & Zuquette (2011) avaliaram isotermas de material inconsolidado da Formação Botucatu, com quantidade de fração argila entre 9 a 12%. Foram usadas

concentrações mais baixas de potássio (até 245 ppm). Os autores identificaram uma tendência de redução dos valores de K_d em função do aumento da concentração inicial. Os parâmetros obtidos a partir dos modelos linear, Freundlich e Langmuir são semelhantes aos encontrados neste trabalho.

A mistura SCA-13, através do ajuste de Langmuir-II (Tabela 6-13), apresentou valores de R_d superiores ao do ajuste linear (Tabela 6-11) e pelo modelo de Freundlich (Tabela 6-12). O mesmo comportamento é observado para o solo da Fm. Botucatu e pode ser explicado pela baixa quantidade de argila. Apesar do coeficiente de determinação, pelos ajustes de Langmuir, para a mistura SCA-13, ser alto, é importante comparar esses dados com os demais ajustes.

A presença de caulinita, gibsitita, óxidos e hidróxidos no solo da Fm. Botucatu, segundo Fagundes & Zuquette (2011), afetam a sorção de K, Cu e Zn, principalmente porque parte das partículas de quartzo estão cobertas por óxidos e hidróxidos.

6.2.2 Ensaios de Percolação em Colunas

6.2.2.1 Condutividade hidráulica com solução de KCl

Após a percolação da solução contaminante foi observada uma alteração na condutividade hidráulica das misturas SCA. A Tabela 6-14 apresenta os dados determinados com fluxo de água e de KCl (0,023 M). São apresentados os valores médios e respectivos desvios.

Assim como ocorreu para os dados de condutividade hidráulica com percolação de água, foi preciso linearizar os dados de K através da transformação $\ln(K)_{KCl}$ (Tabela 6-14). Os resultados da análise de variância dos dados experimentais de $\ln(K)_{KCL}$ das misturas de SCA são exibidos na Tabela 6-15. Adotando um nível de significância (α) de 0,05, para o teste de hipóteses, os fatores w linear (x_1), C linear (x_2), A linear (x_3), e as interações $x_1.x_3$ mostraram-se significantes para o modelo.

Tabela 6-14 - Resultados de condutividade hidráulica para percolação com água e com solução de KCl (0,023 M).

Misturas	K - Água (m/s)		K - KCl (m/s)		
	$\bar{K}$	Desv.	$\bar{K}$	Desv.	ln K
SCA-01	1,98E-08	6,54E-09	4,55E-08	3,19E-08	-16,906
SCA-02	5,38E-08	1,08E-08	3,65E-08	4,85E-09	-17,127
SCA-03	2,77E-09	2,12E-09	4,77E-09	1,09E-09	-19,161
SCA-04	2,65E-09	3,15E-09	1,77E-08	4,78E-09	-17,848
SCA-05	3,05E-09	3,83E-09	6,34E-08	4,11E-08	-16,574
SCA-06	2,71E-08	9,51E-09	3,57E-09	3,49E-09	-19,449
SCA-07	3,48E-09	3,03E-09	2,24E-08	5,30E-09	-17,614
SCA-08	3,70E-09	2,52E-09	3,72E-09	1,02E-09	-19,409
SCA-09	4,78E-09	4,18E-09	1,91E-08	7,04E-09	-17,773
SCA-10	3,86E-10	1,72E-10	3,53E-09	1,56E-09	-19,463
SCA-11	1,65E-08	3,98E-09	1,43E-08	1,05E-09	-18,060
SCA-12	1,46E-09	1,18E-09	1,33E-08	4,35E-09	-18,133
SCA-13	5,45E-09	2,72E-09	2,11E-08	7,07E-09	-17,676
SCA-14	3,41E-09	2,51E-09	3,05E-09	1,72E-09	-19,608
SCA-15	4,01E-10	1,87E-10	1,11E-08	9,57E-09	-18,312
SCA-16	4,45E-10	1,86E-10	9,31E-09	8,98E-09	-18,492

Fonte: Do autor.

Tabela 6-15 - Análise de variância do $\ln(K)_{KCl}$ para as misturas SCA.

Fonte	Soma dos Quadrados	Graus de liberdade	Média dos quadrados	F	p
w (X1)	1,72064	1	1,720637	105,9820	0,061646
C (X2)	1,22925	1	1,229252	75,7153	0,072843
A (X3)	3,41394	1	3,413935	210,2800	0,043832
X1.X3	4,14900	1	4,149000	255,5561	0,039771
Falta de ajuste	3,50068	10	0,350068	21,5623	0,166180
Erro	0,01624	1	0,016235		
Total	14,02974	15			

Fonte: Do autor.

A proporção de variabilidade na medida de $\ln(K)_{KCl}$ que é explicada pelos fatores w, C e A, obtida na análise de variância, foi $R^2 = 0,75$. A Tabela 6-20 também mostra que o modelo não apresenta falta de ajuste ($p = 0,166 > \alpha$). A equação final ajustada para o modelo $\ln(K)_{KCl}$ pode ser representada pela (Eq. 6-6), na qual x_1 representa os valores do fator w, x_2 do fator C e x_3 do fator A.

$$\ln(K)_{KCl} = -22,595 + 0,543 \cdot x_1 - 0,100 \cdot x_2 + 1,154 \cdot x_3 - 0,120 \cdot x_1 \cdot x_3 \quad (\text{Eq. 6-6})$$

A avaliação da adequação do modelo $\ln(K)_{KCl}$ foi realizada através da análise dos resíduos (APÊNDICE A). A verificação mostrou que os valores residuais seguem uma distribuição normal e estão aleatoriamente distribuídos. Portanto, o modelo é adequado para descrever o comportamento de $\ln(K)$ das misturas SCA como uma função do teor de umidade (w), cimento (C) e argila (A).

Foram feitas superfícies de resposta, a partir do modelo $\ln(K)_{KCl}$, fixando diferentes valores do teor de umidade. A Figura 6-22, representa a projeção da superfície de resposta de K (m/s), em função dos fatores C e A , fixando w em 9,0%, a Figura 6-23 em $w = 11,0\%$ e a Figura 6-24 em $w = 13,0\%$.

Figura 6-22 - Projeção da superfície de resposta de K (m/s) das misturas SCA ($w=9,0\%$), com percolação de KCl.

Fonte: Do autor.

Como pode ser visto na Tabela 6-14 houve uma tendência de aumento dos valores de condutividade hidráulica após a percolação da solução de KCl. Para percolação com água foi observado uma região de valores ótimos para valores médios de C e A seguindo uma proporção para os dois valores (Figura 6-8).

Nas misturas com maiores valores de w (Figura 6-23 e 6-24) os valores de condutividade hidráulica para percolação de KCl mostram que as soluções com maiores valores de C e A apresentaram a menor aumento K .

Figura 6-23 - Projeção da superfície de resposta de K (m/s) das misturas SCA (w=11,0%), com percolação de KCl.

Fonte: Do autor.

Figura 6-24 - - Projeção da superfície de resposta de K (m/s) das misturas SCA (w=13,0%), com percolação de KCl.

Fonte: Do autor.

No processo de estabilização química com cimento a mistura está sujeita a valores altos de pH devido a quantidade elevada de hidróxido de cálcio produzido. É

importante manter o sistema com pH elevado para garantir a ocorrência das reações pozolânicas. Com pH básico a sílica e alumina ficam mais disponíveis para reagir com o cimento e gerar C-S-H que preenche os vazios, aumentando a resistência e diminuindo a condutividade hidráulica (PRUSINSKI & BHATTACHARJA, 1999).

As alterações na condutividade hidráulica causadas pela percolação de substâncias químicas são influenciadas pelas forças de repulsão entre as partículas de argila. Essas forças repulsivas controlam o comportamento de floculação, dispersão, contração e expansão (BOSCOV, 2008).

As forças que atuam entre as partículas são envolvidas pela camada dupla, cuja espessura depende de vários fatores, entre eles o pH do fluido, a adsorção de ânions na superfície das argilas e a temperatura (BOSCOV, 2008).

As misturas foram sujeitas a percolação de solução contaminante de KCl com pH de aproximadamente 5,0. Foi verificado que o pH do efluente diminuiu durante o processo de percolação de KCl, passando de uma situação de pH básico para valores neutros ou ácidos, conforme pode ser observado no APÊNDICE A. Portanto o aumento nos valores de K durante os ensaios após a percolação da solução de KCl pode estar relacionado com a influência dos fatores físico-químicos da solução percolante e alteração da estrutura das misturas.

As misturas SCA-8 e SCA 14 apresentaram menores diferenças de K após a percolação da solução contaminante. Estas misturas apresentam teores de umidade e de argila elevados. Tal combinação parece ter gerado material mais estável frente a ação química do contaminante.

Os valores de K obtidos para a maioria das misturas SCA, após a percolação de KCl apresentaram valores superiores a 10^{-9} m/s. O critério de coeficiente de permeabilidade dos materiais para aplicação em barreiras impermeabilizantes de aterros sanitários (CETESB, 1993) é estabelecido para percolação de água.

Segundo EPA (1992) valores de K na ordem de 10^{-8} m/s são obtidos para materiais aplicados em barreiras verticais. Outros autores (KENNEY et al., 1992; PEARLMAN, 1999, AZAMBUJA, 2004) comentam que barreiras verticais de misturas solo-cimento-bentonita ou solo-bentonita apresentam valores típicos de condutividade hidráulica de 10^{-8} m/s. É importante lembrar, também, que cada contaminante tem uma interação diferente com o solo ou misturas de solo.

6.2.2.2 pH e condutividade elétrica

No APÊNDICE A também são apresentadas as curvas de pH e condutividade elétrica (CE) do efluente de cada uma das misturas SCA. Foi observado que a partir do início da percolação do contaminantes ocorre um aumento da condutividade elétrica em um padrão semelhante a alteração de C/C_0 das curvas de chegada. Os valores de pH sofrem uma redução e depois tendem a estabilizar. O mesmo comportamento foi relatado por Basso (2003), Musso (2008) e Souza (2009).

Loch (2013) identificou que a estabilização química do solo com cal e cimento promove uma alcalinização do efluente.

6.2.2.3 Retenção de K^+

Foram realizadas as análises químicas do efluente, que permitiram estabelecer curvas de chegada para determinação dos parâmetros de retenção. A Tabela 6-16 apresenta os resultados do fator de retardamento (Rd) e número de Peclet (P), para o potássio (K^+). As curvas de chegada são apresentadas no APÊNDICE A.

Tabela 6-16 - Resultados do ensaio de percolação em coluna das misturas SCA para potássio.

Misturas	Composição			Rd (FC)	Rd (Sh)	Rd (vG)	P (vG)
	w (%)	C (%)	A (%)				
SCA-01	9	3	3	5,81	7,84	8,21	2,07
SCA-02	9	3	9	6,19	9,87	8,26	3,81
SCA-03	9	9	3	2,07	3,19	3,40	1,31
SCA-04	9	9	9	1,58	3,99	4,79	0,40
SCA-05	13	3	3	4,58	11,76	8,87	1,26
SCA-06	13	3	9	1,93	8,97	13,39	0,13
SCA-07	13	9	3	1,28	3,06	3,93	0,33
SCA-08	13	9	9	1,52	3,15	4,49	0,53
SCA-09	7,636	6	6	4,10	8,42	6,03	2,25
SCA-10	14,364	6	6	3,04	7,12	8,69	0,34
SCA-11	11	0,955	6	5,03	7,13	7,65	1,56
SCA-12	11	11,045	6	1,94	4,84	6,00	0,43
SCA-13	11	6	0,955	1,77	3,10	3,29	1,03
SCA-14	11	6	11,045	3,80	5,92	6,83	1,06
SCA-15	11	6	6	5,21	11,01	11,36	0,75
SCA-16	11	6	6	4,39	9,22	10,47	0,72

Nota: (FC) Freeze & Cherry (1979), (Sh) Shackelford (1994), (vG) van Genuchten (1980).

Fonte: Do autor.

As curvas de chegada foram feitas em função do volume de vazios percolados e a concentração relativa (C/C_0) obtidos do efluente. Os valores do fator de

retardamento foram obtidos através dos métodos de Freeze & Cherry (1979), Shackelford (1994) e van Genuchten (1980). Para determinação do número de Peclet também foi usada a solução de van Genuchten (1980), através do modelo CFITM do software STANMOD.

Utilizando o valor de $C/C_0 = 0,5$ e obtendo o valor de R_d diretamente da curva (FREEZE & CHERRY, 1979), para as misturas SCA, resultou em valores inferiores de R_d . O método de Freeze & Cherry (1979) é indicado para solos de alta permeabilidade e o método de Shackelford (1994) para os solos de baixa permeabilidade.

Os autores Leite (2000), Basso (2003), Musso (2008) e Souza (2009) também encontraram essa diferença ao avaliar materiais de baixa permeabilidade com soluções contendo K^+ e Cl^- .

Quando comparados os resultados dos três métodos de determinação de R_d foi verificado que há uma semelhança maior entre os dados obtidos através do método da área acima da curva (Shackelford, 1994) e do modelo de van Genuchten (1980).

Após verificação dos modelos, foi escolhida a transformação $\ln(R_d)$ para linearização dos dados. Os resultados da análise de variância dos dados experimentais de $\ln(R_d)$, obtidos pelo modelo van Genuchten (1980), das misturas de SCA são exibidos na Tabela 6-17. Adotando um nível de significância (α) de 0,12, para o teste de hipóteses, os fatores w linear (x_1), w quadrático (x_1^2), C linear (x_2), C quadrático (x_2^2), A linear (x_3) e A quadrático (x_3^2) mostraram-se significantes para o modelo $\ln(R_d)$. Optou-se por um valor maior de α a fim de se obter um modelo mais representativo.

Tabela 6-17 - Análise de variância de $\ln(R_d)$ para as misturas SCA (solução de van Genuchten, 1980).

Fonte	Soma dos Quadrados	Graus de liberdade	Média dos quadrados	F	p
w (x_1)	0,115347	1	0,115347	34,4357	0,107454
w (x_1^2)	0,164131	1	0,164131	48,9998	0,090335
C (x_2)	1,026116	1	1,026116	306,3373	0,036334
C (x_2^2)	0,227180	1	0,227180	67,8226	0,076926
A (x_3)	0,330692	1	0,330692	98,7251	0,063857
A (x_3^2)	0,742053	1	0,742053	221,5330	0,042708
Falta de ajuste	0,522615	8	0,065327	19,5027	0,173462
Erro	0,003350	1	0,003350		
Total	2,756064	15			

Fonte: Do autor.

Conforme apresentado na Tabela 6-17 o modelo não apresenta falta de ajuste ($p = 0,17 > \alpha$). A proporção de variabilidade na medida de $\ln(R_d)$ que é explicada pelos fatores w e A, obtida na análise de variância, foi $R^2 = 0,809$. A equação final ajustada para o modelo pode ser representada pela (Eq. 6-7), na qual x_1 representa os valores do fator w e x_3 do fator A.

$$\ln(R_d) = -3,669 + 0,778 \cdot x_1 - 0,0333 \cdot x_1^2 + 0,117 \cdot x_2 - 0,0174 \cdot x_2^2 + 0,429 \cdot x_3 - 0,0314 \cdot x_3^2 \quad (\text{Eq. 6-7})$$

A avaliação da adequação do modelo proposto pela (Eq. 6-7) foi realizada através da análise dos resíduos (APÊNDICE A). A verificação mostrou que os valores residuais seguem uma distribuição normal e estão aleatoriamente distribuídos. Portanto, o modelo $\ln(R_d)$ é adequado para descrever o comportamento de R_d das misturas SCA como uma função do teor de umidade (w), cimento (C) e argila (A).

A Figura 6-25 representa graficamente o efeito de C e A sobre os valores de R_d , para w de 9,0%, a Figura 6-26 para um w de 11,0% e a Figura 6-27 para w de 13,0%. São apresentados os valores de $\ln(R_d)$ transformados em fator de retardamento.

Figura 6-25 - Projeção da superfície de resposta dos valores de R_d das misturas SCA (w=9,0%).

Fonte: Do autor.

Figura 6-26 - Projeção da superfície de resposta dos valores de R_d das misturas SCA ($w=11,0\%$)

Fonte: Do autor.

Figura 6-27 - Projeção da superfície de resposta dos valores de R_d das misturas SCA ($w=13,0\%$).

Fonte: Do autor.

As superfícies de resposta de R_d para potássio, obtido através da solução de van Genuchten (1980) mostram uma região de pico, ou maior valor. Os maiores

valores de R_d foram obtidos para combinações com teores médios a altos de argila e teores baixos a médios de cimento.

O teor de umidade também exerce influência sobre o resultado final do fator de retardamento. Como pode ser observado na Figura 6-26, os resultados de R_d , para um teor de umidade de 11,0% há uma área máxima (com valores acima de 11,02).

Embora sejam ajustes diferentes, as superfícies de resposta obtidas pelo ensaio de coluna apresentaram comportamento semelhante as superfícies do ensaio de equilíbrio em lote obtidas pelo ajuste linear e Freundlich.

Não foi possível ajustar um modelo de regressão linear adequado para os fatores de retardamento do potássio obtidos pelos métodos de Freeze & Cherry (1979) e Shackelford (1994).

O número de Peclet pode informar qual o mecanismo de transporte predominante para o material avaliado. Se $P > 50$, domina o processo de transporte advectivo, e se $P < 1$, domina o processo difusivo. Os ajustes pelo modelo de van Genuchten (1980) mostraram que nas misturas SCA-04, 06, 07, 08, 12, 15 e 16 pode haver o predomínio do processo difusivo.

Leite (2001) verificou a migração de íons Cd^{2+} , K^+ , Cl^- e F^- em misturas de latossolos residuais das Formações Botucatu e Serra Geral. Os parâmetros de retenção foram determinados através de ensaios de equilíbrio em lote. O potencial de transporte dos íons foi avaliado através de ensaios de difusão em colunas estanques. Foram obtidos valores do coeficiente de difusão efetiva (D^*) e observou-se que o fluxo difusivo dos íons diminui para os solos mais argilosos. A mistura de solo da Fm. Botucatu com o solo (argiloso) da Fm. Serra Geral resultou em um aumento das taxas de sorção e diminuição do fluxo difusivo.

Mesmo com a adição de argila ao solo, a quantidade de material argiloso continua relativamente baixo e, como foi determinado pelo número de Peclet, pode ocorrer predomínio de transporte por difusão.

6.2.2.4 Retenção de Cl^-

A Tabela 6-18 apresenta os resultados do fator de retardamento (R_d) e número de Peclet (P), para o cloro (Cl^-).

Tabela 6-18 - Resultados do ensaio de percolação em coluna das misturas SCA para cloro.

Misturas	Composição			Rd (FC)	Rd (Sh)	Rd (vG)	P (vG)
	w (%)	C (%)	A (%)				
SCA-01	9	3	3	5,48	8,33	9,39	1,50
SCA-02	9	3	9	1,70	2,01	2,08	2,30
SCA-03	9	9	3	1,29	1,62	1,72	3,15
SCA-04	9	9	9	1,05	1,85	1,90	1,26
SCA-05	13	3	3	2,30	3,51	3,55	2,69
SCA-06	13	3	9	1,03	3,18	4,14	0,28
SCA-07	13	9	3	0,90	1,74	1,95	0,82
SCA-08	13	9	9	0,90	1,00	0,85	4,65
SCA-09	7,636	6	6	1,16	1,79	1,84	1,75
SCA-10	14,364	6	6	2,70	7,05	8,72	0,41
SCA-11	11	0,955	6	1,47	1,52	1,62	5,32
SCA-12	11	11,045	6	1,19	1,55	1,64	2,12
SCA-13	11	6	0,955	0,86	1,53	0,94	5,84
SCA-14	11	6	11,045	1,28	1,36	1,39	8,75
SCA-15	11	6	6	1,84	4,47	3,77	0,98
SCA-16	11	6	6	1,85	3,80	3,33	1,30

Nota: (FC) Freeze & Cherry (1979), (Sh) Shackelford (1994), (vG) van Genuchten (1980).

Fonte: Do autor.

Assim como para o cátion K^+ , foram determinados os valores do fator de retardamento do ânion Cl^- através dos métodos de Freeze & Cherry (1979), Shackelford (1994) e van Genuchten (1980). Como pode ser visto na Tabela 6-18 os valores de Rd para Cl^- são menores que os obtidos para o K^+ .

Os resultados de Rd do Cl^- obtidos pelo método Freeze & Cherry (1979) ficaram mais próximos dos encontrados pelos outros métodos pois o processo foi mais rápido e a retenção menor.

Para os casos em que o Cl^- apresenta $Rd > 1$, o íon não pode ser considerado como um traçador no solo. Considerando os valores obtidos pelo modelo de van Genuchten (1980), o cloro pode ser considerado traçador para as misturas SCA-08 e SCA-11. Não foram estabelecidos modelos de regressão para os fatores de retenção do cloro.

6.3 CAPACIDADE DE TROCA CATIÔNICA (CTC)

Neste item são apresentados todos os resultados de capacidade de troca catiônica, obtidos através de ensaios de azul de metileno.

6.3.1 Misturas SCA

A Tabela 6-19 apresenta os resultados da CTC do solo sem estabilizantes (mistura PD-01) e das misturas SCA. São descritos os valores de CTC, superfície específica (SE), valor de azul de metileno (V_b) e atividade do material (A_{cb}).

Os resultados da análise de variância dos dados experimentais de CTC das misturas de SCA são exibidos na Tabela 6-20. Adotando um nível de significância (α) de 0,05, para o teste de hipóteses, os fatores w linear (x_1), C linear (x_2), C quadrático (x_2^2), A linear (x_3), A quadrático (x_3^2) e as interações $x_1.x_3$ e $x_2.x_3$, mostraram-se significantes para o modelo CTC.

A Tabela 6-20 também mostra que o modelo não apresenta falta de ajuste ($p = 0,1705 > \alpha$). A proporção de variabilidade na medida de CTC que é explicada pelos fatores w , C e A , obtida na análise de variância, foi $R^2 = 0,99$. A equação final ajustada para o modelo CTC_{SCA} pode ser representada pela (Eq. 6-8), na qual x_1 representa os valores do fator w , x_2 do fator C e x_3 do fator A .

Tabela 6-19 - Composições das misturas SCA e resultados de CTC.

Mistura	Composição			CTC (mEq/100g)	SE (m ² /g)	V_b (g/100g)	A_{cb} (g/100g)
	w (%)	C (%)	A (%)				
PD-01	6,4	0	0	0,80	6,24	0,26	4,18
SCA-01	9	3	3	2,14	16,64	0,68	7,56
SCA-02	9	3	9	5,87	45,56	1,86	12,41
SCA-03	9	9	3	1,64	12,76	0,52	5,79
SCA-04	9	9	9	1,44	11,20	0,46	3,05
SCA-05	13	3	3	2,24	17,35	0,71	7,88
SCA-06	13	3	9	7,18	55,74	2,28	15,19
SCA-07	13	9	3	1,90	14,73	0,60	6,69
SCA-08	13	9	9	3,77	29,22	1,19	7,96
SCA-09	7,636	6	6	2,42	18,77	0,77	6,39
SCA-10	14,364	6	6	3,69	28,59	1,17	9,74
SCA-11	11	0,955	6	6,30	48,90	2,00	16,66
SCA-12	11	11,045	6	2,67	20,74	0,85	7,06
SCA-13	11	6	0,955	0,40	3,10	0,13	1,82
SCA-14	11	6	11,045	4,58	35,65	1,46	8,55
SCA-15	11	6	6	3,28	25,45	1,04	8,67
SCA-16	11	6	6	3,20	24,86	1,02	8,47

Fonte: Do autor.

Tabela 6-20 - Análise de variância da CTC para as misturas SCA.

Fonte	Soma dos Quadrados	Graus de liberdade	Média dos quadrados	F	p
w (x_1)	2,73304	1	2,73304	946,726	0,020683
C (x_2)	16,01417	1	16,01417	5547,320	0,008547
C (x_2^2)	2,36631	1	2,36631	819,691	0,022227
A (x_3)	22,09463	1	22,09463	7653,596	0,007277
A (x_3^2)	0,68802	1	0,68802	238,330	0,041180
$x_1 \cdot x_3$	1,35112	1	1,35112	468,029	0,029406
$x_2 \cdot x_3$	6,13879	1	6,13879	2126,480	0,013803
Falta de ajuste	0,40417	7	0,05774	20,001	0,170548
Erro	0,00289	1	0,00289		
Total	52,91581	15			

Fonte: Do autor.

$$CTC_{SCA} = 2,1389 - 0,1873 \cdot x_1 - 0,3882 \cdot x_2 + 0,0509 \cdot x_2^2 + 0,5841 \cdot x_3 - 0,0274 \cdot x_3^2 + 0,0685 \cdot x_1 \cdot x_3 - 0,0973 \cdot x_2 \cdot x_3 \quad (\text{Eq. 6-8})$$

Para avaliar a adequação do modelo proposto pela (Eq. 6-8) foram plotados os gráficos da probabilidade normal dos resíduos e a verificação dos resíduos versus valores previstos (APÊNDICE C). Estes gráficos mostram que os valores residuais seguem uma distribuição normal e estão aleatoriamente distribuídos. Portanto, o modelo CTC_{SCA} (Eq. 6-8) é adequado para descrever o comportamento de CTC das misturas SCA como uma função do teor de umidade (w), e quantidade de cimento (C) e argila (A).

A Figura 6-28 representa graficamente o efeito de C e A sobre a CTC_{SCA} , para um $w = 9,0\%$. A Figura 6-29 mostra a projeção da superfície de resposta da CTC_{SCA} para $w = 11,0\%$ e a Figura 6-30 para $w = 13,0\%$.

As projeções das superfícies de resposta da CTC para as misturas de solo-cimento-argila mostram que o teor argila é o fator principal para descrever o comportamento da capacidade de troca catiônica. O aumento da quantidade de argila promove um aumento da CTC. O aumento do teor de cimento tem efeito contrário. O teor de umidade também exerceu influencia e é possível observar que as misturas com maior w tendem a apresentar valores maiores de CTC.

Figura 6-28 - Projeção da superfície de resposta de CTC (meq/100g) das misturas SCA (w=9,0%).

Fonte: Do autor.

Figura 6-29 - Projeção da superfície de resposta de CTC (meq/100g) das misturas SCA (w=11,0%).

Fonte: Do autor.

Figura 6-30 - Projeção da superfície de resposta de CTC (meq/100g) das misturas SCA (w=13,0%).

Fonte: Do autor.

6.3.2 Misturas SC

I) Fatorial 3^2

A Tabela 6-21 apresenta os resultados de CTC do solo sem estabilizantes (mistura PD-01) e das misturas SC para o Fatorial 3^2 . São descritos os valores de CTC, superfície específica (SE), valor de azul de metileno (V_b) e atividade do material (A_{cb}).

Os resultados da análise de variância dos dados experimentais de CTC das misturas de SC são exibidos na Tabela 6-22. Adotando um nível de significância (α) de 0,05, para o teste de hipóteses, os fatores w linear (x_1), w quadrático (x_1), C linear (x_2), C quadrático (x_2^2) e as interações apresentadas mostraram-se significantes para o modelo CTC.

Tabela 6-21 - Composições das misturas SC (Fatorial 3²) e resultados de CTC.

Mistura	Composição		CTC (mEq/100g)	SE (m ² /g)	V _b (g/100g)	A _{cb} (g/100g)
	w (%)	C (%)				
PD-01	6,4	0	0,80	6,24	0,26	4,18
SC-301	6,4	3	0,577	4,48	0,18	3,05
SC-302	6,4	6	0,289	2,24	0,09	1,53
SC-303	6,4	9	0,287	2,23	0,09	1,52
SC-304	7,6	3	0,747	5,79	0,24	3,95
SC-305	7,6	6	0,403	3,13	0,13	2,13
SC-306	7,6	9	0,173	1,34	0,05	0,91
SC-307	8,8	3	0,316	2,45	0,10	1,67
SC-308	8,8	6	0,287	2,23	0,09	1,52
SC-309	8,8	9	0,231	1,79	0,07	1,22
SC-310	7,6	6	0,401	3,11	0,13	2,12
SC-311	7,6	6	0,405	3,14	0,13	2,14

Fonte: Do autor.

A Tabela 6-22 mostra que não há falta de ajuste ($p = 0,072 > \alpha$) para o modelo proposto. A proporção de variabilidade na medida de CTC que é explicada pelos fatores w e C, obtida na análise de variância, foi $R^2 = 0,99$. A equação final ajustada para o modelo CTC_{SC} pode ser representada pela, na qual x_1 representa os valores do fator w e x_2 do fator C.

Tabela 6-22 - Análise de variância da CTC para as misturas SC (Fatorial 3²).

Fonte	Soma dos Quadrados	Graus de liberdade	Média dos quadrados	F	p
w (x_1)	0,016943	1	0,016943	5692,78	0,000176
w (x_1^2)	0,031248	1	0,031248	10499,16	0,000095
C (x_2)	0,150102	1	0,150102	50433,14	0,000020
C (x_2^2)	0,009435	1	0,009435	3170,17	0,000315
$x_1 \cdot x_2$	0,010497	1	0,010497	3526,98	0,000283
$x_1 \cdot x_2^2$	0,008238	1	0,008238	2767,89	0,000361
$x_1^2 \cdot x_2^2$	0,049684	1	0,049684	16693,56	0,000060
Erro	0,000037	1	0,000037	12,47	0,071696
Total	0,000006	2	0,000003		

Fonte: Do autor.

$$\begin{aligned}
 CTC_{SC} = & -16,077 + 4,900 \cdot x_1 - 0,345 \cdot x_1^2 + 1,632 \cdot x_2 + 0,062 \cdot x_2^2 \\
 & - 0,5776 \cdot x_1 \cdot x_2 - 0,0073 \cdot x_1 \cdot x_2^2 + 0,0447 \cdot x_1^2 \cdot x_2^2
 \end{aligned}
 \quad (\text{Eq. 6-9})$$

A avaliação da adequação do modelo proposto pela (Eq. 6-9) foi realizada através da análise dos resíduos (APÊNDICE C). A verificação mostrou que os valores residuais seguem uma distribuição normal e estão aleatoriamente distribuídos.

Portanto, o modelo CTC_{SC} é adequado para descrever o comportamento de CTC das misturas SC como uma função do teor de umidade (w) e quantidade de cimento (C).

A Figura 6-31 representa graficamente o efeito de w e C sobre a CTC_{SC} . Os resultados de CTC mostram que o cimento é o fator principal capaz de modificar a capacidade de troca catiônica das misturas SC. Houve uma redução da CTC para os pontos com os menores e maiores valores de w .

A adição de cimento promoveu a redução da capacidade de troca catiônica das misturas (Figura 6-31). Comparando os valores de CTC das misturas solo-cimento com a amostra de solo (Tabela 6-21) é possível observar que todas as misturas com cimento apresentaram CTC inferior que a do solo.

Figura 6-31 - Projeção da superfície de resposta de CTC (meq/100g) das misturas SC (Fatorial 3^2).

Fonte: Do autor.

I) Fatorial 2^2 composto

A Tabela 6-23 apresenta os resultados de CTC das misturas SC para o fatorial 2^2 composto. Para este planejamento fatorial a análise de variância dos dados experimentais, adotando um nível de significância (α) de 0,05, para o teste de

hipóteses, não permitiram ajustar um modelo adequado para descrever a CTC em função de w e C . O fatorial 3^2 foi mais adequado.

Tabela 6-23 - Composições das misturas SC (Fatorial 2^2 composto) e resultados de CTC.

Mistura	Composição		CTC (mEq/100g)	SE (m ² /g)	V_b (g/100g)	A_{cb} (g/100g)
	w (%)	C (%)				
PD-01	6,4	0	0,80	6,24	0,26	4,18
SC-201	6,4	3	0,577	4,48	0,18	3,05
SC-202	6,4	9	0,287	2,23	0,09	1,52
SC-203	8,8	3	0,316	2,45	0,10	1,67
SC-204	8,8	6	0,287	2,23	0,09	1,52
SC-205	5,9	6	0,487	3,78	0,15	2,57
SC-206	9,3	6	0,344	2,67	0,11	1,82
SC-207	7,6	1,75	0,603	4,68	0,19	3,19
SC-208	7,6	10,24	0,316	2,45	0,10	1,67
SC-209	7,6	6	0,401	3,11	0,13	2,12
SC-210	7,6	6	0,405	3,14	0,13	2,14

Fonte: Do autor.

6.3.3 Misturas SA

II) Fatorial 3^2

A Tabela 6-24 apresenta os resultados de CTC das misturas SA e solo (PD-01) para o fatorial 3^2 . São descritos os valores de CTC, superfície específica (SE), valor de azul de metileno (V_b) e atividade do material (A_{cb}).

Tabela 6-24 - Composições das misturas SA (Fatorial 3^2) e resultados de CTC.

Mistura	Composição		CTC (mEq/100g)	SE (m ² /g)	V_b (g/100g)	A_{cb} (g/100g)
	w (%)	A (%)				
PD-01	6,4	0	0,80	6,24	0,26	4,18
SA-301	6,4	3	4,55	35,32	1,44	16,04
SA-302	6,4	6	8,72	67,62	2,76	23,03
SA-303	6,4	9	12,97	100,63	4,11	27,42
SA-304	9,8	3	4,85	37,63	1,54	17,09
SA-305	9,8	6	8,95	69,48	2,84	23,66
SA-306	9,8	9	12,07	93,67	3,83	25,52
SA-307	13,2	3	4,92	38,18	1,56	17,34
SA-308	13,2	6	8,62	66,89	2,73	22,78
SA-309	13,2	9	12,82	99,47	4,07	27,10
SA-310	9,8	6	8,81	68,32	2,79	23,27
SA-311	9,8	6	8,85	68,65	2,81	23,38

Fonte: Do autor.

Os resultados da análise de variância dos dados experimentais de CTC das misturas de SA são exibidos na Tabela 6-25. Adotando um nível de significância (α)

de 0,05, para o teste de hipóteses, os fatores w linear (x_1), C linear (x_2), e as interações apresentadas mostraram-se significantes para o modelo CTC_{SA} .

A Tabela 6-25 mostra que não há falta de ajuste ($p = 0,505 > \alpha$) para o modelo proposto. A proporção de variabilidade na medida de CTC que é explicada pelos fatores w e A , obtida na análise de variância, foi $R^2 = 0,99$. A equação final ajustada para o modelo CTC_{SA} pode ser representada pela (Eq. 6-10), na qual x_1 representa os valores do fator w e x_3 do fator A .

Tabela 6-25 - Análise de variância da CTC para as misturas AS (Fatorial 3^2).

Fonte	Soma dos Quadrados	Graus de liberdade	Média dos quadrados	F	p
w (x_1)	0,06419	1	0,06419	10,83	0,081264
A (x_3)	92,34376	1	92,34376	15576,03	0,000064
$x_1 \cdot x_3$	0,06682	1	0,06682	11,27	0,078425
$x_1^2 \cdot x_3$	0,29145	1	0,29145	49,16	0,019741
$x_1^2 \cdot x_3^3$	0,22574	1	0,22574	38,08	0,025272
Falta de ajuste	0,01983	3	0,00661	1,12	0,504873
Erro	0,01186	2	0,00593		
Total	92,96945	10			

Fonte: Do autor.

$$CTC_{SA3} = 0,5548 + 0,0009 \cdot x_1 + 1,5849 \cdot x_3 - 0,0493 \cdot x_1 \cdot x_3 + 0,0030 \cdot x_1^2 \cdot x_3 - 0,000081 \cdot x_1^2 \cdot x_3^2 \quad (\text{Eq. 6-10})$$

A avaliação da adequação do modelo proposto pela (Eq. 6-10) foi realizada através da análise dos resíduos (APÊNDICE C). A verificação mostrou que os valores residuais seguem uma distribuição normal e estão aleatoriamente distribuídos. Portanto, o modelo CTC_{SA3} é adequado para descrever o comportamento de CTC das misturas SA como uma função do teor de umidade (w) e quantidade de argila (A).

A Figura 6-32 representa graficamente o efeito de w e A sobre a CTC_{SA3} . Os resultados de CTC mostram que a argila é o fator principal capaz de modificar a capacidade de troca catiônica das misturas SA.

A adição de argila promoveu um acréscimo elevado da capacidade de troca catiônica das misturas. Comparando os valores de CTC das misturas solo-cimento com a amostra de solo (Tabela 6-24) é possível observar que todas as misturas com cimento apresentaram CTC superior que a do solo.

Figura 6-32 - Projeção da superfície de resposta de CTC (meq/100g) das misturas SA (Fatorial 3²).

Fonte: Do autor.

III) Fatorial 2² composto

A Tabela 6-26 apresenta os resultados de CTC das misturas SA e solo (PD-01) para o fatorial 3². São descritos os valores de CTC, superfície específica (SE), valor de azul de metileno (V_b) e atividade do material (A_{cb}).

Tabela 6-26 - Composições das misturas SA (Fatorial 2² composto) e resultados de CTC.

Mistura	Composição		CTC (mEq/100g)	SE (m ² /g)	V _b (g/100g)	A _{cb} (g/100g)
	w (%)	A (%)				
PD-01	6,4	0	0,80	6,24	0,26	4,18
SA-201	6,4	3	4,55	35,32	1,44	16,04
SA-202	6,4	9	12,97	100,63	4,11	27,42
SA-203	13,2	3	4,92	38,18	1,56	17,34
SA-204	13,2	9	12,82	99,47	4,07	27,10
SA-205	4,99	6	8,39	65,09	2,66	22,17
SA-206	14,6	6	9,30	72,17	2,95	24,58
SA-207	9,8	1,75	3,41	26,42	1,08	13,94
SA-208	9,8	10,24	13,28	103,01	4,21	25,93
SA-209	9,8	6	8,81	68,32	2,79	23,27
SA-210	9,8	6	8,85	68,65	2,81	23,38

Fonte: Do autor.

Os resultados da análise de variância dos dados experimentais de CTC das misturas de SA são exibidos na Tabela 6-27. Adotando um nível de significância (α) de 0,05, para o teste de hipóteses, os fatores w linear (x_1), A linear (x_3), A quadrático (x_3^2), mostraram-se significantes para o modelo CTC.

Tabela 6-27 - Análise de variância da CTC para as misturas AS (Fatorial 3^2).

Fonte	Soma dos Quadrados	Graus de liberdade	Média dos quadrados	F	p
w (x_1)	0,2848	1	0,2848	319,4	0,035584
A (x_3)	114,5523	1	114,5523	128458,4	0,001776
A (x_3^2)	0,2511	1	0,2511	281,5	0,037896
Falta de ajuste	1,0257	5	0,2051	230,0	0,050013
Erro	0,0009	1	0,0009		
Total	116,1431	9			

Fonte: Do autor.

A Tabela 6-27 também mostra que o modelo não apresenta falta de ajuste ($p = 0,050013 > \alpha$). A proporção de variabilidade na medida de CTC que é explicada pelos fatores w e A, obtida na análise de variância, foi $R^2 = 0,991$. A equação final ajustada para o modelo CTC_{SA2} pode ser representada pela (Eq. 6-11), na qual x_1 representa os valores do fator w e x_3 do fator A.

$$CTC_{SA3} = -0,05568 + 0,0555 \cdot x_1 + 1,543 \cdot x_3 - 0,235 \cdot x_3^2 \quad (\text{Eq. 6-11})$$

A avaliação da adequação do modelo proposto pela (Eq. 6-11) foi realizada através da análise dos resíduos (APÊNDICE C). A verificação mostrou que os valores residuais seguem uma distribuição normal e estão aleatoriamente distribuídos. Portanto, o modelo CTC_{SA2} é adequado para descrever o comportamento de CTC das misturas SA como uma função do teor de umidade (w) e quantidade de argila (A).

A Figura 6-33 representa graficamente o efeito de w e A sobre a CTC das misturas para o Fatorial 2^2 composto. Ambos os modelos obtidos pelo fatorial 3^3 (Figura 6-32) e pelo 2^2 composto apresentaram bom ajuste. A distribuição dos resíduos do modelo CTC_{SA3} ficou melhor que o CTC_{SA2} .

Figura 6-33 - Projeção da superfície de resposta de CTC (meq/100g) das misturas SA (Fatorial 3²).

Fonte: Do autor.

6.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS DE FLUXO E TRANSPORTE DE CONTAMINANTES

Pagani (2007) verificou a condutividade hidráulica de misturas solo-cimento-bentonita em um sistema triaxial e Lemos (2006) analisou amostras semelhantes através de um permeômetro de parede rígida. Os autores tiveram resultados semelhantes com valores de K na ordem de 10^{-9} m/s.

Leite (2000) desenvolveu um estudo experimental para avaliar a percolação de soluções de KCl e $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ em colunas de solos compactados, visando a aplicação de misturas dos materiais inconsolidados da Fm. Botucatu e Serra Geral como barreiras de proteção ambiental. As misturas apresentaram fração argila de aproximadamente 28,0%. A autora utilizou concentrações de KCl de 50, 150 e 550 ppm. Os valores de fator de retardamento (R_d) para K^+ obtidos variaram entre 5,9 e 13,2. A condutividade hidráulica durante a fase de percolação do contaminante (KCl) variou entre $3,48 \times 10^{-8}$ m/s e $2,1 \times 10^{-9}$ m/s.

Basso (2003) realizou um estudo com misturas de solos lateríticos compactados da Formação Botucatu e Serra Geral. As misturas apresentaram um

valor médio de fração argila de 26,7%. A autora verificou os parâmetros de transporte e atenuação dos íons K^+ , Cu^{2+} e Cl^- através de ensaios em coluna. Foram utilizadas soluções percolantes de cloreto de potássio e de cobre em três diferentes concentrações. As curvas de chegadas para as soluções das soluções de KCl indicam que com o aumento da concentração iônica há uma diminuição da capacidade sorciva da mistura para os íons de potássio. Segundo a autora as misturas compactadas mostraram-se satisfatórias para o uso em barreiras de proteção ambiental, levando em consideração que os resultados de condutividade hidráulica e de sorção dos íons. Os valores condutividade hidráulica foram da ordem de 10^{-9} m/s, e os valores de R_d para o K^+ obtidos por Basso (2003) foram da ordem de 9,0 a 5,0. Após percolação com KCl as amostras obtiveram um valor máximo de K de $5,68 \times 10^{-9}$ m/s e um valor mínimo de $2,53 \times 10^{-9}$ m/s.

Musso (2008) verificou o comportamento de um solo argiloso proveniente da Formação Corumbataí e de um geocomposto bentonítico (GCL) composto por bentonita sódica frente à gradientes hidráulicos e químicos. A amostra de solo utilizada apresentou uma fração argila de 54,0%. Foram realizados ensaios de advecção e difusão-membrana com solução contaminante de KCl e $CuCl_2 \cdot 2H_2O$. Não foram relatadas variações no comportamento hidráulico dos materiais quando percolados com soluções de KCl. A solução de $CuCl_2 \cdot 2H_2O$ alterou a condutividade hidráulica do GCL em até 200 vezes. A amostra de solo compactado apresentou um R_d de 13,9 para retenção de K^+ .

Os parâmetros de retardamento de K^+ para as misturas SCA obtidos com o modelo de van Genuchten (1980) nos ensaios de coluna variam de 3,3 a 13,4. Estes resultados são semelhantes aos fatores encontrados pelas misturas de solos feitas por Leite (2000) e são superiores aos obtidos por Basso (2003).

A Figura 6-34 apresenta a comparação dos dados de CTC com os valores de R_d obtidos pelos ajustes linear e Freundlich, das isotermas de sorção do ensaio de equilíbrio em lote, e também com os resultados de R_d do ensaio de coluna. Todas as superfícies adotaram $w = 11,0\%$. As linhas pontilhadas representam os dados de CTC (mEq/100g) e as linhas cheias os dados de R_d .

Figura 6-34 - Comparação entre os resultados de CTC vs. $R_{d,linear}$ (a), CTC vs. $R_{d,Freundlich}$ (b) e CTC vs. $R_{d,van\ Genuchten}$ (c), para $w = 11,0\%$.

Fonte: Do autor.

Comparando as superfícies de resposta da CTC das misturas SCA para um teor de umidade de 11,0% com as superfícies de resposta dos valores de R_d é possível ver que apresentam tendência semelhante. A CTC apresenta valores mais elevados para as misturas com maior quantidade de argila e menor teor de cimento. Os valores do fator de retardamento, para os três ajustes apresentados, apontaram uma região de maior R_d para valores entre o nível médio e alto de argila combinados com os menores valores de cimento.

As superfícies de resposta obtidas pelo ajuste linear e pelo modelo de Freundlich, apesar de apresentarem valores de R_d mais elevados, possuem um comportamento semelhante a projeção obtida pelo ensaio de coluna.

A Figura 6-35 apresenta a projeção das superfícies de resposta para a condutividade hidráulica com fluxo de água (linhas cheias) e com o fluxo da solução de KCl (linhas pontilhadas).

Figura 6-35 – Condutividade hidráulica das misturas SCA para fluxo com água (linhas cheias) e percolação de solução KCl (linhas pontilhadas), para $w = 11,0\%$.

Fonte: Do autor.

Os resultados experimentais de condutividade hidráulica obtidos neste trabalho, para a fase de percolação do contaminante tiveram uma variação entre $6,4 \times 10^{-8}$ m/s e $3,4 \times 10^{-9}$ m/s. Estes resultados se assemelham aos encontrados por Leite (2000) e Basso (2003) com misturas de solo arenoso da Fm. Botucatu com solo argiloso da Fm. Serra Geral. Apesar de haver um aumento de K com a passagem do contaminante, observa-se que para os teores de argila e cimento mais elevados o aumento de K foi menor.

7. PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA

7.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES (RCS)

7.1.1 Solo sem estabilizante

Foram realizados ensaios de resistência à compressão para o solo natural compactado (mistura PD-01) seguindo a norma de solo-cimento (NBR 12025:2012) para fim de comparação. Os resultados de *RC* para os corpos-de-prova sem estabilizante atingiram um valor médio de 23,30 kPa e um desvio padrão de 2,438 kPa.

7.1.2 Misturas SCA

Foram obtidos resultados de resistência à compressão simples para as misturas de solo-cimento-argila após os períodos de cura de 7 (*RC7*) e 28 dias (*RC28*). Os valores da *RC7* são descritos na Tabela 7-1.

Tabela 7-1 - Composições das misturas SCA e resultados de *RC7*.

Mistura	Composição			RC7 (kPa)	
	w (%)	C (%)	A (%)	<i>RC7</i>	Desv.
PD-01 *	6,4	0	0	23,300	2,438
SCA-01	9	3	3	197,69	4,996
SCA-02	9	3	9	62,406	0,338
SCA-03	9	9	3	2239,98	79,416
SCA-04	9	9	9	963,32	1,735
SCA-05	13	3	3	231,96	0,552
SCA-06	13	3	9	328,64	5,255
SCA-07	13	9	3	1535,70	0,451
SCA-08	13	9	9	1083,45	33,149
SCA-09	7,636	6	6	571,78	27,336
SCA-10	14,364	6	6	393,12	17,911
SCA-11	11	0,955	6	32,79	0,444
SCA-12	11	11,045	6	1065,90	44,576
SCA-13	11	6	0,955	535,43	6,394
SCA-14	11	6	11,045	257,82	4,274
SCA-15	11	6	6	840,11	52,566
SCA-16	11	6	6	940,59	6,609

Nota: * sem imersão.

Fonte: Do autor.

A Tabela 7-2 mostra os resultados da análise de variância dos dados experimentais de resistência à compressão simples (RC7) das misturas de SCA, após 7 dias de cura e com procedimento de imersão. Adotando um nível de significância (α) de 0,10, para o teste de hipóteses ($p \leq \alpha$ para a rejeição da hipótese nula), apenas os fatores C linear (x_2) e A linear (x_3) mostraram-se significantes para o modelo.

A proporção de variabilidade na medida da RC7, obtida na análise de variância, foi $R^2 = 0,83$. A equação final ajustada para o modelo pode ser representada pela (Eq. 7-1) , na qual x_1 representa os valores do fator w e x_2 do fator C e x_3 do fator A.

Tabela 7-2 - Análise de variância da RC7 para as misturas SCA.

Fonte	Soma dos Quadrados	Graus de liberdade	Média dos quadrados	F	p
w (X1)	24984	1	24984	4,9484	0,268954
w(X1 ²)	28887	1	28887	5,7215	0,252090
C (X2)	3325609	1	3325609	658,6859	0,024793
C (X2 ²)	9599	1	9599	1,9013	0,399452
A (X3)	365572	1	365572	72,4069	0,074474
A (X3 ²)	68812	1	68812	13,6292	0,168402
X1.X2	97831	1	97831	19,3769	0,142210
X1.X3	139494	1	139494	27,6289	0,119685
X2.X3	357137	1	357137	70,7363	0,075340
Falta de ajuste	901512	5	180302	35,7116	0,126339
Erro	5049	1	5049		
Total	5291513	15			

Fonte: Do autor.

$$RC7 = -234245 + 264,27 \cdot x_1 - 13,96 \cdot x_1^2 + 551,01 \cdot x_2 - 3,58 \cdot x_2^2 - 40,86 \cdot x_3 - 9,58 \cdot x_3^2 - 18,43 \cdot x_1 \cdot x_2 + 22,01 \cdot x_1 \cdot x_3 - 23,48 \cdot x_2 \cdot x_3 \quad (\text{Eq. 7-1})$$

Como pode ser observado na Figura 7-1, a disposição dos resíduos do modelo RC7 das misturas SCA (Eq. 7-1) segue aproximadamente uma tendência normal.

A Figura 7-2 apresenta o gráfico dos resíduos versus os valores previstos do modelo RC7 (Eq. 7-1). Como pode ser observado há uma inadequação do modelo, pois a variância dos resíduos aumenta para os maiores valores da variável resposta.

Figura 7-1 – Probabilidade Normal dos Resíduos RC7 com imersão.

Fonte: Do autor.

Figura 7-2 – Resíduos versus Valores Previstos RC7 com imersão.

Fonte: Do autor.

Foram testadas transformações da variável RC7, tais como $\log(RC7)$, $\sqrt{RC7}$, $RC7^{-1}$, mas não foram obtidos modelos lineares com melhores ajustes.

A Figura 7-3 representa graficamente o efeito de C e A sobre a RC7, para um $w = 9,0\%$. Observando o comportamento das misturas SCA nesta figura é possível identificar o cimento como o principal fator de aumento da RC. A curvatura da projeção

indica que, para as misturas com maior quantidade de cimento, quantidade de argila passou a exercer maior influência de modo a reduzir a resistência.

Figura 7-3 – Projeção da superfície de resposta da RC7 (kPa) das misturas SCA com imersão ($w = 9,0\%$).

Fonte: Do autor.

A Figura 7-4 mostra a projeção da superfície de resposta da RC7 para $w = 11,0\%$ e a Figura 7-5 para $w = 13,0\%$. As curvas das Figuras 7-3, 7-4 e 7-5 mostram que os efeitos de C e A sobre a RC7 são semelhantes para dos dados teores de umidade. Pode ser observado, também, que a resistência à compressão simples apresenta uma tendência de diminuir com o aumento do w .

Figura 7-4 – Projeção da superfície de resposta da RC7 (kPa) das misturas SCA com imersão ($w = 11,0\%$).

Fonte: Do autor.

Figura 7-5 – Projeção da superfície de resposta da RC7 (kPa) das misturas SCA com imersão ($w = 13,0\%$).

Fonte: Do autor.

Os resultados do ensaio de resistência à compressão simples aos 28 dias de cura (*RC28*) das misturas são apresentados na Tabela 7-3.

Tabela 7-3 - Composições das misturas e resultados de *RC28*.

Mistura	Composição			RC28 (kPa)	
	w (%)	C (%)	A (%)	$\overline{RC28}$	Desv.
PD-01 *	6,4	0	0	16,767	0,0005
SCA-01	9	3	3	240,826	25,521
SCA-02	9	3	9	26,195	0,140
SCA-03	9	9	3	2653,431	372,731
SCA-04	9	9	9	711,889	23,971
SCA-05	13	3	3	106,647	2,797
SCA-06	13	3	9	107,341	5,826
SCA-07	13	9	3	1925,152	217,690
SCA-08	13	9	9	1160,558	26,109
SCA-09	7,636	6	6	435,493	27,031
SCA-10	14,364	6	6	415,849	54,765
SCA-11	11	0,955	6	20,522	3,727
SCA-12	11	11,045	6	1234,600	38,800
SCA-13	11	6	0,955	1012,717	106,866
SCA-14	11	6	11,045	267,475	33,378
SCA-15	11	6	6	629,763	2,347
SCA-16	11	6	6	836,795	23,716

Nota: * sem imersão.

Fonte: Do autor.

Os resultados da análise de variância dos dados experimentais da *RC28* das misturas SCA são exibidos na Tabela 7-4. Adotando um nível de significância (α) de 0,10, para o teste de hipóteses, apenas os fatores C linear (x_2), A linear (x_3) e a interação $x_2 \cdot x_3$ mostraram-se significantes para o modelo. Optou-se por um valor de α maior do que 0,05 a fim de se obter um modelo mais representativo.

A proporção de variabilidade na medida da *RC28*, obtida na análise de variância, foi $R^2 = 0,87$. A equação final ajustada para o modelo pode ser representada pela (Eq. 7-2), na qual x_1 representa os valores do fator w, x_2 do fator C e x_3 do fator A.

$$\begin{aligned}
 RC28 = & -143,475 + 38,936 \cdot x_1 - 9,002 \cdot x_1^2 + 407,996 \cdot x_2 \\
 & + 3,930 \cdot x_2^2 - 266,315 \cdot x_3 + 4,423 \cdot x_3^2 - 4,720 \cdot x_1 \cdot x_2 \\
 & + 29,006 \cdot x_1 \cdot x_3 - 34,614 \cdot x_2 \cdot x_3
 \end{aligned}
 \quad (Eq. 7-2)$$

Tabela 7-4 - Análise de variância da RC28 para as misturas SCA.

Fonte	Soma dos Quadrados	Graus de liberdade	Média dos quadrados	F	p
w (X1)	24984	1	24984	4,9484	0,268954
w(X1 ²)	28887	1	28887	5,7215	0,252090
C (X2)	3325609	1	3325609	658,6859	0,024793
C (X2 ²)	9599	1	9599	1,9013	0,399452
A (X3)	365572	1	365572	72,4069	0,074474
A (X3 ²)	68812	1	68812	13,6292	0,168402
X1.X2	97831	1	97831	19,3769	0,142210
X1.X3	139494	1	139494	27,6289	0,119685
X2.X3	357137	1	357137	70,7363	0,075340
Falta de ajuste	901512	5	180302	35,7116	0,126339
Erro	5049	1	5049		
Total	5291513	15			

Fonte: Do autor.

A Figura 7-6 apresenta o gráfico de probabilidade normal dos resíduos para verificação do modelo RC28 (Eq. 7-2). Os resíduos seguem uma tendência aproximadamente normal.

Figura 7-6 - Probabilidade Normal dos Resíduos RC28 com imersão.

Fonte: Do autor.

A Figura 7-7 apresenta a análise dos resíduos a respeito das suas distribuições quanto à normalidade e aleatoriedade. Assim como o modelo RC7 (Eq. 7-2) há uma inadequação no RC28.

Figura 7-7 – Resíduos versus Valores Previstos RC28 com imersão.

Fonte: Do autor.

A Figura 7-8 representa graficamente o efeito de C e A sobre a RC28, para um $w = 9,0\%$. A Figura 7-9 mostra a projeção da superfície de resposta da RC28 para $w = 11,0\%$ e a Figura 7-10 para $w = 13,0\%$.

Figura 7-8 - Projeção da superfície de resposta da RC28 (kPa) das misturas SCA ($w = 9,0\%$).

Fonte: Do autor.

Figura 7-9 - Projeção da superfície de resposta da RC28 (kPa) das misturas SCA ($w = 11,0\%$).

Fonte: Do autor.

Figura 7-10 - Projeção da superfície de resposta da RC28 (kPa) das misturas SCA ($w = 13,0\%$).

Fonte: Do autor.

O comportamento da resistência à compressão das misturas SCA para os

tempos de cura de 7 e 28 dias apresentaram a mesma tendência de diminuir os valores de RC com o aumento do w. Em todas as situações o teor de cimento apresentou maior influência no aumento da RC quando comparado com o fator quantidade de bentonita (argila).

Embora não tenha sido possível realizar um modelo de regressão linear adequado que descreva a RC em função dos fatores w, C e A, foi possível comparar os resultados e estabelecer a tendência do comportamento das misturas.

Nos ensaios foram respeitados os procedimentos da NBR 12025:2012, que estabelece a imersão dos corpos-de-prova em água por 4 horas antes do ensaio de compressão simples. Foi observado que esse processo danificou a integridade dos espécimes ensaiados. Os corpos-de-prova com maior quantidade de argila sofreram os maiores danos com a imersão, o que pode ser justificado pela característica expansiva das argilas montmorilonitas (bentonita).

7.1.3 Misturas SCA Sem Imersão

A Tabela 7-5 apresenta os resultados do ensaio de resistência à compressão simples aos 7 dias de cura sem o processo de imersão dos corpos-de-prova (RC_{7SI})

Tabela 7-5 - Composições das misturas e resultados de RC7 sem imersão.

Mistura	Composição			RC7 _{SI} (kPa)	
	w (%)	C (%)	A (%)	RC7	Desv.
PD-01	6,4	0	0	23,30	2,438
SCA-01	9	3	3	1448,50	9,078
SCA-02	9	3	9	700,70	32,649
SCA-03	9	9	3	6266,25	94,533
SCA-04	9	9	9	3264,59	102,636
SCA-05	13	3	3	642,67	1,765
SCA-06	13	3	9	1080,06	18,530
SCA-07	13	9	3	3249,31	10,804
SCA-08	13	9	9	3858,55	8,103
SCA-09	7,636	6	6	1872,94	118,842
SCA-10	14,364	6	6	1745,61	3,601
SCA-11	11	0,955	6	508,52	2,647
SCA-12	11	11,045	6	6347,10	37,813
SCA-13	11	6	0,955	2525,47	24,309
SCA-14	11	6	11,045	2142,23	29,710
SCA-15	11	6	6	3084,42	42,315
SCA-16	11	6	6	3029,67	126,945

Fonte: Do autor.

Os resultados da análise de variância dos dados experimentais da $RC7$ das misturas SCA (sem imersão) são exibidos na Tabela 7-6. Adotando um nível de significância (α) de 0,05, para o teste de hipóteses, os fatores w linear (x_1), w quadrático (x_1^2), C linear (x_2), A linear (x_3), A quadrático (x_3^2) e as interações $x_1 \cdot x_2$, $x_1 \cdot x_3$ e $x_2 \cdot x_3$, mostraram-se significantes para o modelo.

A Tabela 7-6 também mostra que o modelo não apresenta falta de ajuste ($p = 0,0587 \geq \alpha$). A análise de variância da $RC7_{SI}$ apresentou uma proporção de variabilidade de $R^2 = 0,98$. A equação final ajustada para o modelo pode ser representada pela (Eq. 7-3), na qual x_1 representa os valores do fator w , x_2 do fator C e x_3 do fator A .

Tabela 7-6 - Análise de variância da $RC7$ sem imersão para as misturas SCA.

Fonte	Soma dos Quadrados	Graus de liberdade	Média dos quadrados	F	p
w (X1)	687235	1	687235	458,54	0,029708
w(X1 ²)	2665599	1	2665599	1778,56	0,015093
C (X2)	37353390	1	37353390	24923,15	0,004032
A (X3)	820456	1	820456	547,43	0,027193
A (X3 ²)	1020762	1	1020762	681,08	0,024382
X1.X2	498257	1	498257	332,45	0,034880
X1.X3	2875317	1	2875317	1918,49	0,014532
X2.X3	541845	1	541845	361,53	0,033451
Falta de ajuste	1521973	6	253662	169,25	0,058771
Erro	1499	1	1499		
Total	47269588	15			

Fonte: Do autor

$$RC7_{SI} = -11415,2 + 2213,9 \cdot x_1 - 121,6 \cdot x_1^2 + 11823 \cdot x_2 - 605,9 \cdot x_3 - 33,5 \cdot x_3^2 - 41,6 \cdot x_1 \cdot x_2 + 99,9 \cdot x_1 \cdot x_3 - 28,9 \cdot x_2 \cdot x_3 \quad (\text{Eq. 7-3})$$

A Figura 7-11 apresenta a distribuição dos resíduos para o modelo $RC7_{SI}$ (Eq. 7-3). Os valores residuais deste modelo aparentemente seguem uma tendência normal.

A Figura 7-12 apresenta o gráfico dos resíduos versus os valores previstos do modelo $RC7_{SI}$ (Eq. 7-3). Nota-se que não há presença de uma tendência aparente na distribuição dos resíduos e, portanto, o modelo proposto é adequado.

Figura 7-11 - Probabilidade Normal dos Resíduos RC7 sem imersão.

Fonte: Do autor.

Figura 7-12 – Resíduos versus Valores Previstos RC7 sem imersão.

Fonte: Do autor.

A Figura 7-13 representa graficamente o efeito de C e A sobre a $RC7_{SI}$, para um $w = 9,0\%$. A Figura 7-14 mostra a projeção da superfície de resposta da $RC7_{SI}$ para $w = 11,0\%$ e a Figura 7-15 para $w = 13,0\%$.

Figura 7-13 - Projeção da superfície de resposta da RC7 (kPa) das misturas SCA sem imersão ($w = 9,0\%$).

Fonte: Do autor.

Figura 7-14 - Projeção da superfície de resposta da RC7 (kPa) das misturas SCA sem imersão ($w = 11,0\%$).

Fonte: Do autor.

Figura 7-15 - Projeção da superfície de resposta da RC7 (kPa) das misturas SCA sem imersão ($w = 13,0\%$).

Fonte: Do autor.

Segundo o modelo de $RC7_{SI}$ para as misturas de solo-cimento-argila (Eq. 7-3) com uma dosagem de $w = 9,0\%$, $C = 9,0\%$ e $A = 3,0\%$ pode ser obtido um ponto de maior valor de RC, que corresponde a 6266 kPa. Da mesma forma que para as amostras com imersão, o modelo mostrou que aumento do teor de umidade ocasiona a diminuição da resistência a compressão, mas no caso do teor de umidade de 13% (Figura 7-15), o aumento da quantidade de argila ocasionou o aumento da resistência, o que não foi observado no modelo com imersão.

Os resultados do ensaio de resistência à compressão simples aos 28 dias de cura sem o procedimento de imersão dos espécimes ($RC28_{SI}$) das misturas SCA são apresentados na Tabela 7-7.

Os resultados da análise de variância dos dados experimentais da $RC28_{SI}$ das misturas SCA (sem imersão) são exibidos na Tabela 7-8. Adotando um nível de significância (α) de 0,10, para o teste de hipóteses, os fatores w linear (x_1), w quadrático (x_1^2), C linear (x_2), C quadrático (x_2^2), A quadrático (x_3^2) e a interação $x_1.x_2$ mostraram-se significantes para o modelo. Foi adotado um valor de α maior do que 0,05 a fim de se obter um modelo mais representativo.

A proporção de variabilidade na medida da $RC28_{SI}$ que é explicada pelos fatores w , C e A , obtida na análise de variância, foi $R^2 = 0,95$. A equação final ajustada para o modelo pode ser representada pela (Eq. 7-4), na qual x_1 representa os valores do fator w , x_2 do fator C e x_3 do fator A .

Tabela 7-7 - Composições das misturas e resultados de $RC28$ sem imersão.

Mistura	Composição			$RC28_{SI}$ (kPa)	
	w (%)	C (%)	A (%)	$RC28$	σ
PD-01	6,4	0	0	16,767	0,0005
SCA-01	9	3	3	1186,587	281,298
SCA-02	9	3	9	848,614	13,505
SCA-03	9	9	3	5798,970	17,106
SCA-04	9	9	9	3669,476	61,222
SCA-05	13	3	3	593,966	22,508
SCA-06	13	3	9	653,277	13,236
SCA-07	13	9	3	3057,685	170,160
SCA-08	13	9	9	4197,871	129,646
SCA-09	7,636	6	6	2082,383	18,907
SCA-10	14,364	6	6	1736,699	49,722
SCA-11	11	0,955	6	627,707	5,402
SCA-12	11	11,045	6	8579,725	726,555
SCA-13	11	6	0,955	2081,747	36,013
SCA-14	11	6	11,045	1830,918	5,402
SCA-15	11	6	6	3778,338	29,710
SCA-16	11	6	6	3626,823	161,157

Fonte: Do autor

Tabela 7-8 - Análise de variância da $RC28$ sem imersão para as misturas SCA.

Fonte	Soma dos Quadrados	Graus de liberdade	Média dos quadrados	F	p
w (X_1)	939623	1	939623	81,860	0,070079
w (X_1^2)	4495539	1	4495539	391,650	0,032141
C (X_2)	52651592	1	52651592	4586,985	0,009399
C (X_2^2)	606787	1	606787	52,863	0,087014
A (X_3^2)	4284551	1	4284551	373,268	0,032922
$X_1.X_3$	1680827	1	1680827	146,433	0,052490
Falta de ajuste	3606864	8	450858	39,279	0,122817
Erro	11478	1	11478		
Total	70509098	15			

Fonte: Do autor

$$RC28_{SI} = -16032,6 + 3219,0 \cdot x_1 - 173,5 \cdot x_1^2 + 310,0 \cdot x_2 + 28,7 \cdot x_2^2 - 74,9 \cdot x_3 + 77,9 \cdot x_1 \cdot x_3 \quad (\text{Eq. 7-4})$$

Como pode ser observado na Figura 7-16, a disposição dos resíduos do modelo $RC28_{SI}$ das misturas SCA (Eq. 7-4) segue aproximadamente uma tendência normal.

A Figura 7-17 apresenta o gráfico dos resíduos versus os valores previstos do modelo RC28_{SI} (Eq. 7-4). A distribuição dos resíduos não corresponde a nenhuma anomalia tradicional identificada por Montgomery et al. (2004a), portanto pode ser considerada aceitável.

Figura 7-16 - Probabilidade Normal dos Resíduos RC28 sem imersão.

Fonte: Do autor.

Figura 7-17 – Resíduos versus Valores Previstos RC28 sem imersão.

Fonte: Do autor.

A Figura 7-18 representa graficamente o efeito de C e A sobre a RC28_{SI}, para um $w = 9,0\%$. A Figura 7-19 mostra a projeção da superfície de resposta da RC28_{SI} para $w = 11,0\%$ e a Figura 7-20 para $w = 13,0\%$.

Figura 7-18 - Projeção da superfície de resposta da RC28 (kPa) das misturas SCA sem imersão ($W = 9,0\%$).

Fonte: Do autor.

Figura 7-19 - Projeção da superfície de resposta da RC28 (kPa) das misturas SCA sem imersão ($W = 11,0\%$).

Fonte: Do autor.

Figura 7-20 - Projeção da superfície de resposta da RC28 (kPa) das misturas SCA sem imersão ($W = 13,0\%$).

Fonte: Do autor.

A resistência à compressão simples das misturas SCA apresentou um comportamento semelhante para os diferentes teores de umidade (w) tanto para 7 dias, como para 28 dias de cura. Quando comparados os resultados de 7 dias de cura com os de 28 dias a RC continuou a aumentar com a idade.

Os resultados dos ensaios sem a imersão dos corpos-de-prova apresentaram valores maiores que os ensaios preconizados pela NBR 12025:2012. Durante os ensaios foi observado que, com a imersão em água, os corpos-de-prova não mantiveram sua integridade estrutural e perderam massa.

Os danos causados nos espécimes pela imersão em água pode justificar a falha dos modelos em descrever o comportamento da RC em função de w , C e A . Como a variável da imersão e consequente expansão da bentonita não foi considerada, o modelo foi inadequado. A remoção desta variável permitiu estabelecer os modelos $R7_{SI}$ e $RC28_{SI}$.

Considerando que as barreiras de proteção ambiental não estarão sujeitas a uma imersão em água, apenas a saturação, é previsto que o comportamento real esteja entre os resultados obtidos nos ensaios com e sem imersão.

7.1.4 Misturas SC

I) Fatorial 3²

Foram obtidos resultados de resistência à compressão para as misturas de solo-cimento após os períodos de cura de 7 ($RC7_{SC}$) e 28 dias ($RC28_{SC}$). Os valores da $RC7_{SC}$, para o fatorial 3², são descritos na Tabela 7-9. Estes ensaios foram realizados sem a imersão dos corpos-de-prova.

Os resultados da análise de variância dos dados experimentais da $RC7$ das misturas de solo-cimento são exibidos na Tabela 7-10. Adotando um nível de significância (α) de 0,05, para o teste de hipóteses, os fatores w linear (x_1), w quadrático (x_1^2), C linear (x_2), C quadrático (x_2^2) e as interações $x_1.x_2$, $x_1^2.x_2$ e $x_1^2.x_2^2$ mostraram-se significantes para o modelo.

Tabela 7-9 - Composições das misturas SC (Fatorial 3²) e resultados de $RC7$.

Mistura	Composição		$RC7_{SC}$ (kPa)	
	w (%)	C (%)	$\overline{RC7_{SC}}$	Desv.
PD-001	6,4	0	23,300	2,438
SC-301	6,4	3	698,83	105,888
SC-302	6,4	6	2452,13	8,824
SC-303	6,4	9	4823,14	273,544
SC-304	7,6	3	987,40	30,829
SC-305	7,6	6	2402,21	79,416
SC-306	7,6	9	5578,12	600,032
SC-307	8,8	3	600,40	23,617
SC-308	8,8	6	2913,85	97,064
SC-309	8,8	9	6046,09	26,472
SC-310	7,6	6	2414,69	79,416
SC-311	7,6	6	2433,41	17,648

Fonte: Do autor.

A Tabela 7-10 também mostra que o modelo não apresenta falta de ajuste ($p = 0,066 \geq \alpha$). A análise de variância da $RC7_{SI}$ apresentou uma proporção de variabilidade de $R^2 = 0,99$. A equação final ajustada para o modelo pode ser representada pela (Eq. 7-5), na qual x_1 representa os valores do fator w e x_2 do fator C .

A avaliação da adequação do modelo proposto pela (Eq. 7-5) foi realizada através da análise dos resíduos (APÊNDICE D). A verificação mostrou que os valores residuais apresentam pequeno desvio da distribuição normal e estão aleatoriamente distribuídos.

Tabela 7-10 - Análise de variância da $RC7$ para as misturas SC (Fatorial 3^2).

Fonte	Soma dos Quadrados	Graus de liberdade	Média dos quadrados	F	p
w (x_1)	419361	1	419361	1700,8	0,0006
w(x_1^2)	12067	1	12067	48,9	0,0198
C (x_2)	33421018	1	33421018	135545,9	0,0000
C (x_2^2)	654733	1	654733	2655,4	0,0003
$x_1 \cdot x_2$	436504	1	436504	1770,3	0,0006
$x_1^2 \cdot x_2$	12581	1	12581	51,0	0,0190
$x_1^2 \cdot x_2^2$	162262	1	162262	658,1	0,0015
Falta de ajuste	3369	1	3369	13,7	0,0660
Erro	493	2	247		
Total	35434370	10			

Fonte: Do autor.

$$RC7_{SC} = 2,1389 - 0,1873 \cdot x_1 - 0,3882 \cdot x_2 + 0,0509 \cdot x_2^2 + 0,5841 \cdot x_3 - 0,0274 \cdot x_3^2 + 0,0685 \cdot x_1 \cdot x_3 - 0,0973 \cdot x_2 \cdot x_3 \quad (\text{Eq. 7-5})$$

A Figura 7-21 representa graficamente o efeito de w e C sobre a $RC7$. Os resultados de $RC7$ mostram que o cimento é o fator principal capaz de modificar a resistência à compressão das misturas SC.

Figura 7-21 - Projeção da superfície de resposta da $RC7_{SC}$ (kPa) das misturas SC (Fatorial 3^2).

Fonte: Do autor.

Os resultados do ensaio de resistência à compressão simples aos 28 dias de cura (RC_{28SC}) das misturas solo-cimento são apresentados na Tabela 7-11.

Tabela 7-11 - Composições das misturas SC (Fatorial 3^2) e resultados de RC_{28SC} .

Mistura	Composição		RC_{28SC} (kPa)	
	w (%)	C (%)	$\overline{RC}_{28SC}$	Desv.
PD-001	6,4	0	16,767	0,0005
SC-301	6,4	3	849,82	1,765
SC-302	6,4	6	3487,89	273,544
SC-303	6,4	9	5185,03	344,136
SC-304	7,6	3	2059,06	56,054
SC-305	7,6	6	4685,87	8,824
SC-306	7,6	9	6576,44	511,792
SC-307	8,8	3	1398,28	62,362
SC-308	8,8	6	3806,10	352,960
SC-309	8,8	9	7063,13	335,312
SC-310	7,6	6	4679,63	35,296
SC-311	7,6	6	4916,73	282,368

Fonte: Do autor.

Os resultados da análise de variância dos dados experimentais da RC_7 das misturas de solo-cimento são exibidos na Tabela 7-12. Adotando um nível de significância (α) de 0,05, para o teste de hipóteses, os fatores w linear (x_1), w quadrático (x_1^2), C linear (x_2) e a interação $x_1.x_2$ mostraram-se significantes para o modelo.

Tabela 7-12 - Análise de variância da RC_{28} para as misturas SC (Fatorial 3^2).

Fonte	Soma dos Quadrados	Graus de liberdade	Média dos quadrados	F	p
w (x_1)	1255624	1	1255624	68,768	0,0142
w(x_1^2)	2470914	1	2470914	135,327	0,0073
C (x_2)	35125998	1	35125998	1923,777	0,0005
$x_1.x_2$	441981	1	441981	24,206	0,0389
Falta de ajuste	580886	4	145222	7,953	0,1148
Erro	36518	2	18259		
Total	39911922	10			

Fonte: Do autor.

A proporção de variabilidade na medida da RC_7 que é explicada pelos fatores w e C , obtida na análise de variância, foi $R^2 = 0,984$. A equação final ajustada para o modelo pode ser representada pela (Eq. 7-6), na qual x_1 representa os valores do fator w e x_2 do fator C .

$$RC28_{SC3} = -37121,8 + 9874,4 \cdot x_1 - 661,0 \cdot x_1^2 + 104,8 \cdot x_2 + 104,8 \cdot x_2 + 92,3 \cdot x_1 \cdot x_2 \quad (\text{Eq. 7-6})$$

A avaliação da adequação do modelo proposto pela (Eq. 7-6) foi realizada através da análise dos resíduos (APÊNDICE D). A verificação mostrou que os valores residuais seguem uma distribuição normal e estão aleatoriamente distribuídos. Portanto, o modelo $RC28_{SC3}$ é adequado para descrever o comportamento de RC das misturas SC, após 28 dias de cura, como uma função do teor de umidade (w) e quantidade de cimento (C).

A Figura 7-22 representa graficamente o efeito de w e C sobre a $RC28$.

Figura 7-22 - Projeção da superfície de resposta da $RC28_{SC}$ (kPa) das misturas SC (Fatorial 3^2).

Fonte: Do autor.

Observando o comportamento das misturas de solo-cimento na Figura 7-22 é possível identificar o C como o principal fator de aumento da $RC28$. A curvatura da projeção indica que, para as misturas com maior quantidade de cimento, o teor de umidade passou a exercer maior influência. Os maiores valores de RC foram obtidos por misturas com níveis médios de w , entre 7,6 e 8,6%.

IV) Fatorial 2² composto

Os valores da $RC7_{sc}$, para o fatorial 2² composto, são descritos na Tabela 7-13. Os resultados da análise de variância dos dados experimentais da $RC7$ das misturas de solo-cimento são exibidos na Tabela 7-14. Adotando um nível de significância (α) de 0,05, para o teste de hipóteses, os fatores C linear (x_2) C quadrático (x_2^2) e a interação $x_1.x_2$ mostraram-se significantes para o modelo.

A Tabela 7-14 também mostra que o modelo não apresenta falta de ajuste ($p = 0,053504 > \alpha$). A proporção de variabilidade na medida de K que é explicada pelos fatores w e C, obtida na análise de variância, foi $R^2 = 0,9898$. A equação final ajustada para o modelo pode ser representada pela (Eq. 7-7), na qual x_1 representa os valores do fator w e x_2 do fator C.

Tabela 7-13 - Composições das misturas SC (Fatorial 2² composto) e resultados de $RC7$.

Mistura	Composição		$RC7_{sc}$ (kPa)	
	w (%)	C (%)	$\overline{RC7_{sc}}$	σ
PD-001	6,4	0	16,767	0,0005
SC-201	6,4	3	698,83	105,89
SC-202	6,4	9	4823,14	273,54
SC-203	8,8	3	600,40	23,62
SC-204	8,8	9	6046,09	26,47
SC-205	5,9	6	2389,73	61,77
SC-206	9,3	6	1977,92	61,77
SC-207	7,6	1,75	349,41	1,41
SC-208	7,6	10,24	6932,10	8,82
SC-209	7,6	6	2464,61	8,82
SC-210	7,6	6	2433,41	17,65

Fonte: Do autor.

Tabela 7-14 - Análise de variância da $RC7$ para as misturas SC (Fatorial 2² composto).

Fonte	Soma dos Quadrados	Graus de liberdade	Média dos quadrados	F	p
C(x_2)	44553601	1	44553601	91552,83	0,002104
C (x_2^2)	2523178	1	2523178	5184,86	0,008841
$x_1.x_2$	436504	1	436504	896,97	0,021249
Falta de ajuste	488967	5	97793	200,95	0,053504
Erro	487	1	487		
Total	48002737	9			

Fonte: Do autor.

$$RC7_{SC2} = 299,711 - 249,424 \cdot x_2 + 745,583 \cdot x_2^2 + 18,562 \cdot x_1 \cdot x_2 \quad (\text{Eq. 7-7})$$

O modelo proposto pela (Eq. 7-7) é adequado para descrever o comportamento de RC das misturas SC, após 7 dias de cura, como uma função do teor de umidade (w) e quantidade de cimento (C). A verificação mostrou que os valores residuais (APÊNDICE D) mostrou que os resíduos seguem uma distribuição normal e estão aleatoriamente distribuídos.

A Figura 7-23 representa graficamente o efeito de w e C sobre a resistência à compressão simples após 7 dias de cura, para o fatorial 2^2 composto.

Figura 7-23 - Projeção da superfície de resposta da $RC7_{SC}$ (kPa) das misturas SC (Fatorial 2^2 composto).

Fonte: Do autor.

Os valores da $RC28_{SC}$, para o fatorial 2^2 composto, são descritos na Tabela 7-15. Os resultados da análise de variância dos dados experimentais da $RC28_{SC}$ das misturas de solo-cimento são exibidos na Tabela 7-16.

Adotando um nível de significância (α) de 0,05, para o teste de hipóteses, os fatores w linear (x_1), w quadrático (x_1^2) e C linear (x_2) mostraram-se significantes para o modelo.

Tabela 7-15 - Composições das misturas SC (Fatorial 2² composto) e resultados de RC28.

Mistura	Composição		RC28 _{sc} (kPa)	
	w (%)	C (%)	RC28 _{sc}	σ
PD-001	6,4	0	16,767	0,0005
SC-201	6,4	3	849,82	1,765
SC-202	6,4	9	4898,02	61,768
SC-203	8,8	3	1398,28	62,362
SC-204	8,8	9	7337,66	52,944
SC-205	5,9	6	3200,87	167,656
SC-206	9,3	6	3225,83	591,208
SC-207	7,6	1,75	574,03	141,184
SC-208	7,6	10,24	8579,33	79,416
SC-209	7,6	6	4679,63	35,296
SC-210	7,6	6	4916,73	282,368

Fonte: Do autor.

Tabela 7-16 - Análise de variância da RC28 para as misturas SC (Fatorial 2² composto).

Fonte	Soma dos Quadrados	Graus de liberdade	Média dos quadrados	F	p
w(x ₁)	1142621	1	1142621	40,650	0,099043
w (x ₁ ²)	3443002	1	3443002	122,490	0,057366
C (x ₂)	56757962	1	56757962	2019,243	0,014165
Falta de ajuste	2503493	5	500699	17,813	0,177892
Erro	28109	1	28109		
Total	63875186	9			

Fonte: Do autor.

A proporção de variabilidade na medida da RC28 que é explicada pelos fatores w e C, obtida na análise de variância, foi R² = 0,9951. A equação final ajustada para o modelo pode ser representada pela (Eq.7-8), na qual x₁ representa os valores do fator w e x₂ do fator C. A Figura 7-24 representa graficamente o efeito de w e C sobre a RC28.

$$RC28_{sc2} = -34578.8 + 8591,6 \cdot x_1 - 544,5 \cdot x_1^2 + 877,9 \cdot x_2 \quad (\text{Eq.7-8})$$

O modelo RC7_{sc3} (Fatorial 3²) mostrou que após 7 dias de cura a mistura com w = 8,8% e C = 9,0% apresenta os maiores resultados de RC. O modelo RC7_{sc2} (Fatorial 2² composto) estabeleceu a tendência de acréscimo em função do aumento do teor de cimento, mas sem regiões definidas de maiores resultados de RC.

Segundo o modelo RC28_{sc3} (Fatorial 3²) a dosagem de solo-cimento entre os teores de umidade de 7,6 a 8,6% e C = 9,0% atingem a maior RC, aos 28 dias de

cura. O modelo RC28_{sc2} (Fatorial 2² composto) mostrou uma região de w entre 7,3 e 8,3% para teor de cimento de 9,0%.

Figura 7-24 - Projeção da superfície de resposta da RC28_{sc} (kPa) das misturas SC (Fatorial 2² composto).

Fonte: Do autor.

7.1.5 Misturas SA

Foram executados ensaios de resistência à compressão nas misturas solo-argila a fim de comparar com os demais dados. Os resultados de RC das misturas solo-argila, para o Fatorial 3² são apresentados na Tabela 7-17.

Os resultados da análise de variância dos dados experimentais da RC7 das misturas de solo-argila são exibidos na Tabela 7-18. Adotando um nível de significância (α) de 0,05, para o teste de hipóteses os fatores apresentados mostraram-se significantes para o modelo.

A Tabela 7-18 também mostra que o modelo não apresenta falta de ajuste e a análise de variância da RC_{SA} apresentou uma proporção de variabilidade de $R^2 =$

0,992. A equação final ajustada para o modelo pode ser representada pela (Eq. 7-9), na qual x_1 representa os valores do fator w e x_3 do fator A .

Tabela 7-17 - Composições das misturas SA (Fatorial 3^2) e resultados de RC.

Mistura	Composição		RC _{SA} (kPa)	
	w (%)	A (%)	RC _{SA}	Desv.
PD-001	6,4	0	23,300	2,438
SA-301	6,4	3	310,478	0,706
SA-302	6,4	6	240,346	7,412
SA-303	6,4	9	266,801	8,118
SA-304	9,8	3	162,477	6,000
SA-305	9,8	6	233,607	4,941
SA-306	9,8	9	276,535	2,118
SA-307	13,2	3	133,276	2,118
SA-308	13,2	6	238,349	8,824
SA-309	13,2	9	258,066	2,118
SA-310	9,8	6	236,353	10,942
SA-311	9,8	6	238,100	13,412

Fonte: Do autor.

Tabela 7-18 – Análise de variância dos valores de RC das misturas solo-argila.

Fonte	Soma dos Quadrados	Graus de liberdade	Média dos quadrados	F	p
w (x_1)	5886,53	1	5886,535	1147,791	0,000870
w (x_1^2)	587,46	1	587,457	114,546	0,008617
A (x_3)	6348,68	1	6348,677	1237,903	0,000807
A (x_3^2)	7095,26	1	7095,264	1383,477	0,000722
$x_1 \cdot x_3$	2758,64	1	2758,639	537,896	0,001854
$x_1 \cdot x_2^2$	1800,82	1	1800,820	351,135	0,002836
$x_1^2 \cdot x_2$	306,78	1	306,778	59,817	0,016310
$x_1^2 \cdot x_2^2$	30,98	1	30,985	6,042	0,133229
Falta de ajuste	10,26	2	5,129		
Erro	24618,03	10			
Total	5886,53	1	5886,535	1147,791	0,000870

Fonte: Do autor.

A avaliação da adequação do modelo proposto (RC_{SA}) foi realizada através da análise dos resíduos (APÊNDICE D). A verificação mostrou que os valores residuais apresentam pequeno desvio da distribuição normal e estão aleatoriamente distribuídos.

$$RC_{SA} = 1157,48 - 139,91 \cdot x_1 + 3,42 \cdot x_1^3 - 123,23 \cdot x_3 + 9,38 \cdot x_1 \cdot x_3 + 1,29 \cdot x_1 \cdot x_3^2 + 0,53 \cdot x_1^2 \cdot x_3 - 0,13 \cdot x_1^2 \cdot x_3^2 \quad (\text{Eq. 7-9})$$

Figura 7-25 - Projeção da superfície de resposta dos valores de RC das misturas solo-argila.

Fonte: Do autor.

Como pode ser observado na projeção da superfície de resposta (Figura 7-25) o acréscimo de bentonita ao solo promoveu um ganho de resistência à compressão simples.

Há uma tendência de aumento da resistência para os menores valores de teor de umidade. Precisamos lembrar que os teores de umidade ótima são: $w_{ot} = 8,8\%$ para adição de 3,0% de bentonita, $w_{ot} = 12,8\%$ para 6,0% e $w_{ot} = 13,1\%$ para 9,0%. As misturas solo-argila têm o menor nível de w estabelecido em 6,4% para efeito de comparação com as demais misturas. Desse modo a maior parte da superfície de resposta encontra-se no ramo seco.

Freitas (2015) verificou que um solo siltoso, para energia de compactação normal e intermediária, quando compactado abaixo do teor de umidade ótimo, os valores de resistência à compressão simples foram maiores. O autor observa também que há uma redução da resistência para valores de w acima do w_{ot} .

Para uma adição de 3,0% de bentonita pode-se observar que ocorre uma redução da resistência à compressão simples com o aumento do teor de umidade. Segundo Lambe & Whitman (1979), este comportamento pode ser atribuído ao arranjo estrutural do solo, ou seja, as amostras compactadas no ramo seco, portanto apresentando estrutura floclada, possuem valores de resistência superiores aos

pontos correspondentes aos corpos de prova moldados no ramo úmido, que possuem estrutura dispersa ou paralela.

Para as adições de 6,0 e 9,0% de bentonita a projeção da superfície de resposta encontra-se no ramo seco e, portanto apresenta uma pequena tendência de aumento da resistência à compressão.

A Figura 7-26 apresenta uma projeção parcial da superfície de resposta das misturas solo-argila, com w variando entre 9,8 e 13,2%. Neste caso para 3,0% de argila há uma tendência a reduzir os valores de RC (ramo úmido) e para 6,0 e 9,0% um tendência de aumentar a RC (ramo seco).

Figura 7-26 - Projeção parcial da superfície de reposta dos valores de RC das misturas solo-argila.

Fonte: Do autor.

Cho et al. (2002) mostrou que, para os mesmos valores de p_d e w , o acréscimo da porcentagem de areia e diminuição do teor de argila em misturas solo-bentonita causa uma diminuição dos valores de RC. O autor verificou, também, que mantendo as demais condições e aumentando o teor de umidade há uma diminuição da RC.

Lukiantchuki (2007) avaliou a resistência à compressão de misturas solo-bentonita usando uma areia argilosa (SC), com um total de 22,0% de argila e 14,0% de silte. Foram avaliados acréscimos de 0, 3, 5, 7, e 9% de bentonita. Segundo os dados da autora, para todos os percentuais de bentonita adicionados a esse solo

houve uma diminuição da RC. As amostras com 5 e 7% de bentonita apresentaram valores mais elevados que as demais.

Ghazi (2015) apresenta a resistência à compressão simples (RC) de três solos arenosos classificados como areia mal-graduada (SP) conforme a classificação SUCS (ASTM D2487:2011). Em todos os casos mostrados pelo autor as misturas com bentonita promoveram um aumento da RC. As adições de até 10% de bentonita apresentaram grande acréscimo de RC e após esse teor a proporção de ganho de resistência diminuiu, mas continuou crescendo.

Martins (2017) utilizou uma areia siltosa (SM), com 6,45% de argila e 13,39% de silte, em misturas solo-bentonita. Nesta situação as misturas apresentaram a tendência de diminuir os valores de RC com o acréscimo do teor de bentonita. Os ensaios de Martins (2017) também mostraram um acréscimo de RC para um teor de bentonita de 5,0%.

Diferente do observado por Lukiantchuki (2007) e Martins (2017) o aumento do teor de argila causou um acréscimo dos valores de resistência à compressão simples. Cho et al. (2002) e Ghazi (2015) obtiveram comportamento semelhante aos apresentados neste trabalho (Figura 7-25).

É possível que a adição de argila ao solo tenha preenchido a matriz de poros e aumentado os contatos entre as partículas. Lukiantchuki (2007) e Martins (2017) avaliaram solos com teor de finos maior. Cho et al. (2002) e Ghazi (2015) utilizaram areia com poucos finos.

7.2 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO (CD)

Neste item são apresentados todos os resultados de resistência ao cisalhamento, obtidos através de ensaios de cisalhamento direto. Foram analisados os resultados de coesão (c) e ângulo de atrito (Φ), a partir dos resultados de resistência ao cisalhamento de pico. As curvas tensão vs. deformação obtidas nos ensaios de cisalhamento diretos são apresentadas no APÊNDICE E.

7.2.1 Misturas SCA (c e Φ)

7.2.1.1 Amostras SCA após 7 dias de cura

Os valores de c e Φ obtidos a partir das resistências ao cisalhamento de pico, através dos ensaios de cisalhamento direto, das misturas SCA, para a cura de 7 dias, são apresentados na Tabela 7-19.

Tabela 7-19 - Composições das misturas SCA e resultados do ensaio de cisalhamento direto após 7 dias de cura.

Mistura	Composição			Parâmetros	
	w (%)	C (%)	A (%)	c (kPa)	Φ (°)
PD-01 *	6,4	0	0	2,0	32,0
SCA-01	9	3	3	66,17	44,46
SCA-02	9	3	9	60,47	44,10
SCA-03	9	9	3	401,47	44,50
SCA-04	9	9	9	189,67	51,73
SCA-05	13	3	3	86,94	46,37
SCA-06	13	3	9	154,30	39,54
SCA-07	13	9	3	462,79	48,29
SCA-08	13	9	9	424,14	36,17
SCA-09	7,636	6	6	158,66	52,52
SCA-10	14,364	6	6	162,40	52,08
SCA-11	11	0,955	6	18,87	42,16
SCA-12	11	11,045	6	213,67	55,30
SCA-13	11	6	0,955	271,09	44,52
SCA-14	11	6	11,045	290,67	44,48
SCA-15	11	6	6	278,30	53,65
SCA-16	11	6	6	297,37	48,75

Fonte: * Fernandes(2016); Do autor.

Nos ensaios de cisalhamento direto, após atingir a ruptura do corpo-de-prova, em alguns solos é possível perceber uma diminuição da tensão cisalhante, enquanto o deslocamento horizontal aumenta. Quando a tensão reduz e atinge um patamar constante, Skempton (1964) considerou este valor como sendo a resistência ao cisalhamento residual do solo.

Os resultados dos ensaios realizados das misturas SCA com maior quantidade de argila e menor quantidade de cimento apresentaram um pico de resistência e posterior resistência residual (APÊNDICE E). As misturas com maior quantidade de cimento atingiram o pico e chegaram a ruptura, sem apresentar maiores deformações que pudessem identificar valores de resistência residual.

Segundo Skempton (1985), a queda de resistência ao cisalhamento pós-pico em solos argilosos acontece devido à orientação dos argilo-minerais lamelares do solo. O que justifica porque as misturas com maior quantidade de argila apresentaram este comportamento e as com maior teor de cimento não.

Não foi possível estabelecer um modelo de regressão adequado para descrever o ângulo de atrito das misturas solo-cimento-argila em função de w , C e A .

O atrito é função da interação entre duas superfícies na região de contato. O ângulo de atrito do solo, portanto, é função da estrutura do solo e dos pontos de contato intergranulares. Caputo (1987) identifica que o atrito nas areias é função da compactidade, forma das partículas e granulometria.

As reações entre os componentes da mistura, além de promover maior resistência, mudam a textura do material. As diferentes combinações de teor de umidade, cimento e argila geraram produtos com matrizes diferentes, são produtos de reações e hidratação do cimento em diferentes quantidade e tamanhos.

Após 7 dias de cura muitas reações estão sendo desenvolvidas nas misturas. As combinações dos fatores e alteração da textura podem ainda estar sujeitas a outros fatores que tornam a análise mais complexa de se explicar apenas com estas três variáveis independentes.

Segundo Vargas (1977), de uma forma intuitiva, a coesão pode ser considerada como a resistência que a fração argilosa empresta ao solo, e a qual permite que seja capaz de se manter coeso em forma de torrões ou blocos, ou ser cortado em formas diversas e manter esta forma.

A coesão das misturas SCA, após 7 dias de cura, puderam ser descritas em função dos fatores w , C e A . Considerando todos os pontos do fatorial 2^3 composto, para um nível de significância de $\alpha = 0,15$, apenas os fatores C linear e quadrático foram significativos. Portanto foi escolhido usar apenas os pontos do fatorial 2^3 com ponto central, excluindo os pontos axiais. Os resultados da análise de variância são exibidos na Tabela 7-20. Adotando um nível de significância (α) de 0,15, para o teste de hipóteses, os fatores w linear (x_1), C linear (x_2), A linear (x_3) e as interações apresentadas mostraram-se significantes para o modelo. Para este modelo foi adotado por um valor de α maior do que 0,05 a fim de se obter um modelo mais representativo.

Tabela 7-20 - Análise de variância da coesão para as misturas SCA, após 7 dias de cura (Fatorial 2³ com ponto central).

Fonte	Soma dos Quadrados	Graus de liberdade	Média dos quadrados	F	p
w (x ₁)	21053,0	1	21053,0	115,7825	0,058995
C (x ₂)	154066,6	1	154066,6	847,2999	0,021862
A (x ₃)	4455,4	1	4455,4	24,5030	0,126901
x ₁ .x ₂	4103,5	1	4103,5	22,5675	0,132082
x ₁ .x ₃	7577,7	1	7577,7	41,6742	0,097838
x ₂ .x ₃	12176,2	1	12176,2	66,9638	0,077413
Falta de ajuste	6467,3	2	3233,6	17,7837	0,165369
Erro	181,8	1	181,8		
Total	210081,6	9			

Fonte: Do autor.

Conforme apresentado na Tabela 7-20, não há falta de ajuste ($p = 0,165 > \alpha$) para o modelo proposto. A proporção de variabilidade na medida de coesão que é explicada pelos fatores w, C e A, obtida na análise de variância, foi $R^2 = 0,968$. A equação final ajustada para o modelo c_{SCA} pode ser representada pela (Eq. 7-10), na qual x_1 representa os valores do fator w, x_2 do fator C e x_3 do fator A.

$$c_{SCA7} = 161,287 - 27,775 \cdot x_1 + 30,745 \cdot x_2 - 38,2820 \cdot x_3 + 3,775 \cdot x_1 \cdot x_2 + 5,130 \cdot x_1 \cdot x_3 - 4,335 \cdot x_2 \cdot x_3 \quad (\text{Eq. 7-10})$$

Para avaliar a adequação do modelo c_{SCA} foram plotados os gráficos da probabilidade normal dos resíduos e a verificação dos resíduos versus valores previstos (APÊNDICE G). Estes gráficos mostram que os valores residuais seguem uma distribuição normal e estão aleatoriamente distribuídos. Portanto, o modelo c_{SCA} é adequado para descrever a variação da coesão das misturas SCA como uma função do teor de umidade (w) e quantidade de argila (A).

A Figura 7-27 representa graficamente o efeito de C e A sobre a coesão, após 7 dias de cura, das misturas solo-cimento- argila, para $w = 9,0\%$ e a Figura 7-28 para $w = 13,0\%$.

Figura 7-27 – Projeção da superfície de resposta para os valores de coesão das misturas SCA, após 7 dias de cura, ($w = 9,0\%$), valores em kPa.

Fonte: Do autor.

Figura 7-28 - Projeção da superfície de resposta para os valores de coesão das misturas SCA, após 7 dias de cura, ($w = 13,0\%$), valores em kPa.

Fonte: Do autor.

Como pode ser observado nas projeções das superfícies de resposta dos valores de coesão das misturas SCA, após 7 dias de cura, são alterados principalmente pelo teor de cimento adicionado ao solo.

7.2.1.2 Amostras SCA após 28 dias de cura

Os valores de c e Φ obtidos, para a cura de 28 dias, são apresentados na Tabela 7-21. Após 28 dias de cura foi possível realizar ajustes para os dois parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo (c e Φ).

Tabela 7-21 - Composições das misturas SCA e resultados do ensaio de cisalhamento direto após 28 dias de cura.

Mistura	Composição			Parâmetros	
	w (%)	C (%)	A (%)	c (kPa)	Φ (°)
PD-01 *	6,4	0	0	2,0	32,0
SCA-01	9	3	3	120,1	35,31
SCA-02	9	3	9	143,69	25,52
SCA-03	9	9	3	185,03	39,12
SCA-04	9	9	9	388,58	27,57
SCA-05	13	3	3	72,453	30,71
SCA-06	13	3	9	94,73	30,36
SCA-07	13	9	3	183,49	38,87
SCA-08	13	9	9	214,41	27,44
SCA-09	7,636	6	6	216,98	30,14
SCA-10	14,364	6	6	199,46	24,88
SCA-11	11	0,955	6	73,956	22,05
SCA-12	11	11,045	6	298,4	36,23
SCA-13	11	6	0,955	227,8	33,53
SCA-14	11	6	11,045	253,53	19,78
SCA-15	11	6	6	353,54	41,93
SCA-16	11	6	6	334,47	44,77

Fonte: * Fernandes(2016); Do autor.

A Tabela 7-22 apresenta a análise de variância para os dados de coesão após 28 dias de cura e a Tabela 7-23 para os dados de ângulo de atrito. Foi adotado um nível de significância (α) de 0,10 para o teste de hipóteses dos dados de coesão e de 0,15 para os dados de ângulo de atrito. O coeficiente de determinação para o modelo da coesão (c_{SCA28}) foi de $R^2 = 0,808$ e para o modelo do ângulo de atrito foi de $R^2 = 0,784$. Optou-se por um valor de α maior do que 0,05 a fim de se obter um modelo mais representativo.

Tabela 7-22 - Análise de variância da coesão para as misturas SCA, após 28 dias de cura.

Fonte	Soma dos Quadrados	Graus de liberdade	Média dos quadrados	F	p
w (x_1^2)	27629,4	1	27629,40	151,9498	0,051532
C (x_2)	61707,8	1	61707,75	339,3660	0,034524
C (x_2^2)	36077,4	1	36077,44	198,4103	0,045120
A (x_2)	7668,2	1	7668,17	42,1716	0,097268
A (x_2^2)	17241,4	1	17241,39	94,8202	0,065149
Falta de ajuste	27148,1	9	3016,46	16,5892	0,188439
Erro	181,8	1	181,83		
Total	142712,5	15			

Fonte: Do autor.

Tabela 7-23 - Análise de variância do ângulo de atrito para as misturas SCA, após 28 dias de cura.

Fonte	Soma dos Quadrados	Graus de liberdade	Média dos quadrados	F	p
w (x_1^2)	181,5262	1	181,5262	45,01246	0,094195
C (x_2)	89,4609	1	89,4609	22,18331	0,133188
C (x_2^2)	137,3770	1	137,3770	34,06492	0,108026
A (x_2)	231,5626	1	231,5626	57,41981	0,083531
A (x_2^2)	207,1532	1	207,1532	51,36708	0,088256
Falta de ajuste	163,9403	9	18,2156	4,51686	0,350825
Erro	4,0328	1	4,0328		
Total	778,9533	15			

Fonte: Do autor.

Os ajustes após 28 dias de cura obtiveram coeficientes de determinação razoáveis (0,80 para coesão e 0,78 para o ângulo de atrito), foi possível descrever o comportamento destes parâmetros, mas isso indica que pode haver outras variáveis que não foram consideradas no planejamento.

As análises dos resíduos (APÊNDICE G) mostram que os valores residuais para os resultados de coesão, após 28 dias de cura, tendem a ser maiores para os maiores valores de resposta. A equação final ajustada para o modelo da coesão é apresentada pela (Eq. 7-11)

$$c_{SCA28} = -93,698 - 0,576 \cdot x_1^2 + 76,250 \cdot x_2 - 4,487x_2^2 + 36,057 \cdot x_3 - 2,346 \cdot x_3^2 \quad (\text{Eq. 7-11})$$

$$\phi_{SCA28} = 22,005 - 0,021 \cdot x_1^2 + 3,550 \cdot x_2 - 0,225x_2^2 + 2,495 \cdot x_3 - 0,322 \cdot x_3^2 \quad (\text{Eq. 7-12})$$

A Figura 7-29 representa graficamente o efeito de w , C e A sobre a coesão das misturas solo-cimento-argila, para $w = 9,0\%$, a Figura 7-30 para $w = 11,0\%$ e a Figura 7-31 para $w = 13,0\%$.

Figura 7-29 - Projeção da superfície de resposta para os valores de coesão das misturas SCA, após 28 dias de cura, ($w = 9,0\%$), valores em kPa.

Fonte: Do autor.

Figura 7-30 - Projeção da superfície de resposta para os valores de coesão das misturas SCA, após 28 dias de cura, ($w = 11,0\%$), valores em kPa.

Fonte: Do autor.

Figura 7-31 - Projeção da superfície de resposta para os valores de coesão das misturas SCA, após 28 dias de cura, ($w = 13,0\%$), valores em kPa.

Fonte: Do autor.

As projeções as superfícies de resposta da coesão para as misturas solo-cimento-argila, após 28 dias de cura, mostram que os três fatores são influentes na mudança da parcela da coesão na tensão ao cisalhamento do solo. Os resultados após 7 dias de cura mostraram que o teor de cimento era o fator principal alterando a coesão das misturas. Esse fato pode ser resultado das reações de hidratação do cimento.

Os resultados da coesão das misturas SCA indicam que o teor de umidade atua de modo a reduzir os valores de c_{SCA} . Após 28 dias de cura tanto o acréscimo de argila, como o acréscimo de cimento causaram um aumento nos valores da coesão.

Passados 28 dias de cura é previsto que tenha ocorrido a maioria das reações entre o solo, cimento e argila e que as misturas alcancem valor próximo a sua resistência máxima. Os resultados de 28 dias são, portanto, mais adequados para descrever o comportamento das misturas.

A Figura 7-32 representa graficamente o efeito de w , C e A sobre o ângulo de atrito das misturas solo-cimento-argila, para $w = 9,0\%$, a Figura 7-33 para $w = 11,0\%$ e a Figura 7-34 para $w = 13,0\%$.

Figura 7-32 - Projeção da superfície de resposta para os valores de ângulo de atrito das misturas SCA, após 28 dias de cura, ($w = 9,0\%$).

Fonte: Do autor.

Figura 7-33 - Projeção da superfície de resposta para os valores de ângulo de atrito das misturas SCA, após 28 dias de cura, ($w = 11,0\%$).

Fonte: Do autor.

Figura 7-34 - Projeção da superfície de resposta para os valores de ângulo de atrito das misturas SCA, após 28 dias de cura, ($w = 13,0\%$).

Fonte: Do autor.

Os resultados de ângulo de atrito das misturas SCA, mostram que o acréscimo do teor de argila causa uma redução nos valores de Φ . O acréscimo de cimento gerou valores mais elevados de ângulo de atrito.

7.2.2 Misturas SCA (Tensão cisalhante)

Foi realizada uma análise das resistências de pico (τ) em função da tensão normal (σ), teor de umidade, cimento e argila, deste modo foi necessário adotar um Fatorial 2^4 composto.

Os resultados da análise de variância são exibidos na Tabela 7-24. Adotando um nível de significância (α) de 0,10, para o teste de hipóteses, os fatores w linear (x_1), w quadrático (x_1^2), C linear (x_2), C quadrático (x_2^2), A linear (x_3), A quadrático (x_3^2) e σ linear (x_4) mostraram-se significantes para o modelo. A equação final ajustada para o modelo τ_{SCA7} pode ser representada pela (Eq. 7-13). Foi adotado um valor de α maior do que 0,05 a fim de se obter um modelo mais representativo.

Tabela 7-24 - Análise de variância da tensão cisalhante máxima para as misturas SCA, após 7 dias de cura (Fatorial 2⁴ composto).

Fonte	Soma dos Quadrados	Graus de liberdade	Média dos quadrados	F	p
w (x ₁)	20362	1	20361,9	15,3745	0,029505
w (x ₁ ²)	40110	1	40109,9	30,2853	0,011810
C (x ₂)	650020	1	650020,4	490,8042	0,000201
C (x ₂ ²)	111879	1	111879,5	84,4757	0,002724
A (x ₃)	12916	1	12916,3	9,7526	0,052353
A (x ₃ ²)	12377	1	12377,1	9,3454	0,055122
σ (x ₄)	873475	1	873475,2	659,5259	0,000129
Falta de ajuste	141943	37	3836,3	2,8966	0,207234
Erro	3973	3	1324,4		
Total	1821832	47			

Fonte: Do autor.

$$\tau_{SCA7} = -1500,74 + 220,09 \cdot x_1 - 9,50 \cdot x_1^2 + 126,58 \cdot x_2 - 7,05 \cdot x_2^2 + 22,22 \cdot x_3 - 2,34 \cdot x_3^2 + 1,08 \cdot x_4 \quad (\text{Eq. 7-13})$$

O coeficiente de determinação para o modelo τ_{SCA7} foi $R^2 = 0,919$. A análise dos resíduos (APÊNDICE G) mostram que os valores residuais seguem uma distribuição normal e estão aleatoriamente distribuídos. Portanto, o modelo é adequado.

A Figura 7-35 representa graficamente os valores de tensão ao cisalhamento máximo em função de w, C, A e σ, para w = 9,0% e σ = 100 kPa. A representa τ para w = 13,0% e σ = 100 kPa.

O comportamento da tensão ao cisalhamento apresenta comportamento semelhante ao obtido nos ensaios de resistência à compressão.

Figura 7-35 - Projeção da superfície de resposta para os valores de tensão ao cisalhamento máxima das misturas SCA, após 7 dias de cura ($w = 9,0\%$ e tensão normal = 100 kPa), valores em kPa.

Fonte: Do autor.

Figura 7-36 - Projeção da superfície de resposta para os valores de tensão ao cisalhamento máxima das misturas SCA, após 7 dias de cura ($w = 13,0\%$ e tensão normal = 100 kPa), valores em kPa.

Fonte: Do autor.

7.2.3 Misturas SC

Os valores de c e Φ obtidos a partir dos ensaios de cisalhamento direto das misturas solo-cimento, para a cura de 7 dias, são apresentados na Tabela 7-25.

Tabela 7-25 - Composições das misturas SC e resultados do ensaio de cisalhamento direto, após 7 dias de cura.

Mistura	Composição		Parâmetros	
	w (%)	C (%)	c (kPa)	Φ (°)
SC-301	6,4	3	73,12	25,35
SC-302	6,4	6	128,86	43,43
SC-303	6,4	9	53,30	65,71
SC-304	7,6	3	26,37	46,49
SC-305	7,6	6	163,75	51,81
SC-306	7,6	9	212,67	53,32
SC-307	8,8	3	13,15	39,77
SC-308	8,8	6	91,97	50,56
SC-309	8,8	9	341,17	45,62
SC-310	7,6	6	181,82	52,08
SC-311	7,6	6	174,73	53,52

Fonte: Do autor.

Os resultados da análise de variância dos dados experimentais de coesão das misturas de SC, após cura de 7 dias, são exibidos na Tabela 7-26 e dos dados de ângulo de atrito na Tabela 7-27. Adotando um nível de significância (α) de 0,05, para o teste de hipóteses, os fatores apresentados mostraram-se significantes para os modelos.

Tabela 7-26 - Análise de variância dos dados de coesão para as misturas SC, após 7 dias de cura (Fatorial 3^2).

Fonte	Soma dos Quadrados	Graus de liberdade	Média dos quadrados	F	p
w (x_1)	6080,68	1	6080,68	73,3392	0,013363
C (x_2)	40755,37	1	40755,37	491,5515	0,002028
$x_1 \cdot x_2$	30247,82	1	30247,82	364,8197	0,002730
$x_1 \cdot x_2^2$	7584,13	1	7584,13	91,4724	0,010756
$x_1^2 \cdot x_2$	5404,64	1	5404,64	65,1855	0,014997
Falta de ajuste	1885,43	3	628,48	7,5801	0,118775
Erro	165,82	2	82,91		
Total	92123,90	10			

Fonte: Do autor.

Tabela 7-27 - Análise de variância dos dados de ângulo de atrito para as misturas SC, após 7 dias de cura (Fatorial 3²).

Fonte	Soma dos Quadrados	Graus de liberdade	Média dos quadrados	F	p
w (x_1^2)	80,623	1	80,6228	95,4163	0,010318
C (x_2)	468,874	1	468,8736	554,9070	0,001797
C (x_2^2)	18,899	1	18,8993	22,3671	0,041917
$x_1 \cdot x_2$	297,735	1	297,7350	352,3663	0,002826
$x_1 \cdot x_2^2$	33,100	1	33,1004	39,1740	0,024590
$x_1^2 \cdot x_2$	88,292	1	88,2919	104,4925	0,009435
Falta de ajuste	0,420	2	0,2098	0,2483	0,801101
Erro	1,690	2	0,8450		
Total	1019,664	10			

Fonte: Do autor.

O coeficiente de determinação para o modelo da coesão (c_{SC7}) foi de $R^2 = 0,997$ e para o modelo do ângulo de atrito (ϕ_{SC7}) foi de $R^2 = 0,977$. A equação final ajustada para o modelo da coesão é apresentada pela (Eq. 7-14) e para o modelo do ângulo de atrito é apresentada pela (Eq. 7-15).

$$c_{SC7} = 592,864 - 93,609 \cdot x_1 - 46,943 \cdot x_2 + 14,238 \cdot x_1 \cdot x_2 - 1,608 \cdot x_1 \cdot x_2^2 + 0,160 \cdot x_1^2 \cdot x_2^2 \quad (\text{Eq. 7-14})$$

$$\phi_{SC7} = 30,663 - 0,213 \cdot x_1^2 - 46,071 \cdot x_2 + 4,012 \cdot x_2^2 + 9,570 \cdot x_1 \cdot x_2 - 0,577 x_1 \cdot x_2^2 - 0,327 \cdot x_1^2 \cdot x_2 \quad (\text{Eq. 7-15})$$

As análises dos resíduos (APÊNDICE E) mostram que os valores residuais para os resultados de coesão e do ângulo de atrito das misturas SC, após 7 dias de cura, seguem uma distribuição normal e estão aleatoriamente distribuídos, portanto os modelos são adequados.

A Figura 7-37 apresenta a projeção da superfície de resposta dos dados de coesão das misturas solo-cimento, após 7 dias de cura, e a Figura 7-38 dos dados de ângulo de atrito, em função de w e C.

Figura 7-37 – Projeção da superfície de resposta da coesão para as misturas SC.

Fonte: Do autor.

Figura 7-38 – Projeção da superfície de resposta do ângulo de atrito para as misturas SC.

Fonte: Do autor.

Para as misturas solo-cimento, após 7 dias de cura, o teor de umidade tem um efeito contrário em cada um dos parâmetros (c e Φ). O acréscimo do teor de umidade causou maiores valores de coesão e menores valores de ângulo de atrito.

Os valores de c e Φ obtidos a partir dos ensaios de cisalhamento direto das misturas solo-cimento, para a cura de 28 dias, são apresentados na Tabela 7-28.

Tabela 7-28 - Composições das misturas SC e resultados do ensaio de cisalhamento direto, após 28 dias de cura.

Mistura	Composição		Parâmetros	
	w (%)	C (%)	c (kPa)	Φ (°)
SC-301	6,4	3	137,68	25,82
SC-302	6,4	6	139,17	32,46
SC-303	6,4	9	340,14	26,37
SC-304	7,6	3	127,47	27,34
SC-305	7,6	6	162,36	44,82
SC-306	7,6	9	285,00	40,02
SC-307	8,8	3	225,23	25,57
SC-308	8,8	6	242,75	41,97
SC-309	8,8	9	345,30	38,62
SC-310	7,6	6	146,29	51,37
SC-311	7,6	6	163,81	50,36

Fonte: Do autor.

Os resultados da análise de variância dos dados experimentais de coesão das misturas de SC, após cura de 28 dias, são exibidos na Tabela 7-29 e dos dados de ângulo de atrito na Tabela 7-30. Adotando um nível de significância (α) de 0,05, para o teste de hipóteses dos dados da coesão e de 0,15 dos dados de ângulo de atrito, os fatores apresentados mostraram-se significantes para os modelos.

Tabela 7-29 - Análise de variância dos dados de coesão para as misturas SC, após 28 dias de cura (Fatorial 3²).

Fonte	Soma dos Quadrados	Graus de liberdade	Média dos quadrados	F	p
w (x_1)	6421,54	1	6421,54	67,8964	0,014411
w (x_1^2)	5187,95	1	5187,95	54,8534	0,017747
C (x_2)	38409,82	1	38409,82	406,1163	0,002453
C (x_2^2)	9281,35	1	9281,35	98,1339	0,010037
Falta de ajuste	3109,57	4	777,39	8,2196	0,111397
Erro	189,16	2	94,58		
Total	67691,25	10			

Fonte: Do autor.

Tabela 7-30 - Análise de variância dos dados de ângulo de atrito para as misturas SC, após 28 dias de cura (Fatorial 3²).

Fonte	Soma dos Quadrados	Graus de liberdade	Média dos quadrados	F	p
w (x ₁)	77,2485	1	77,2485	6,22093	0,130104
w (x ₁ ²)	159,0427	1	159,0427	12,80792	0,069980
C (x ₂)	115,1491	1	115,1491	9,27311	0,093034
C (x ₂ ²)	332,6640	1	332,6640	26,78989	0,035360
Falta de ajuste	86,1068	4	21,5267	1,73357	0,397601
Erro	24,8350	2	12,4175		
Total	964,7559	10			

Fonte: Do autor.

O coeficiente de determinação para o modelo da coesão (c_{SC28}) foi de $R^2 = 0,951$ e para o modelo do ângulo de atrito (ϕ_{SC28}) foi de $R^2 = 0,885$. A equação final ajustada para o modelo da coesão é apresentada pela (Eq. 7-16) e para o modelo do ângulo de atrito é apresentada pela (Eq. 7-17).

$$c_{SC28} = 1842,838 - 450,413 \cdot x_1 + 31,426 \cdot x_1^2 - 54,034 \cdot x_2 + 6,725 \cdot x_2^2 \quad (\text{Eq. 7-16})$$

$$\phi_{SC28} = -347,774 + 86,626 \cdot x_1 - 5,502 \cdot x_1^2 + 16,739 \cdot x_2 - 1,273 \cdot x_2^2 \quad (\text{Eq. 7-17})$$

As análises dos resíduos (APÊNDICE E) mostram que os valores residuais para os resultados de coesão e do ângulo de atrito das misturas SC, após 28 dias de cura, seguem uma distribuição normal e estão aleatoriamente distribuídos, portanto os modelos são adequados.

A Figura 7-39 apresenta a projeção da superfície de resposta dos dados de coesão das misturas solo-cimento, após 28 dias de cura, e a Figura 7-40 dos dados de ângulo de atrito, em função de w e C.

As projeções das superfícies de resposta de c (Figura 7-39) e Φ (Figura 7-40) após 28 dias de cura apresentam comportamento oposto entre si, a primeira possui um ponto de mínimo valor e a segunda de valor máximo. Essas duas superfícies de resposta indicam que, nas misturas solo-cimento após 28 dias de cura, o acréscimo de cimento tende a aumentar tanto o ângulo de atrito como os valores de coesão. Este mesmo comportamento foi observado nas amostras após 7 dias de cura.

Figura 7-39 – Projeção da superfície de resposta dos dados de coesão (kPa) para as misturas SC, após 28 dias de cura.

Fonte: Do autor.

Figura 7-40 – Projeção da superfície de resposta dos dados de ângulo de atrito para as misturas SC, após 28 dias de cura.

Fonte: Do autor.

As duas superfícies de resposta de c e Φ após 28 dias de cura apresentam um comportamento mais uniforme do que as superfícies de resposta dos dados após 7 dias de cura.

7.2.4 Misturas SA

Os valores de c e Φ obtidos a partir dos ensaios de cisalhamento direto das misturas solo-argila são apresentados na Tabela 7-31.

Tabela 7-31 - Composições das misturas SCA e resultados do ensaio de cisalhamento direto.

Mistura	Composição		Parâmetros	
	w (%)	A (%)	c (kPa)	Φ (°)
SA-301	6,4	3	118,00	41,58
SA-302	6,4	6	95,68	39,31
SA-303	6,4	9	27,61	41,21
SA-304	9,8	3	36,65	31,89
SA-305	9,8	6	42,32	39,88
SA-306	9,8	9	31,94	42,75
SA-307	13,2	3	30,51	31,87
SA-308	13,2	6	11,63	37,84
SA-309	13,2	9	30,76	35,46
SA-310	9,8	6	53,99	38,77
SA-311	9,8	6	53,13	38,75

Fonte: Do autor.

A Tabela 7-32 apresenta a análise de variância para os dados de coesão e a Tabela 7-33 para os dados de ângulo de atrito. Foi adotado um nível de significância (α) de 0,05 para o teste de hipóteses dos dados de coesão e de ângulo de atrito. O coeficiente de determinação para o modelo da coesão (c_{SA}) foi de $R^2 = 0,828$ e para o modelo do ângulo de atrito foi de $R^2 = 0,91$.

Tabela 7-32 - Análise de variância da coesão para as misturas SA (Fatorial 3^2).

Fonte	Soma dos Quadrados	Graus de liberdade	Média dos quadrados	F	p
w (x_1)	4726,034	1	4726,034	111,6612	0,008837
A (x_3)	1499,420	1	1499,420	35,4266	0,027086
$x_1 \cdot x_3$	2053,902	1	2053,902	48,5272	0,019991
Falta de ajuste	1630,968	5	326,194	7,7069	0,118824
Erro	84,650	2	42,325		
Total	9994,974	10			

Fonte: Do autor.

Tabela 7-33 - Análise de variância do ângulo de atrito para as misturas SA (Fatorial 3²).

Fonte	Soma dos Quadrados	Graus de liberdade	Média dos quadrados	F	p
w (x ₁)	47,7708	1	47,77082	113,4478	0,008700
A (x ₃)	33,0411	1	33,04107	78,4670	0,012506
x ₁ .x ₃ ²	13,0625	1	13,06253	31,0213	0,030756
x ₁ ² .x ₃	28,5208	1	28,52083	67,7322	0,014445
Falta de ajuste	10,0720	4	2,51800	5,9798	0,148371
Erro	0,8422	2	0,42108		
Total	133,3094	10			

Fonte: Do autor.

A equação final ajustada para o modelo da coesão é apresentada pela (Eq. 7-18) e para o modelo do ângulo de atrito é apresentada pela (Eq. 7-19).

$$c_{SA} = 291,524 - 21,584 \cdot x_1 - 27,041 \cdot x_3 + 2,222 \cdot x_1 \cdot x_3 \quad (\text{Eq. 7-18})$$

$$\phi_{SA} = 44,3001 - 1,478 \cdot x_1 + 1,186 \cdot x_3 - 0,012 \cdot x_1 \cdot x_3^2 + 0,010 \cdot x_1^2 \cdot x_3 \quad (\text{Eq. 7-19})$$

As análises dos resíduos (APÊNDICE E) mostram que os valores residuais para os resultados de coesão e do ângulo de atrito das misturas SA seguem uma distribuição normal e estão aleatoriamente distribuídos, portanto os modelos são adequados.

A Figura 7-41 apresenta a projeção da superfície de resposta dos dados de coesão das misturas solo-argila e a Figura 7-42 dos dados de ângulo de atrito, em função de w e A.

O comportamento esperado para adição de argila ao solo é que o acréscimo do material resulte em valores maiores de coesão e menores de ângulo de atrito, mas não é o observado nas superfícies de resposta. Assim como o teor de umidade ótima e a distância entre o nível inferior de variação adotado pelo fatorial afetou os resultados de resistência à compressão, o mesmo ocorreu para o ensaio de cisalhamento direto.

Cokca et al. (2004) mostrou que os parâmetros de resistência (c e Φ) variam em função do teor de umidade da amostra. Foi observado que, para teores abaixo da umidade ótima ocorre um aumento do ângulo de atrito interno e uma redução da parcela da coesão. Para teores acima da umidade ótima ocorre uma redução de ambos os parâmetros (c e Φ).

Figura 7-41 – Projeção da superfície de resposta dos dados de coesão para as misturas SA.

Fonte: Do autor.

Figura 7-42 – Projeção da superfície de resposta dos dados de ângulo de atrito para as misturas SA.

Fonte: Do autor.

O teor de umidade de compactação do solo influencia diretamente a sua estrutura e é um dos principais fatores que definem a sua permeabilidade e resistência

(LAMBE, 1958). A Figura 2-2 mostra como a estrutura de solos argilosos pode variar em função do teor de umidade e energia de compactação.

Cokca et al. (2004) e Freitas (2015) obtiveram valores de coesão, para amostras com aproximadamente $w = 2,0\%$ abaixo do teor de umidade ótima, superiores aos encontrados pelas amostras compactadas na w_{ot} .

Observando a superfície de resposta da coesão (Figura 7-41), e lembrando que para 3,0% de argila o teor de umidade ótima é 8,8%, vemos que, para teores inferiores a w_{ot} , há um aumento da coesão. Considerando que o menor nível de w corresponde a uma variação de 2,2% do teor de umidade, os resultados se assemelham ao que foi observado por Cokca et al. (2004) e Freitas (2015). Para os teores de argila de 6,0 e 9,0% a superfície de resposta apresenta valores abaixo da w_{ot} e temos uma tendência de redução dos valores de coesão.

Os valores de ângulo de atrito (Figura 7-42) também conferem com o que foi observado por Cokca et al. (2004) e Freitas (2015). Para um teor de argila de 3,0% valores acima da umidade ótima ($w_{ot} = 8,8\%$) apresentam tendência de diminuição do Φ e para valores abaixo, de aumento do ângulo de atrito. Para os valores de argila de 6,0 e 9,0% há uma tendência de aumento do Φ para os valores abaixo da w_{ot} .

Os resultados de resistência ao cisalhamento mostraram um aumento da coesão para os menores teores de umidade e de argila adotados. Apesar de apresentar pouca variação do Φ , há uma tendência de apresentar maiores valores para teores de umidade baixos e quantidades de argila baixa a alta. Se compararmos com os dados de resistência a compressão simples (Figura 7-25), podemos ver que são regiões que obtiveram os maiores resultados de RC.

Dafalla (2013) avaliou misturas de solo arenoso e argila variando o teor de argila e de umidade. O autor partiu da região de umidade ótima e adotou teores maiores para verificar a influência sobre os parâmetros de resistência. Assim como Cokca et al. (2004) e Freitas (2015), foi verificado que o aumento do teor de umidade causou uma diminuição no ângulo de atrito e na coesão.

7.3 ANÁLISE DOS PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA

As análises da resistência à compressão simples e da tensão cisalhante máxima das misturas SCA mostraram comportamento semelhante. A Figura 7-43 mostra a sobreposição das superfícies de resposta do modelo de resistência à compressão simples sem imersão, ($RC7_{SI}$), e do modelo da tensão ao cisalhamento (τ_{SCA7}), após 7 dias de cura. Em ambos os casos a alteração do teor de cimento promove grande acréscimo da resistência. Apesar de não provocar diferenças grandes, para teores mais elevados de argila há uma pequena perda de resistência.

Figura 7-43 - Projeções das superfícies de resposta da tensão cisalhante para $\sigma = 100$ kPa (linhas cheias) e resistência à compressão simples (linhas pontilhadas), para 7 dias de cura, valores em kPa.

Fonte: Do autor.

Comparando-se os resultados de resistência a compressão simples das misturas solo-cimento-argila (SCA) e solo-cimento (SC) foi possível verificar que o teor de cimento foi o fator principal capaz de alterar os valores de RC.

Entre as misturas solo-argila o fator teor de umidade foi fundamental na alteração do comportamento das amostras. Os resultados de RC para teores de 3,0% de argila mostram que para valores acima da umidade ótima ($w_{ot} = 8,8\%$) há uma perda de resistência. Comparando com as análises dos parâmetros da tensão ao

cisalhamento dessas misturas, os pontos acima da wot correspondem a valores inferiores de c e Φ .

Mesmo com a limitação do ensaio de compressão não confinada, a maioria das misturas de solo-cimento-argila, solo-cimento e solo-argila atenderam a resistência mínima de 200 kPa, sugerida por Daniel & Wu (1993), para base de aterro sanitário. Apenas a região de baixo teor de argila e teores de umidade elevados obtiveram resultados inferiores a recomendação.

Semelhante aos resultados obtidos neste trabalho, Bittencourt et al. (2014) identificou um ganho de resistência e alteração dos parâmetros c e Φ causados pela adição de cimento a uma argila arenosa (CL). Askarani & Pakbaz (2016) realizaram uma série de ensaios de cisalhamento direto em misturas de areia-bentonita cimentadas e não-cimentadas. Foi concluído que a resistência ao cisalhamento drenada aumenta com a cimentação e tempo de cura.

Assim como identificado neste trabalho para as misturas SCA, Askarani & Pakbaz (2016) verificaram que a adição de cimento em misturas com solo e argila promove um grande aumento na parcela da coesão. Os autores citados concluíram que há uma maior variação da coesão do que no ângulo de atrito e o mesmo foi observado nas misturas SCA (item 7.2.1).

A análise da influência dos fatores w , C , A e σ sobre a tensão cisalhante máxima (item 7.2.2), para as misturas SCA mostrou, através das superfícies de resposta que o acréscimo de bentonita não causou uma redução da tensão de pico. Heineck et al. (2016) utilizaram uma areia siltosa (SM) e avaliaram misturas de solo-bentonita e solo-cimento-bentonita e também obtiveram resultados que mostram que a adição de bentonita não levou a um decréscimo da resistência de pico.

Lukiantchuki (2007) realizou ensaios triaxiais adensados não-drenados em amostras de solo-bentonita. O solo utilizado foi da Formação Botucatu observou, em misturas solo-bentonita, que o acréscimo de bentonita causa um aumento na parcela da coesão. A autora não conseguiu estabelecer uma relação para os dados de ângulo de atrito, mas observou uma tendência de diminuição do Φ com o aumento da quantidade de bentonita.

8. EXPANSÃO E CONTRAÇÃO

Neste item são apresentados os resultados dos ensaios de expansão e contração das misturas SCA, SC e SA.

8.1 EXPANSÃO (EX)

Neste item são apresentados todos os resultados de expansão, obtidos através de ensaios de expansão livre por inundação.

8.1.1 Misturas SCA

Foram realizados ensaios de expansão das misturas SCA, após 7 e 28 dias de cura em câmara úmida (Tabela 8-1). Para as misturas que não apresentaram expansão, SCA-07 e SCA-12, foi adotado valor de 0,001 para o ajuste dos modelos. Foram selecionados os valores de maior IE (Eq. 3-8) .

Tabela 8-1 - Resultados de expansão das misturas solo-cimento-argila.

Mistura	Composição			IE		
	w (%)	C (%)	A (%)	IE 7 dias	IE 28 dias	ln (IE ²)
PD-01*	6,4	0	0	-5,12	-	-
SCA-01	9	3	3	-0,47	3,53	2,53
SCA-02	9	3	9	12,05	7,40	4,00
SCA-03	9	9	3	-0,51	-1,35	0,60
SCA-04	9	9	9	0,88	1,63	0,97
SCA-05	13	3	3	0,23	0,47	-1,53
SCA-06	13	3	9	1,02	13,53	5,21
SCA-07	13	9	3	-0,70	0,001	-13,82
SCA-08	13	9	9	0,60	0,88	-0,25
SCA-09	7,636	6	6	2,09	0,88	-0,25
SCA-10	14,364	6	6	1,21	0,84	-0,36
SCA-11	11	0,955	6	11,16	30,14	6,81
SCA-12	11	11,045	6	0,001	0,001	-13,82
SCA-13	11	6	0,955	0,001	-0,09	-4,75
SCA-14	11	6	11,045	2,56	3,49	2,50
SCA-15	11	6	6	0,60	0,56	-1,17
SCA-16	11	6	6	0,56	0,70	-0,72

Nota: * amostra de solo natural sem tempo de cura

Fonte: Do autor.

Os ensaios de expansão tiveram duração de 8 horas e as constantes leituras permitiram verificar a influência dos fatores em função do tempo. Na Figura 8-1 são apresentados os resultados das misturas SCA-13 (C6A1W11), SCA-14 (C6A11W11) e SCA-15 (C6A6W11), deste modo é possível observar a influência da variação do teor de argila. São apresentados os resultados das amostras após 28 dias de cura. É possível observar que o acréscimo do teor de argila causou um aumento do índice de expansão para amostras com teores iguais de cimento e umidade.

Figura 8-1 - Análise do efeito do teor de argila sobre o IE nas misturas SCA

Fonte: Do autor.

Na Figura 8-2 são apresentados os resultados das misturas SCA-11 (C1A6W11), SCA-12 (C11A6W11) e SCA-15 (C6A6W11), após 28 dias de cura, onde é possível identificar a influência do teor de cimento sobre os valores de expansão. O aumento da quantidade de cimento diminuiu os valores de IE para misturas com a mesma quantidade de argila e teor de umidade.

Na Figura 8-3 são apresentados os resultados das misturas SCA-09 (C6A6W8), SCA-10 (C6A6W14) e SCA-15 (C6A6W11), após 28 dias de cura, onde é possível identificar a influência do teor de umidade sobre os valores de expansão. A variação do teor de umidade causou pequena variação nos valores de IE para misturas com a mesma quantidade de argila e cimento.

Foi possível estabelecer um modelo de regressão para os resultados de expansão das amostras após 28 dias de cura. As análises de variância das amostras após 7 dias de cura mostraram que não foi possível realizar uma regressão bem

ajustada. Como após 7 dias ainda há várias reações ocorrendo entre o solo, cimento e argila, o processo de inundação pode resultar em outras reações incapazes de serem descritas pelas variáveis independentes escolhidas.

Figura 8-2 - Análise do efeito do teor de cimento nas misturas SCA

Fonte: Do autor.

Figura 8-3 - Análise do efeito do teor de umidade nas misturas SCA

Fonte: Do autor.

Após análise de resíduos e contínuos ajustes de modelos, os resultados de IE foram elevados ao quadrado e então foi aplicada a transformação $\ln(Y)$, o que indica que a relação entre a expansão e as variáveis independentes é exponencial. A variável dependente utilizada foi, então, $\ln(IE^2)$, conforme apresentado na Tabela 8-1.

Os resultados da análise de variância dos dados experimentais de $\ln(IE^2)$ das misturas de SCA são exibidos na Tabela 8-2. Adotando um nível de significância (α) de 0,05, para o teste de hipóteses, os fatores w linear (x_1), C linear (x_2), A linear (x_3) e as interações $x_1 \cdot x_2$ e $x_1 \cdot x_3$, mostraram-se significantes para o modelo.

Tabela 8-2 - Análise de variância do $\ln(IE^2)$ para as misturas SCA.

Fonte	Soma dos Quadrados	Graus de liberdade	Média dos quadrados	F	p
w (x_1)	25,5101	1	25,5101	256,161	0,039725
C (x_2)	180,4466	1	180,4466	1811,966	0,014953
A (x_3)	86,4128	1	86,4128	867,720	0,021603
$x_1 \cdot x_2$	20,4428	1	20,4428	205,277	0,044361
$x_1 \cdot x_3$	42,5840	1	42,5840	427,610	0,030762
Falta de ajuste	45,1788	9	5,0199	50,407	0,108909
Erro	0,0996	1	0,0996		
Total	400,6747	15			

Fonte: Do autor.

A Tabela 8-2 mostra que o modelo não apresenta falta de ajuste ($p = 0,1089 \geq \alpha$). A análise de variância de $\ln(IE^2)$ apresentou uma proporção de variabilidade de $R^2 = 0,887$. A equação final ajustada para o modelo pode ser representada pela (Eq. 8-1), na qual x_1 representa os valores do fator w , x_2 do fator C e x_3 do fator A .

$$\ln(IE^2) = 16,962 - 1,392 \cdot x_1 + 1,719 \cdot x_2 - 3,391 \cdot x_3 - 0,266 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0,384 \cdot x_1 \cdot x_3 \quad (\text{Eq. 8-1})$$

Para avaliar a adequação do modelo (Eq. 8-1) foram plotados os gráficos da probabilidade normal dos resíduos e a verificação dos resíduos versus valores previstos (APENDICE F). Estes gráficos mostram que os valores residuais seguem uma distribuição normal e estão aleatoriamente distribuídos. Portanto, o modelo $\ln(IE^2)$ é adequado para descrever o comportamento de expansão das misturas SCA como uma função do teor de umidade (w), e quantidade de cimento (C) e argila (A).

Foram feitas superfícies de resposta, a partir do modelo $\ln(IE^2)$, fixando diferentes valores do teor de umidade. A

Figura 8-4 representa a projeção da superfície de resposta de IE , em função dos fatores C e A , fixando w em 9,0%, a Figura 8-5 em $w = 11,0\%$ e a Figura 8-6 em $w = 13,0\%$.

Figura 8-4 - Projeção da superfície de resposta do $\ln(IE^2)$, para $w = 9,0\%$.

Fonte: Do autor.

Figura 8-5 - Projeção da superfície de resposta do $\ln(IE^2)$, para $w = 11,0\%$.

Fonte: Do autor.

Figura 8-6 - Projeção da superfície de resposta do $\ln(IE^2)$, para $w = 13,0\%$.

Fonte: Do autor.

O modelo $\ln(IE^2)$ não apresentou resíduos que possam impedir o seu uso, mas quando os valores são transformados para IE , houve um aumento dos resíduos, principalmente para as misturas com maior expansão. Assim, o modelo $\ln(IE^2)$ é recomendado para compreensão e percepção do comportamento e variação da expansão, mas deve ser usado com cautela para a previsão dos valores.

A fim de realizar uma previsão dos valores foram ajustados outros modelos lineares e não lineares. A regressão linear segmentada, ou “piecewise”, que permite ajustar equações diferentes para intervalos de dados distintos, foi a mais adequada. Assim foi obtida a (Eq. 8-2) para valores de IE até 3,913 e a (Eq. 8-3) para valores superiores a 3,913. Como são três variáveis independentes a verificação de qual equação a ser adotada é feita verificando o resultado da (Eq. 8-3). O fator w é representado por x_1 , o fator C por x_2 e o fator A por x_3 . O fator de determinação deste ajuste é $R^2 = 0,995$.

$$IE = 2,869764 - 0,109049 \cdot x_1 - 0,362397 \cdot x_2 + 0,306858 \cdot x_3 \quad (\text{Eq. 8-2})$$

$$(IE \leq 3,913)$$

$$IE = 5,682510 + 1,534844 \cdot x_1 - 14,9618 \cdot x_2 + 3,642689 \cdot x_3 \quad (\text{Eq. 8-3})$$

$$(IE > 3,913)$$

A Tabela 8-3 mostra os valores observados, previstos e os resíduos de IE obtidos pelo modelo $\ln(IE^2)$ e também através da regressão segmentada. Como pode ser observado a regressão “*piecewise*” apresentou os menores resíduos para a maioria das misturas avaliadas.

Tabela 8-3 – Valores observados, previstos e resíduos de IE.

Mist.	IE Obs.	$\ln(IE^2)$			$\ln(IE^2)$		Segmentada	
		Obs.	Prev.	Res.	IE Prev.	Res.	IE Prev.	Res.
SCA01	3,53	2,525	3,392	-0,867	5,453	1,918	1,722	-1,813
SCA02	7,40	4,002	2,377	1,624	3,283	-4,113	7,395	0,000
SCA03	-1,35	0,598	-2,112	2,711	0,348	1,697	-0,453	0,896
SCA04	1,63	0,975	-0,264	1,239	0,876	-0,752	1,388	-0,239
SCA05	0,47	-1,531	-0,758	-0,773	0,684	0,219	1,286	0,820
SCA06	13,53	5,211	7,455	-2,245	41,579	28,044	13,535	0,000
SCA07	0,00	-13,816	-12,657	-1,159	0,002	0,001	-0,889	-0,890
SCA08	0,88	-0,247	-1,580	1,333	0,454	-0,430	0,952	0,069
SCA09	0,88	-0,247	2,327	-2,574	3,201	2,317	1,704	0,820
SCA10	0,84	-0,355	-2,270	1,915	0,321	-0,516	0,970	0,133
SCA11	30,14	6,812	5,243	1,568	13,759	-16,380	30,140	0,000
SCA12	0,00	-9,210	-6,983	-2,227	0,030	0,029	-0,491	-0,492
SCA13	-0,09	-4,750	-5,026	0,277	0,081	0,174	-0,211	-0,118
SCA14	3,49	2,499	3,434	-0,936	5,569	2,081	2,885	-0,603
SCA15	0,56	-1,166	-1,000	-0,167	0,607	0,048	1,337	0,779
SCA16	0,70	-0,720	-1,000	0,280	0,607	-0,091	1,337	0,639

Fonte: Do autor.

A Figura 8-7 mostra a comparação entre os valores previstos e observados para o modelo $\ln(IE^2)$ (a) e para a regressão segmentada (b).

Figura 8-7 – Valores previstos vs. observados para o modelo $\ln(IE^2)$ (a) e regressão segmentada (b).

Fonte: Do autor.

A partir das equações obtidas pela regressão “pinewise” é possível gerar superfícies de resposta, mas é importante lembrar que com três variáveis independentes cada superfície de resposta não seria capaz de representar todos os dados de modo adequado.

8.1.2 Misturas SC

Foram realizados ensaios de expansão livre com amostras de solo-cimento, após 7 e 28 dias de cura, e os resultados do índice de expansão (IE) são apresentados na Tabela 8-4.

Tabela 8-4 - Resultados de expansão das misturas solo-cimento.

Mistura	Composição		IE	
	w (%)	C (%)	IE 7 dias	IE 28 dias
PD-001*	6,4	0	-5,12	--
SC-301	6,4	3	0,00	-0,51
SC-302	6,4	6	-0,42	0,00
SC-303	6,4	9	-1,35	-0,51
SC-304	7,6	3	-0,70	0,00
SC-305	7,6	6	0,00	0,00
SC-306	7,6	9	0,00	0,00
SC-307	8,8	3	0,00	0,00
SC-308	8,8	6	0,00	0,00
SC-309	8,8	9	-0,23	0,00
SC-310	7,6	6	0,00	-0,51
SC-311	7,6	6	-0,42	0,00

Nota: * Amostra de solo compactado sem tempo de cura.

Fonte: Do autor.

As misturas de solo-cimento não apresentaram comportamento expansivo através do ensaio de expansão livre e algumas misturas apresentaram contração no período avaliado (15 dias). Tal contração, após 7 dias de cura, pode ser causada por reações entre a água e o cimento durante o ensaio, causando a retração do material.

A ausência de expansão das misturas solo-cimento, mesmo na condição inundada pode ser resultado da rigidez alcançada pelas reações e hidratação do cimento. Após o ensaio foi verificado que, mesmo sem apresentar expansão, houve ganho de massa nos corpos-de-prova, causados pela saturação após inundação.

Como há muitos valores nulos e não há alguma constância, não foi possível definir um modelo matemático que descreve o conjunto de dados, já que nenhum dos fatores apresentou relevância significativa.

8.1.3 Misturas SA

A Tabela 8-5 apresenta os resultados do índice de expansão do solo sem estabilizantes (mistura PD-01) e das misturas SA para o Fatorial 3².

Tabela 8-5 - Composições das misturas SA (Fatorial 3²) e resultados de IE.

Mistura	Composição		IE
	w (%)	A (%)	
PD-01	6,4	0	-5,12
SA-301	6,4	3	40,93
SA-302	6,4	6	119,53
SA-303	6,4	9	197,91
SA-304	9,8	3	83,26
SA-305	9,8	6	101,86
SA-306	9,8	9	172,56
SA-307	13,2	3	32,09
SA-308	13,2	6	71,40
SA-309	13,2	9	126,05
SA-310	9,8	6	102,33
SA-311	9,8	6	99,30

Fonte: Do autor.

Os resultados da análise de variância dos dados experimentais de IE das misturas de SA são exibidos na Tabela 8-6. Adotando um nível de significância (α) de 0,05, para o teste de hipóteses, os fatores w linear (x_1), A linear (x_3), A quadrático (x_3^2) e as interações $x_1.x_3$, $x_1^2.x_3$ e $x_1^2.x_3^2$ mostraram-se significantes para o modelo.

Tabela 8-6 - Análise de variância do IE para as misturas SA (Fatorial 3²).

Fonte	Soma dos Quadrados	Graus de liberdade	Média dos quadrados	F	p
w (x_1)	2766,50	1	2766,50	1043,932	0,000957
w (x_1^2)	1036,16	1	1036,16	390,990	0,002548
A (x_3)	19293,03	1	19293,03	7280,167	0,000137
A (x_3^2)	306,95	1	306,95	115,827	0,008523
$x_1.x_3$	992,98	1	992,98	374,699	0,002658
$x_1^2.x_3$	435,92	1	435,92	164,491	0,006024
$x_1^2.x_3^2$	333,09	1	333,09	125,691	0,007862
Falta de ajuste	20,23	1	20,23	7,634	0,109826
Erro	5,30	2	2,65		
Total	24916,43	10			

Fonte: Do autor.

A Tabela 8-6 mostra que não há falta de ajuste ($p = 0,1098 > \alpha$) para o modelo proposto. A proporção de variabilidade na medida de IE que é explicada pelos fatores w e A, obtida na análise de variância, foi $R^2 = 0,999$. A equação final ajustada para o

modelo IE_{SA} pode ser representada pela (Eq. 8-4), na qual x_1 representa os valores do fator w e x_3 do fator A .

$$IE_{SA} = -411,566 + 94,339 \cdot x_1 - 4,456 \cdot x_1^2 + 64,598 \cdot x_3 + 1,291 \cdot x_3^2 - 11,764 \cdot x_1 \cdot x_3 + 0,482 \cdot x_1^2 \cdot x_3 + 0,003 x_1^2 \cdot x_3^2 \quad (\text{Eq. 8-4})$$

A avaliação da adequação do modelo proposto pela (Eq. 8-4) foi realizada através da análise dos resíduos (APÊNDICE E). A verificação mostrou que os valores residuais seguem uma distribuição normal e estão aleatoriamente distribuídos. Portanto, o modelo IE_{SA} é adequado para descrever o comportamento de expansão das misturas SA como uma função do teor de umidade (w) e quantidade de argila (A).

A Figura 8-8 representa graficamente o efeito de w e A sobre o índice de expansão (IE) das misturas solo-argila.

Figura 8-8 – Projeção da superfície de resposta de IE para misturas solo-argila (Fatorial 3^2).

Fonte: Do autor.

Os resultados de IE (Figura 8-8) mostram que o teor de argila é o fator principal capaz de modificar expansão das misturas SA. O teor de umidade também causou alterações no comportamento expansivo.

Para misturas com maior quantidade de argila a diminuição de teor de umidade gerou valores mais elevados de expansão. Nessa situação antes da inundação havia uma quantidade menor de água disponível para interagir com as partículas de argila, assim com o início do ensaio e saturação corpo-de-prova o material apresentou valores mais elevados de IE, quando comparados com outros de maior w.

8.1.4 Análise da Expansão das Misturas

Podemos determinar o potencial de expansão dos solos em função do índice de expansão dos solos (IE), conforme a classificação da ASTM D4829-11, e também através do limite de liquidez e índice de plasticidade do solo, usando as classes de Chen (1983). A determinação do potencial das misturas SCA é apresentada na Tabela 8-7 e das misturas SA na Tabela 8-8.

Tabela 8-7 – Potencial de expansão das misturas solo-cimento-argila.

Mistura	w (%)	Composição		ASTM D4829-11		Chen (1983)		
		C (%)	A (%)	IE	Potencial	LL	IP	Potencial
PD-01		0	0	-5,12	Muito baixo	np	np	--
SCA-01	9	3	3	3,53	Muito baixo	np	np	--
SCA-02	9	3	9	7,40	Muito baixo	35	19	Médio
SCA-03	9	9	3	-1,35	Muito baixo	np	np	--
SCA-04	9	9	9	1,63	Muito baixo	32	15	Médio
SCA-05	13	3	3	0,47	Muito baixo	np	np	--
SCA-06	13	3	9	13,53	Muito baixo	35	19	Médio
SCA-07	13	9	3	0,001	Muito baixo	np	np	--
SCA-08	13	9	9	0,88	Muito baixo	32	15	Médio
SCA-09	7,636	6	6	0,88	Muito baixo	22	5	Baixo
SCA-10	14,364	6	6	0,84	Muito baixo	22	5	Baixo
SCA-11	11	0,955	6	30,14	Baixo	26	9	Baixo
SCA-12	11	11,045	6	0,001	Muito baixo	20	2	Baixo
SCA-13	11	6	0,955	-0,09	Muito baixo	np	np	--
SCA-14	11	6	11,045	3,49	Muito baixo	31	12	Médio
SCA-15	11	6	6	0,56	Muito baixo	22	5	Baixo
SCA-16	11	6	6	0,70	Muito baixo	22	5	Baixo

Fonte: Do autor.

Os dados do ensaio de expansão, analisados pela classificação da ASTM D4829-11, foram obtidos com corpos-de-prova que passaram por um período de cura de 28 dias (Tabela 8-7). Os dados do ensaio de Limites de Atterberg, classificados conforme Chen (1983), não passaram por uma etapa de cura. O período de cura de 28 dias permite a ocorrência das reações de hidratação do cimento e reações entre o solo, cimento e argila.

Comparando o potencial de expansão, pela classificação da ASTM D4829-11, das misturas solo-argila com as misturas solo-cimento-argila, pode-se concluir que o cimento agiu de modo estabilizante e reduziu o potencial de expansão. As misturas solo-argila apresentaram, em sua maioria um potencial de expansão alto. As únicas misturas que possuem potencial baixo são as SA-301 e SA-307, que contêm apenas 3,0% de bentonita.

Tabela 8-8 – Potencial de expansão das misturas solo-argila.

Mistura	Composição		IE	Potencial
	w (%)	A (%)		
PD-001	6,4	0	-5,12	Muito baixo
SA-301	6,4	3	40,93	Baixo
SA-302	6,4	6	119,53	Alto
SA-303	6,4	9	197,91	Alto
SA-304	9,8	3	83,26	Médio
SA-305	9,8	6	101,86	Alto
SA-306	9,8	9	172,56	Alto
SA-307	13,2	3	32,09	Baixo
SA-308	13,2	6	71,40	Médio
SA-309	13,2	9	126,05	Alto
SA-310	9,8	6	102,33	Alto
SA-311	9,8	6	99,30	Alto

Fonte: Do autor.

8.2 CONTRAÇÃO (CO)

Neste item são apresentados todos os resultados de contração, obtidos através de ensaios de contração livre.

8.2.1 Misturas SCA

Foram realizados ensaios de contração das misturas SCA, após 7 e 28 dias de tempo de cura com corpos-de-prova em saturação constante, os resultados são apresentados na Tabela 8-9.

Os ensaios de contração tiveram duração de 15 dias e as constantes leituras permitiram verificar a influência dos fatores em função do tempo. Na Figura 8-9 são apresentados os resultados das misturas SCA-13 (C6A1W11), SCA-14 (C6A11W11) e SCA-16 (C6A6W11), deste modo é possível observar a influência da variação do teor de argila. São apresentados os resultados das amostras após 28 dias de cura. Os valores obtidos apresentaram pequena diferença, mas indicou que a contração é

proporcional ao teor de argila. Para teor de 0,955% (A1) o resultado foi de 0,122% e para teores entre 6 a 11% o resultado foi próximo a 0,15%. Na situação apresentada a mistura com 6% mostrou um valor maior de contração.

Tabela 8-9 - Resultados de contração das misturas solo-cimento-argila.					
Mistura	Composição			CO (%)	
	w (%)	C (%)	A (%)	CO 7 dias	CO 28 dias
PD-01*	6,4	0	0	0,110	-
SCA-01	9	3	3	0,131	0,176
SCA-02	9	3	9	0,150	0,183
SCA-03	9	9	3	0,118	0,117
SCA-04	9	9	9	0,201	0,220
SCA-05	13	3	3	0,189	0,201
SCA-06	13	3	9	0,226	0,163
SCA-07	13	9	3	0,169	0,207
SCA-08	13	9	9	0,222	0,362
SCA-09	7,636	6	6	0,183	0,138
SCA-10	14,364	6	6	0,346	0,355
SCA-11	11	0,955	6	0,208	0,222
SCA-12	11	11,045	6	0,171	0,163
SCA-13	11	6	0,955	0,119	0,122
SCA-14	11	6	11,045	0,251	0,149
SCA-15	11	6	6	0,150	0,166
SCA-16	11	6	6	0,180	0,158

Nota: * Amostra de solo natural sem tempo de cura

Fonte: Do autor

Figura 8-9 - Análise do efeito do teor de argila sobre a contração nas misturas SCA.

Fonte: Do autor

Na Figura 8-10 são apresentados os resultados das misturas SCA-11 (C1A6W11), SCA-12 (C11A6W11) e SCA-13 (C6A6W11), após 28 dias de cura, onde é possível identificar a influência do teor de cimento sobre os valores de contração. O aumento da quantidade de cimento diminuiu os valores de CO para misturas com a

mesma quantidade de argila e teor de umidade, sendo os resultados de 6 a 11% muito semelhantes.

Figura 8-10 - Análise do efeito do teor de cimento sobre a contração nas misturas SCA.

Fonte: Do autor

Na Figura 8-11 são apresentados os resultados das misturas SCA-09 (C6A6W8), SCA-10 (C6A6W14) e SCA-15 (C6A6W11), após 28 dias de cura, onde é possível identificar a influência do teor de umidade sobre os valores de contração. O teor de umidade causou uma variação inversamente proporcional nos valores de CO para misturas com a mesma quantidade de argila e cimento.

Figura 8-11 - Análise do efeito do teor de umidade sobre a contração nas misturas SCA.

Fonte: Do autor

Os resultados de contração após 7 dias não permitiram estabelecer um modelo adequado capaz de relacionar os fatores escolhidos. Após 7 dias ainda há várias reações ocorrendo entre o solo, cimento e argila. Assim como ocorreu no ensaio de expansão, tais reações podem ser o motivo da dificuldade em ajustar um modelo em função dos fatores w , C e A , seria necessário, portanto, o estudo de outros fatores.

Os resultados da análise de variância dos dados experimentais de contração, após 28 dias de cura, das misturas SCA são exibidos na Tabela 8-10. Adotando um nível de significância (α) de 0,05, para o teste de hipóteses, os fatores w linear (x_1), w quadrático (x_1^2), C linear (x_2), A linear (x_3) e as interações $x_1 \cdot x_2$ e $x_2 \cdot x_3$, mostraram-se significantes para o modelo.

Tabela 8-10 - Análise de variância da CO para as misturas SCA.

Fonte	Soma dos Quadrados	Graus de liberdade	Média dos quadrados	F	p
$w (x_1)$	0,026646	1	0,026646	897,7768	0,021239
$w (x_1^2)$	0,011472	1	0,011472	386,5178	0,032353
$C (x_2)$	0,005714	1	0,005714	192,5143	0,045803
$A (x_3)$	0,005490	1	0,005490	184,9676	0,046725
$x_1 \cdot x_2$	0,006450	1	0,006450	217,3238	0,043118
$x_2 \cdot x_3$	0,010537	1	0,010537	355,0276	0,033755
Falta de ajuste	0,010413	8	0,001302	43,8561	0,116288
Erro	0,000030	1	0,000030		
Total	0,076751	15			

Fonte: Do autor

A Tabela 8-10 também mostra que o modelo não apresenta falta de ajuste ($p = 0,1162 \geq \alpha$). A análise de variância da CO apresentou uma proporção de variabilidade de $R^2 = 0,864$. A equação final ajustada para o modelo pode ser representada pela (Eq. 8-5), na qual x_1 representa os valores do fator w , x_2 do fator C e x_3 do fator A .

$$CO = 1,224 - 0,174 \cdot x_1 + 0,0076 \cdot x_1^2 - 0,0694 \cdot x_2 - 0,0175 \cdot x_3 + 0,0047 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0,0040 \cdot x_2 \cdot x_3 \quad (\text{Eq. 8-5})$$

Para avaliar a adequação do modelo proposto pela (Eq. 8-5) foram plotados os gráficos da probabilidade normal dos resíduos e a verificação dos resíduos versus valores previstos (APÊNDICE G). Estes gráficos mostram que os valores residuais seguem uma distribuição normal e estão aleatoriamente distribuídos. Portanto, o

modelo CO (Eq. 8-5) é adequado para descrever o comportamento de contração das misturas SCA como uma função do teor de umidade (w), e quantidade de cimento (C) e argila (A).

Foram feitas superfícies de resposta, a partir do modelo CO, fixando diferentes fatores. A Figura 8-12 representa a projeção da superfície de resposta de CO, em função dos fatores C e A , fixando w em 11,0%, a Figura 8-13 mostra a relação w vs. C , fixando $A = 6,0\%$ e a Figura 8-14 apresenta a projeção de w vs. A , fixando $C = 6,0\%$.

Figura 8-12 - Projeção da superfície de resposta de CO para $w = 11,0\%$.

Fonte: Do autor

Como pode ser observado na Figura 8-12 há uma variação baixa nos valores de contração. Com o aumento dos teores de argila há um aumento dos valores de CO. Para o intervalo apresentado na Figura 8-12, o aumento dos teores de C também gerou valores maiores de CO, o que pode ter sido causado pela retração do cimento. Na Figura 8-10 foi observado que, para $C = 0,955\%$ e $A = 6,0\%$, a contração foi maior do que para misturas com maior quantidade de cimento.

O teor de umidade também é proporcional ao aumento da contração, pois o fenômeno ocorre pela perda de água da mistura solo-cimento-argila. É fundamental a verificação deste comportamento e interação entre os fatores, pois em uma situação

real as barreiras de proteção podem estar sujeitas a variações do nível d'água. Um estudo envolvendo simulação de variação térmica é recomendado para o caso.

Figura 8-13 - Projeção da superfície de resposta de CO para A = 6,0%.

Fonte: Do autor

Figura 8-14 - Projeção da superfície de resposta de CO para C = 6,0%.

Fonte: Do autor

8.2.2 Misturas SC

Foram realizados ensaios de contração com amostras de solo-cimento, após 7 e 28 dias de cura, e os resultados são apresentados na Tabela 8-11.

Os resultados da análise de variância dos dados experimentais de contração, após 7 dias de cura, das misturas SC são exibidos na Tabela 8-12. Considerando um nível de significância de 0,05, a análise apresentou um $R^2 = 0,99$ e o modelo não apresenta falta de ajuste ($p = 0,544 \geq \alpha$).

Tabela 8-11 - Resultados de contração das misturas solo-cimento.

Mistura	Composição		CO (%)	
	w (%)	C (%)	CO 7 dias	CO 28 dias
PD-01*	6,4	0	0,110	--
SC-301	6,4	3	0,141	0,224
SC-302	6,4	6	0,119	0,089
SC-303	6,4	9	0,089	0,088
SC-304	7,6	3	0,058	0,210
SC-305	7,6	6	0,093	0,107
SC-306	7,6	9	0,090	0,084
SC-307	8,8	3	0,156	0,138
SC-308	8,8	6	0,084	0,103
SC-309	8,8	9	0,063	0,101
SC-310	7,6	6	0,096	0,105
SC-311	7,6	6	0,093	0,107

Nota: * Amostra de solo natural sem tempo de cura

Fonte: Do autor.

A contração das misturas SC-301, SC-302 e SC-307 apresentaram contração levemente superior a contração do solo compactado, mistura PD-001.

Tabela 8-12 - Análise de variância da CO para as misturas SC, para 7 dias de cura (Fatorial 3^2).

Fonte	Soma dos Quadrados	Graus de liberdade	Média dos quadrados	F	p
w (x_1)	0,000303	1	0,000303	102,361	0,009628
w (x_1^2)	0,001867	1	0,001867	631,506	0,001580
C (x_2)	0,002256	1	0,002256	763,042	0,001308
$x_1 \cdot x_2$	0,000369	1	0,000369	124,913	0,007911
$x_1 \cdot x_2^2$	0,000299	1	0,000299	101,189	0,009738
$x_1^2 \cdot x_2$	0,003689	1	0,003689	1247,750	0,000800
$x_1^2 \cdot x_2^2$	0,000657	1	0,000657	222,265	0,004469
Falta de ajuste	0,000002	1	0,000002	0,524	0,544431
Erro	0,000006	2	0,000003		
Total	0,008931	10			

Fonte: Do autor.

Os resultados da análise de variância dos resultados de contração das misturas solo-cimento, após 28 dias de cura, são apresentados na Tabela 8-13. Adotando um nível de significância de 0,05, a análise apresentou um $R^2 = 0,99$ e o modelo não apresenta falta de ajuste ($p = 0,606 \geq \alpha$).

Tabela 8-13 - Análise de variância da CO para as misturas SC, para 28 dias de cura (Fatorial 3^2).

Fonte	Soma dos Quadrados	Graus de liberdade	Média dos quadrados	F	p
w (x_1)	0,000587	1	0,000587	440,09	0,002265
w (x_1^2)	0,000241	1	0,000241	180,54	0,005493
C (x_2)	0,014899	1	0,014899	11161,19	0,000090
C (x_2^2)	0,004273	1	0,004273	3201,32	0,000312
$x_1 \cdot x_2$	0,002438	1	0,002438	1826,36	0,000547
$x_1 \cdot x_2^2$	0,000868	1	0,000868	650,25	0,001534
$x_1^2 \cdot x_2$	0,000531	1	0,000531	397,94	0,002504
Falta de ajuste	0,000000	1	0,000000	0,37	0,605996
Erro	0,000003	2	0,000001		
Total	0,023604	10			

Fonte: Do autor.

A equação final ajustada para o modelo CO das misturas solo-cimento após 7 dias de cura pode ser representada pela (Eq. 8-6), e após 28 dias pela (Eq. 8-7). Nestas equações x_1 representa os valores do fator w e x_2 do fator C.

$$CO_{sc7} = 5,145 - 1,402 \cdot x_1 + 0,096 \cdot x_1^2 - 0,677 \cdot x_2 + 0,203 \cdot x_1 \cdot x_2 - 0,002 \cdot x_1 \cdot x_2^2 - 0,015 \cdot x_1^2 \cdot x_2 + 0,00022 \cdot x_1^2 \cdot x_2^3 \quad (\text{Eq. 8-6})$$

$$CO_{sc28} = -0,682 + 0,404 \cdot x_1 - 0,034 \cdot x_1^2 - 0,076 \cdot x_2 + 0,022 \cdot x_2^3 - 0,035 \cdot x_1 \cdot x_2 - 0,0024 \cdot x_1 \cdot x_2^2 + 0,046 \cdot x_1^2 \cdot x_2 \quad (\text{Eq. 8-7})$$

A avaliação da adequação do modelo proposto pela (Eq. 8-6) para 7 dias de cura, e modelo proposto pela (Eq. 8-7) para 28 dias de cura, foi realizada através da análise dos resíduos (APÊNDICE G). A verificação mostrou que os valores residuais estão aleatoriamente distribuídos, o modelo para 7 dias tem uma pequena distância da probabilidade normal e o modelo de 28 dias segue uma distribuição normal. Ambos os modelos podem ser considerados adequados para descrever o comportamento de contração das misturas SC como uma função do teor de umidade (w) e quantidade de cimento (C).

A Figura 8-15 representa graficamente o efeito de w e C sobre a contração das misturas solo-cimento para 7 dias de cura, e a Figura 8-16 para 28 dias de cura.

Figura 8-15 - Projeção da superfície de resposta dos resultados de contração das misturas SC para 7 dias de cura (Fatorial 3^2).

Fonte: Do autor

Os resultados de CO, para 7 dias de cura, (Figura 8-15) apresentaram pouca variação e comportamento anômalo, há indicação de que ambos os fatores, teor de umidade e quantidade de cimento causam alterações no comportamento contráctil das misturas.

Os resultados de contração após 28 dias de cura (Figura 8-16) apresentaram valores mais ordenados e indicam que o teor de cimento é o fator mais influente para promover alterações na contração das misturas. Esse fato pode ser causado pelas reações de hidratação do cimento e reações com o solo. Após 28 dias de cura a maior parte das reações já ocorreram e o material já atingiu um maior grau de cimentação entre as partículas.

Figura 8-16 - Projeção da superfície de resposta dos resultados de contração das misturas SC para 28 dias de cura (Fatorial 3^2).

Fonte: Do autor

8.2.3 Misturas SA

A Tabela 8-14 apresenta os resultados de contração do solo sem estabilizantes (mistura PD-01) e das misturas SA para o Fatorial 3^2 .

Tabela 8-14 - Composições das misturas SA (Fatorial 3^2) e resultados de CO.

Mistura	Composição		CO (%)
	w (%)	A (%)	
PD-01	6,4	0	0,110
SA-301	6,4	3	0,356
SA-302	6,4	6	1,972
SA-303	6,4	9	3,934
SA-304	9,8	3	0,258
SA-305	9,8	6	1,084
SA-306	9,8	9	2,596
SA-307	13,2	3	0,229
SA-308	13,2	6	0,429
SA-309	13,2	9	1,675
SA-310	9,8	6	1,088
SA-311	9,8	6	1,086

Fonte: Do autor.

Os resultados da análise de variância dos dados experimentais de CO das misturas de SA são exibidos na Tabela 8-15. Adotando um nível de significância (α) de 0,05, para o teste de hipóteses, os fatores w linear (x_1), w quadrático (x_1^2), A linear (x_3), A quadrático (x_3^2) e as interações $x_1 \cdot x_3$, $x_1 \cdot x_3^2$ e $x_1^2 \cdot x_3$ mostraram-se significantes para o modelo.

Tabela 8-15 - Análise de variância do CO para as misturas SA (Fatorial 3^2).

Fonte	Soma dos Quadrados	Graus de liberdade	Média dos quadrados	F	p
w (x_1)	2,57274	1	2,572740	637879	0,000002
w (x_1^2)	0,03529	1	0,035287	8749	0,000114
A (x_3)	9,03174	1	9,031742	2239308	0,000000
A (x_3^2)	0,30035	1	0,300348	74468	0,000013
$x_1 \cdot x_3$	1,13619	1	1,136192	281705	0,000004
$x_1 \cdot x_3^2$	0,04114	1	0,041141	10200	0,000098
$x_1^2 \cdot x_3$	0,01011	1	0,010106	2506	0,000399
Falta de ajuste	0,00004	1	0,000037	9	0,094492
Erro	0,00001	2	0,000004		
Total	13,21240	10			

Fonte: Do autor.

Conforme apresentado na Tabela 8-15, não há falta de ajuste ($p = 0,0944 > \alpha$) para o modelo proposto. A proporção de variabilidade na medida de CO que é explicada pelos fatores w e A, obtida na análise de variância, foi $R^2 = 0,999$. A equação final ajustada para o modelo CO_{SA} pode ser representada pela (Eq. 8-8), na qual x_1 representa os valores do fator w e x_3 do fator A.

$$CO_{SA} = -3,2142 + 0,3882 \cdot x_1 - 0,0048 \cdot x_1^2 + 1,3588 \cdot x_3 - 0,018 \cdot x_3^2 - 0,1703 \cdot x_1 \cdot x_3 + 0,0057 \cdot x_1 \cdot x_3^2 + 0,0025 \cdot x_1^2 \cdot x_3 \quad (\text{Eq. 8-8})$$

Para avaliar a adequação do modelo (Eq. 8-8) foram plotados os gráficos da probabilidade normal dos resíduos e a verificação dos resíduos versus valores previstos (APÊNDICE G). Estes gráficos mostram que os valores residuais seguem uma distribuição normal e estão aleatoriamente distribuídos. Portanto, o modelo CO_{SA} é adequado para descrever o comportamento de contração das misturas SA como uma função do teor de umidade (w) e quantidade de argila (A).

A Figura 8-17 representa graficamente o efeito de w e A sobre a contração (CO) das misturas solo-argila.

Figura 8-17 - Projeção da superfície de resposta dos resultados de contração das misturas SA (Fatorial 3^2).

Fonte: Do autor

Os resultados de CO (Figura 8-17) mostram que o teor de argila é o fator principal capaz de modificar a contração das misturas SA.

Antes do ensaio as misturas foram compactadas conforme os teores de umidade das misturas e então foram submetidas a um período de cura até atingir a saturação.

Para valores médios a altos de argila o aumento do teor de umidade gerou valores mais baixos de contração. Considerando que o teor de umidade ótima para uma adição de 6,0% de argila o $w_{ot} = 12,8\%$ de para 9,0% de argila é de $w_{ot} = 13,1\%$, os pontos mais próximos do teor de umidade ótima obtiveram valores menores de contração.

8.2.4 Análise da Contração das Misturas

A Figura 8-18 apresenta uma comparação entre os resultados de contração após 7 e 28 dias de cura para as misturas SCA.

Figura 8-18 - Resultados de contração das misturas solo-cimento-argila.

Fonte: Do autor

Nogami & Villibor (1995) classificam a contração dos solos como elevada para valores superiores a 3,0%, média para valores de 0,5 a 3,0% e baixa para valores inferiores a 0,5%. Considerando esta classificação, todas as misturas SCA apresentam “baixa contração”. Essa classificação proposta por Nogami & Villibor (1995) foi feita considerando a aplicação e critérios de obras de pavimentação.

A Figura 8-19 apresenta todos os resultados de contração das misturas solo-cimento, para 7 e 28 dias de cura.

Através das superfícies de resposta foi observado que após 7 dias de cura as amostras SC apresentaram um comportamento anômalo. Comparando os dados com as amostras após 28 dias de cura, verificamos em alguns casos a contração foi menor após 7 dias de cura.

Figura 8-19 - Resultados de contração das misturas solo-cimento.

Fonte: Do autor

Segundo a classificação da contração de Nogami & Villibor (1995), todas as misturas de solo-cimento podem ser classificadas como baixa contração (valores inferiores a 0,5%).

A Figura 8-20 apresenta todos os resultados de compressão das misturas solo-argila.

Figura 8-20 - Resultados de contração das misturas solo-argila.

Fonte: Do autor

Considerando a classificação de Nogami & Villibor (1995) a mistura SA-303 apresenta contração elevada, as misturas SA 302, 305, 306, 309, 310 e 311 são consideradas de contração média e as demais são classificadas como baixa contração.

9. COMPOSIÇÃO E MICROESTRUTURA DAS MISTURAS

Neste capítulo são apresentados os resultados dos ensaios de análise térmica diferencial (ATD) e porosimetria por intrusão de mercúrio (PIM).

9.1 ANÁLISE TÉRMICA DIFERENCIAL (ATD)

Na Figura 9-1 é apresentado o termograma do solo sem estabilização, mistura PD-01, e sem passar por peneiramento, como foi feito para determinação dos argilo-minerais do solo.

Figura 9-1 - Termograma da amostra de solo sem estabilização.

Fonte: Do autor

Os termogramas das misturas SCA (Figura 9-2), SC (Figura 9-3) e SA (Figura 9-4) são similares ao termograma total do solo (Figura 9-1), material predominante nas misturas, por não apresentarem uma linha base bem definida e possuir constituintes mineralógicos com picos endotérmicos. Observa-se ainda que é possível identificar nas misturas as mesmas fases minerais identificadas no solo total, como a gibbsita (com picos entre 304 e 312°C) e o quartzo (com picos entre 568 a 574°C), além da perda de água da amostra a partir de 50°C no início dos termogramas.

Nas misturas SCA (Figura 9-2) e SA (Figura 9-4) é possível identificar uma fase mineralógica a mais em relação ao solo. Este mineral é a montmorillonita, principal constituinte mineralógico da bentonita, registrado nos termogramas através de um

evento endotérmico em intervalos de temperatura de 50°C a 180°C, com picos entre 109 a 142°C. De acordo com Mackenzie (1957), a montmorillonita tem como característica um primeiro pico endotérmico a 156°C, que está relacionado à intensa perda de água do espaço interlamelar da estrutura desse filossilicato.

Os picos endotérmicos no início dos termogramas das misturas SCA e SC abrangem uma faixa de temperatura mais ampla que a perda de água observada no ATD do solo total (Figura 9-1). Isso ocorre devido a junção das endotermas de perda inicial de água da amostra e da estrutura da montmorillonita. Observa-se ainda que esses eventos endotérmicos ficam mais expressivos com o aumento do teor de umidade e da porcentagem de bentonita adicionada nas misturas.

Nas misturas SCA (Figura 9-2) e SC (Figura 9-3) foi possível identificar também o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), que é um dos principais produtos da hidratação do cimento nas misturas, e uma fase carbonática, ambos representados por eventos endotérmicos.

O C-S-H tem como característica um evento endotérmico no início do termograma, com pico a 112°C, como observado por Picanço et al. (2014). No entanto, nas misturas SCA e SC esta endoterma ocorreu de forma conjunta a endoterma de perda de água superficial e a da bentonita. Isso é atestado através das misturas com maior porcentagem de cimento, onde é possível observar picos duplos na endoterma inicial que abrange uma ampla faixa de temperatura, como nas misturas SCA 03, 04, 07 e 12; e SC 03, 06 e 09.

A fase carbonática nas misturas SCA e SC é representada através de um evento endotérmico com picos em 824 a 849°C, sendo, no entanto, mais bem definida nas misturas SC, especialmente as que possuem maior porcentagem de cimento, como as misturas SC 03, 06 e 09. Esta endoterma é característica da decomposição da estrutura dos carbonatos, proveniente nas misturas devido a adição do cimento, e é similar as endotermas identificadas por Coutinho Junior et al. (2012) e Chakoumakos et al. (2016).

Figura 9-2 – Termogramas das amostras solo-cimento-argila (SCA).

Fonte: Do autor

Figura 9-2 (cont.) – Termogramas das amostras solo-cimento-argila (SCA).

Fonte: Do autor

Figura 9-2 (cont.) – Termogramas das amostras solo-cimento-argila (SCA).

Fonte: Do autor

Figura 9-3 - Termogramas das amostras solo-cimento (SC).

Fonte: Do autor

Figura 9-3 (cont.) - Termogramas das amostras solo-cimento (SC).

Fonte: Do autor

Figura 9-3 (cont.) - Termogramas das amostras solo-cimento (SC).

Fonte: Do autor

Figura 9-4 - Termogramas das amostras solo-argila (SA).

Fonte: Do autor

Figura 9-4 (cont.) - Termogramas das amostras solo-cimento (SC).

Fonte: Do autor

9.2 POROSIMETRIA POR INTRUSÃO DE MERCÚRIO (PIM)

Foram realizados ensaios de porosimetria por intrusão de mercúrio (PIM) nas amostras das misturas SCA, SC e SA para verificar a alteração dos poros promovida pelas reações entre o solo, cimento e argila.

A adição de cimento e argila ao solo arenoso pode alterar a distribuição dos poros do solo e promover modificações na sua tortuosidade. Os mecanismos de transporte, tais como a advecção, difusão molecular e dispersão mecânica, podem sofrer alterações com a redução da porosidade (n). Tais alterações podem causar uma redução na condutividade hidráulica do solo e, também, aumentar o retardamento de contaminantes.

Everett (1972) classificou os poros em três categorias: os poros menores que 20Å (2 nm) são considerados microporos, entre 20 e 500 Å são chamados de mesoporos e os poros maiores que 500 Å (50 nm) são denominados como macroporos.

Koorevaar et al. (1983) apresentaram uma classificação dos poros do solo separada, também, em três categorias com base nos diâmetros dos poros ($\varnothing$). Os poros com diâmetro menor que 30 μm são considerados microporos, entre 30 e 100 μm são chamados de mesoporos e os poros maiores que 100 μm são denominados como macroporos.

O ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio realizado apresenta uma limitação de pressão máxima do equipamento de 30.000 psia, assim não ocorre o preenchimento de poros com diâmetros menores que 60Å (6 nm). Considerando a classificação de Everett (1972) o ensaio não é capaz de realizar a descrição direta dos microporos.

Conhecendo a limitação do ensaio e com os dados dos índices físicos (IF) do solo é possível determinar a quantidade de volume de poros que não foram alcançados pelo mercúrio.

A porosidade determinada pelos IF (η_{IF}) compreende todo o volume de vazios do solo (V_v) e porosidade calculada de PIM (η_{PIM}) é referente ao volume de mercúrio intrudido (V_{HG}). A Tabela 9-1 apresenta a comparação desses valores e também a porcentagem de vazios intrudidos por mercúrio (%PIM) em comparação com o V_v ,

para as misturas solo-cimento-argila. A Tabela 9-4 apresenta a mesma comparação para as misturas solo-cimento e a Tabela 9-3 para as misturas solo-argila.

Tabela 9-1 - Comparação da porosidade e volume de vazios obtidos por IF e PIM para as misturas SCA.

Misturas	Composição			Porosidade		Volume de vazios		
	w(%)	C(%)	A(%)	η_{IF}	η_{PIM}	V _v (cm ³)	V _{HG} (cm ³)	%PIM
PD-01	6,4	0	0	0,2621	0,2728	0,7068	0,7356	104,08
SCA-01	9	3	3	0,2501	0,2169	0,7131	0,6184	86,72
SCA-02	9	3	9	0,2919	0,1949	0,8777	0,5858	66,75
SCA-03	9	9	3	0,2414	0,1667	0,6872	0,4747	69,07
SCA-04	9	9	9	0,2903	0,1618	0,8586	0,4787	55,75
SCA-05	13	3	3	0,2492	0,1820	0,7099	0,5183	73,02
SCA-06	13	3	9	0,2922	0,1964	0,8694	0,5842	67,20
SCA-07	13	9	3	0,2411	0,1931	0,6953	0,5569	80,10
SCA-08	13	9	9	0,2905	0,1603	0,8597	0,4744	55,18
SCA-09	7,636	6	6	0,2754	0,1732	0,8180	0,5145	62,90
SCA-10	14,364	6	6	0,2751	0,1988	0,8134	0,5878	72,26
SCA-11	11	0,955	6	0,2631	0,1963	0,7738	0,5773	74,61
SCA-12	11	11,045	6	0,2801	0,1868	0,8009	0,5341	66,69
SCA-13	11	6	0,955	0,2369	0,1958	0,6925	0,5723	82,64
SCA-14	11	6	11,045	0,3300	0,2107	1,0303	0,6578	63,85
SCA-15	11	6	6	0,2757	0,1975	0,8269	0,5923	71,64
SCA-16	11	6	6	0,2762	0,2135	0,7790	0,6022	77,30

Fonte: Do autor

Tabela 9-2 - Comparação da porosidade e volume de vazios obtidos por IF e PIM para as misturas SC.

Misturas	Composição		Porosidade		Volume de vazios		
	w(%)	C(%)	η_{IF}	η_{PIM}	V _v (cm ³)	V _{HG} (cm ³)	%PIM
PD-01	6,4	0	0,2621	0,2728	0,7068	0,7356	104,08
SC-301	6,4	3	0,2638	0,2334	0,7804	0,6906	88,48
SC-302	6,4	6	0,2586	0,2369	0,7694	0,7048	91,61
SC-303	6,4	9	0,2481	0,1759	0,7123	0,5051	70,91
SC-304	7,6	3	0,2641	0,2839	0,7794	0,8376	107,47
SC-305	7,6	6	0,2582	0,2082	0,7200	0,5806	80,64
SC-306	7,6	9	0,2477	0,1766	0,7189	0,5126	71,30
SC-307	8,8	3	0,2634	0,2238	0,7821	0,6645	84,97
SC-308	8,8	6	0,2579	0,2089	0,7394	0,5991	81,03
SC-309	8,8	9	0,2474	0,1966	0,7278	0,5785	79,49

Fonte: Do autor

As diferenças encontradas entre os valores de porosidade e de volume de vazios também podem ser influenciadas pela heterogeneidade das amostras e pela pressão aplicada nas amostras para realização do ensaio PIM.

A amostra de solo sem estabilização (PD-01) apresenta porosidade inferior para os dados dos IF. Como esta amostra não apresenta adições de materiais

cimentantes e tem textura granular (apenas 10% de argila), quando sujeita a pressão do ensaio PIM, pode ter sofrido alterações e perda da estrutura.

Tabela 9-3 - Comparação da porosidade e volume de vazios obtidos por IF e PIM para as misturas SA.

Misturas	Composição		Porosidade		Volume de vazios		
	w(%)	A(%)	η_{IF}	η_{PIM}	V _v (cm³)	V _{HG} (cm³)	%PIM
PD-01	6,4	0	0,2621	0,2728	0,7068	0,7356	104,08
SA-301	6,4	3	0,2698	0,2253	0,8194	0,6841	83,48
SA-302	6,4	6	0,2865	0,2172	0,8340	0,6321	75,80
SA-303	6,4	9	0,3052	0,2198	0,9227	0,6646	72,03
SA-304	9,8	3	0,2695	0,2010	0,7944	0,5926	74,60
SA-305	9,8	6	0,2831	0,2052	0,8295	0,6012	72,48
SA-306	9,8	9	0,3044	0,2029	0,9390	0,6259	66,66
SA-307	13,2	3	0,2702	0,2076	0,7939	0,6098	76,82
SA-308	13,2	6	0,2835	0,2284	0,8375	0,6746	80,56
SA-309	13,2	9	0,3040	0,2149	0,9292	0,6569	70,70

Fonte: Do autor

A amostra SC-304 (Tabela 9-2) apresentou um volume de vazios maior no ensaio de porosimetria. Assim como na amostra natural, é possível que a pressão de ensaio PIM tenha modificado os poros da amostra.

Todas as amostras SCA (Tabela 9-1) apresentaram diferença entre valores de IF e PIM. A adição de cimento e argila pode ter gerado um solo com maior quantidade de microporos, ou então, um aumento de poros não comunicáveis. O mesmo foi observado nas amostras solo-cimento (Tabela 9-2) e solo-argila (Tabela 9-3).

A Tabela 9-4 mostra a porcentagem do volume de poros em função do diâmetro, segundo as classificações de Everett (1972) e de Koorevaar et al. (1983), para as misturas SCA. A Tabela 9-5 apresenta as classificações para as misturas solo-cimento e Tabela 9-6 para as misturas solo-argila.

Considerando a classificação de Koorevaar et al. (1983) todas as misturas SCA (Tabela 9-4) apresentaram uma quantidade de redução no tamanho de poros, quando comparadas com o solo (PD-01), sendo que a maioria teve uma quantidade de microporos superior a 93%, com exceção da mistura SCA-11, que possui o menor teor de cimento (0,955%). Todas as misturas SC (Tabela 9-5), também apresentaram redução do diâmetro dos poros, a mistura com a menor redução foi a mistura SC-304.

Tabela 9-4 - Porcentagem de distribuição dos poros, para as misturas SCA.

Misturas	Distribuição dos Poros por Diâmetro (%)				
	Everett (1972)		Koorevaar et al. (1983)		
	Meso 0,006<Ø<0,05 µm	Macro Ø>0,05 µm	Micro Ø<30 µm	Meso 30<Ø<100 µm	Macro Ø>100 µm
PD-01	10,81	89,19	68,07	29,66	2,28
SCA-01	17,63	82,37	96,29	1,79	1,92
SCA-02	21,02	78,98	93,95	5,69	0,36
SCA-03	31,53	68,47	97,96	1,56	0,48
SCA-04	27,75	72,25	97,07	0,94	1,99
SCA-05	18,86	81,14	97,41	1,40	1,19
SCA-06	19,71	80,29	96,48	1,81	1,71
SCA-07	28,57	71,43	96,27	2,59	1,14
SCA-08	31,68	68,32	97,52	0,95	1,54
SCA-09	24,48	75,52	95,81	1,98	2,21
SCA-10	23,44	76,56	95,58	3,07	1,34
SCA-11	18,88	81,12	88,59	9,24	2,16
SCA-12	29,12	70,88	94,14	2,26	3,60
SCA-13	19,44	80,56	94,12	3,09	2,79
SCA-14	19,29	80,71	96,73	1,55	1,72
SCA-15	22,92	77,08	96,52	1,84	1,64
SCA-16	20,39	79,61	96,51	1,79	1,70

Fonte: Do autor

Tabela 9-5 - Porcentagem de distribuição dos poros, para as misturas SC.

Misturas	Distribuição dos Poros por Diâmetro (%)				
	Everett (1972)		Koorevaar et al. (1983)		
	Meso 0,006<Ø<0,05 µm	Macro Ø>0,05 µm	Micro Ø<30 µm	Meso 30<Ø<100 µm	Macro Ø>100 µm
SC-301	14,21	85,79	96,01	2,91	1,08
SC-302	37,52	62,48	97,69	1,57	0,74
SC-303	29,38	70,62	98,19	1,24	0,56
SC-304	10,72	89,28	71,50	27,27	1,23
SC-305	20,88	79,12	97,08	1,60	1,32
SC-306	26,46	73,54	97,64	0,90	1,46
SC-307	14,92	85,08	92,28	5,72	1,99
SC-308	19,23	80,77	95,50	3,00	1,50
SC-309	23,99	76,01	95,14	3,18	1,68

Fonte: Do autor

Tabela 9-6 - Porcentagem de distribuição dos poros, para as misturas SA.

Misturas	Distribuição dos Poros por Diâmetro (%)				
	Everett (1972)		Koorevaar et al. (1983)		
	Meso 0,006<Ø<0,05 µm	Macro Ø>0,05 µm	Micro Ø<30 µm	Meso 30<Ø<100 µm	Macro Ø>100 µm
SA-301	12,52	87,48	69,81	28,99	1,20
SA-302	13,74	86,26	66,75	31,67	1,57
SA-303	14,62	85,38	63,06	35,16	1,78
SA-304	13,56	86,44	89,33	9,23	1,44
SA-305	14,79	85,21	85,12	13,12	1,77
SA-306	15,95	84,05	84,14	14,12	1,74
SA-307	13,30	86,70	92,47	6,33	1,21
SA-308	12,78	87,22	73,93	24,64	1,42
SA-309	15,15	84,85	78,53	17,32	4,16

Fonte: Do autor

As misturas solo-argila (Tabela 9-6), quando comparadas com o solo, mistura PD-01 (Tabela 9-4), através da classificação de Koorevaar et al. (1983), apresentaram comportamento diferente do observado nas misturas SCA e SC. As misturas SA-302 e 303 não apresentaram aumento da quantidade de poros inferiores a 30 μm .

Comparando-se as misturas usando a classificação de Everett (1972) todas as misturas apresentaram uma redução da quantidade de macroporos, em relação ao solo (PD-01).

As classificações isoladas não permitem um bom entendimento da microestrutura das misturas, é preciso avaliar as curvas de distribuição dos diâmetros de poros. Independentemente do ensaio PIM não apresentar dados para $\phi < 6 \text{ nm}$, as curvas permitem a análise da modificação da estrutura dos poros comunicáveis promovida pela estabilização química.

A distribuição dos poros quanto a porcentagem de volume em função do diâmetro e frequência de poros das misturas de solo-cimento-argila com $w = 9,0\%$ (SCA-01, 02, 03 e 04) são apresentadas nas Figura 9-5. Na Figura 9-6 são apresentadas as misturas com $w = 13,0\%$ (SCA-05, 06, 07 e 08), na Figura 9-7 são apresentadas as misturas SCA-09, 10, 11 e 12 e na Figura 9-8 as misturas SCA-13, 14, 15 e 16.

Figura 9-5 - Distribuição dos poros das misturas SCA-01, 02, 03 e 04 em função da porcentagem e frequência.

Fonte: Do autor

Figura 9-6 - Distribuição dos poros das misturas SCA-05, 06, 07 e 08 em função da porcentagem e frequência.

Fonte: Do autor

Figura 9-7- Distribuição dos poros das misturas SCA-09, 10, 11 e 12 em função da porcentagem e frequência.

Fonte: Do autor

Figura 9-8 - Distribuição dos poros das misturas SCA-13, 14, 15 e 16 em função da porcentagem e frequência.

Fonte: Do autor

Comparando a distribuição dos diâmetros dos poros das misturas SCA-01 e SCA-02 ($C=3,0\%$) com as misturas SCA-03 e SCA-04 ($C = 9,0\%$), na Figura 9-5, observa-se uma redução no diâmetro dos poros, o que indica que a quantidade de cimento é um fator fundamental para alterar a microestrutura das misturas.

Comparando-se as misturas SCA-05 e SCA-06 ($C = 3,0\%$) com as misturas SCA-07 e SCA-08 ($C = 9,0\%$), na Figura 9-6, é possível observar um comportamento semelhante ao encontrado na Figura 9-5. O acréscimo de cimento promoveu uma redução dos diâmetros de poros.

A amostra de solo compactado (PD-01) possui um pico de frequência em $29\text{ }\mu\text{m}$, indicando uma quantidade maior de poros com esse diâmetro, e um segundo pico em $0,018\text{ }\mu\text{m}$. Todas as misturas SCA apresentaram redução de diâmetro dos poros.

As misturas SCA com $9,0\%$ de cimento e $3,0\%$ de argila (SCA-03 e 07) promoveram uma grande alteração nos poros do solo. Estas misturas apresentaram uma curva de volume de diâmetro de poros mais uniforme, sem destaques para algum diâmetro específico. Ambas as misturas apresentam poucos poros maiores que $2,0\text{ }\mu\text{m}$. O gráfico de frequência de poros da mistura SCA-04 mostra um pico pequeno para $8,2\text{ }\mu\text{m}$.

A Figura 9-9 apresenta a distribuição dos poros quanto a porcentagem de volume em função do diâmetro e frequência de poros das misturas de solo-cimento com $w = 6,4\%$, a Figura 9-10 com $w = 7,6\%$ e a Figura 9-11 com $w = 8,8\%$.

Figura 9-9 - Distribuição dos poros das misturas SC-01, 02, e 03 em função da porcentagem e frequência ($w = 6,4\%$).

Fonte: Do autor

Figura 9-10 - Distribuição dos poros das misturas SC-04, 05, e 06 em função da porcentagem e frequência ($w = 7,6\%$).

Fonte: Do autor

Figura 9-11 - Distribuição dos poros das misturas SC-07, 08, e 09 em função da porcentagem e frequência ($w = 8,8\%$).

Fonte: Do autor

Os resultados de distribuição e frequências de poros das misturas solo-cimento com teor $C = 9,0\%$ (SC-03, 06 e 09) ficaram semelhantes as obtidas pelas misturas SCA com igual teor de cimento e apenas $3,0\%$ de argila (SCA-03 e 07).

Os resultados do ensaio PIM das misturas solo-cimento mostraram uma relação proporcional do aumento da quantidade de cimento com a diminuição dos diâmetros de poros

A Figura 9-12 apresenta a distribuição dos poros quanto a porcentagem de volume em função do diâmetro e frequência de poros das misturas de solo-argila com $w = 6,4\%$, a Figura 9-13 com $w = 9,8\%$ e a Figura 9-14 com $w = 13,2\%$.

As misturas solo-cimento-argila e solo-cimento apresentaram uma redução de diâmetro de poros, quando comparadas ao solo sem tratamento, maior do que as misturas solo-argila. Mesmo que menores, as distribuições de poros das misturas solo-argila mostram que houve uma redução em relação a mistura PD-01. As curvas mostram ainda que o aumento do teor de argila causa uma redução na frequência dos poros de maior diâmetro.

Figura 9-12 - Distribuição dos poros das misturas SA-01, 02, e 03 em função da porcentagem e frequência ($w = 6,4\%$).

Fonte: Do autor

Figura 9-13 - Distribuição dos poros das misturas SA-04, 05, e 06 em função da porcentagem e frequência ($w = 9,8\%$).

Fonte: Do autor

Figura 9-14 - Distribuição dos poros das misturas SA-07, 08, e 09 em função da porcentagem e frequência ($w = 13,2\%$).

Fonte: Do autor

Entre as amostras avaliadas, as misturas SCA-04 e SCA-08 apresentaram os menores valores de porosidade.

A redução da porosidade (n) promove alterações nos mecanismos de transporte, como a advecção, difusão molecular e dispersão mecânica. A adição de estabilizantes pode, ainda, alterar a distribuição dos poros do solo e promover modificações na sua tortuosidade (τ). Tais alterações podem causar uma redução na condutividade hidráulica do solo e, também, aumentar o retardamento de contaminantes que percolem a mistura solo-estabilizante compactada.

10. DISCUSSÕES E ANÁLISES FINAIS

10.1 FLUXO E TRANSPORTE DE CONTAMINANTES

Os resultados de condutividade hidráulica obtidos neste trabalho, através da estabilização química com cimento e adição de argila, atingiram valores experimentais mínimos de 4×10^{-10} m/s para fluxo com água e $3,4 \times 10^{-9}$ m/s para fluxo com solução de KCl.

Os valores de K, obtidos na fase de percolação do contaminante (KCl 0,023M), variaram na faixa de $6,4 \times 10^{-8}$ m/s e $3,4 \times 10^{-9}$ m/s e foram semelhantes aos encontrados por Leite (2000) e Basso (2003).

Assim como foi observado por Loch (2013) a estabilização química com cimento do solo arenoso da Fm. Botucatu promove redução dos valores de condutividade hidráulica e aumento da resistência à compressão simples. As misturas apenas com adição de cimento atingiram valores mínimos de K de aproximadamente 4×10^{-8} m/s.

Comparando a condutividade hidráulica das misturas solo-cimento-argila, solo-cimento e solo-argila é possível observar que o teor de argila é um fator fundamental na redução dos valores de K. Nas misturas SA foram atingidos valores de K na ordem de 10^{-10} m/s.

Os resultados de retenção de contaminantes para as misturas solo-cimento-argila foram semelhantes aos fatores encontrados pelas misturas de solos feitas por Leite (2000) e superiores aos fatores obtidos por misturas de solo argiloso e arenoso apresentados por Basso (2003).

Comparando os dados do fluxo durante a percolação da solução de KCl e os valores do fator de retenção obtidos pela solução de van Genuchten (1980) é possível verificar que não são necessariamente as misturas com menor condutividade hidráulica que apresentaram os maiores valores de Rd (Figura 10-1).

As misturas com menor condutividade hidráulica durante a fase de percolação de contaminante foram aquelas com maiores teores de umidade de compactação e maiores teores de argila. As misturas SCA-08 (w = 13%, C = 9% e A = 9%) e SCA-14 (w = 11%, C = 6% e A = 11,045%) obtiveram os menores valores de K nesse período.

Figura 10-1 - Projeção das superfícies de resposta dos valores de R_d , solução de van Genuchten (1980) - linhas contínuas - e valores de condutividade hidráulica (m/s) durante percolação do contaminante – linhas pontilhadas ($w = 11,0\%$).

Fonte: Do autor

Para um mesmo teor de argila o aumento da quantidade de cimento causa uma redução nos valores do fator de retardamento. O mesmo comportamento foi encontrado nos valores de CTC das misturas SCA (Figura 6-34).

A influência do cimento sobre os valores de R_d não foi tão significativa nos ensaios de equilíbrio em lote, como foi para os valores de R_d obtidos através do ensaio de percolação em coluna (Figura 6-34).

A comparação dos resultados de CTC (Figura 6-34), R_d e K durante o fluxo de KCl (Figura 10-1) indica que para valores mais elevados do teor de cimento há menos material disponível para reagir e realizar adsorção do íon K^+ . É possível que tenha ocorrido mais reações de hidratação do cimento ou entre o solo, cimento e argila. Como essas misturas apresentaram menores valores de condutividade hidráulica e, também, a menor alteração de K em relação ao período de percolação com água, isso indica que elas apresentaram estrutura mais estável ao contato com a solução.

10.2 PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA

As misturas solo-cimento-bentonita apresentaram valores de resistência à compressão simples semelhantes aos obtidos pelas misturas solo-cimento e superiores aos valores das misturas solo-argila.

Considerando a recomendação de Daniel & Wu (1993) que os material para aplicação em barreiras selantes devem apresentar valores de resistência à compressão simples de pelo menos 200 kPa, apenas algumas misturas solo-argila apresentaram valores inferiores. Esses valores foram obtidos para misturas compactadas acima do teor de umidade ótima.

A análise da resistência ao cisalhamento mostrou o cimento como fator fundamental para variação da tensão cisalhante máxima (item 7.2.2). A variação dos resultados de resistência à compressão simples apresentou grande semelhança o comportamento da tensão ao cisalhamento. Nas misturas solo-cimento-argila o aumento da quantidade de argila não causou redução significativa nas tensões de pico.

A Figura 10-2 apresenta a sobreposição das superfícies de resposta dos valores de coesão e ângulo de atrito das misturas SCA após 28 dias de cura, considerando um teor de umidade de 11,0%.

Comparando o efeito das variáveis independentes, o aumento do cimento tende a aumentar os valores de ângulo de atrito e coesão das misturas, influenciando mais na parcela da coesão. O aumento do teor de argila tende a aumentar a parcela da coesão e diminuir o valor do ângulo de atrito das misturas. O aumento do teor de umidade causou uma redução nos valores de c e Φ .

O teor de cimento apresentou comportamento semelhante nas misturas solo-cimento, a superfície de resposta da coesão para 28 dias de cura (Figura 7-39) mostra uma região de valores mínimos e dos valores de ângulo de atrito (Figura 7-40) mostra valores máximos. Sendo que a combinação dos valores altos de cimento e teor de umidade resultaram em maiores valores de c . A combinação de teores médios de umidade e cimento apresentaram os maiores valores de Φ .

Figura 10-2 - Projeção das superfícies de resposta dos valores de coesão (linhas cheias e valores em kPa) e ângulo de atrito (linhas pontilhadas e valores em graus) para as misturas SCA com $w = 11,0\%$.

Fonte: Do autor

Além dos parâmetros de fluxo e transporte, os parâmetros de resistência são fundamentais para a escolha dos materiais utilizados para construção de barreiras de proteção ambiental. Durante a sua vida útil as barreiras são sujeitas a carregamentos variados. Podem sofrer solicitações devido à acomodação e peso próprio dos resíduos, cargas pontuais e eventuais mudanças de temperatura. Os dados de resistência apresentados aqui podem inclusive servir para verificação quanto a estabilidade de taludes.

10.3 EXPANSÃO E CONTRAÇÃO DAS MISTURAS

As misturas solo-cimento não apresentaram comportamento expansivo de acordo com os valores do ensaio de expansão livre por inundação. Entre as misturas avaliadas as composições com solo-argila apresentaram valores mais elevados de expansão. A maior parte das misturas com argila tem potencial expansivo alto conforme a classificação da ASTM D4829-11. Seguindo os mesmos critérios de classificação as misturas solo-cimento-argila apresentaram potencial muito baixo a baixo.

As superfícies de resposta para o modelo de expansão das misturas solo-cimento-argila (Figura 8-5, para $w = 11\%$) mostram um aumento dos valores de IE para os teores mais elevados de argila. O acréscimo do teor de cimento promove uma redução dos valores do índice de expansão.

Comparando os resultados de expansão das misturas solo-argila e solo-cimento-argila há indicação de que a adição de cimento agiu como estabilizante da mistura e reduziu seu potencial expansivo. Quando comparados os limites de consistência das misturas o cimento se mostrou como agente redutor.

Os resultados de contração das misturas solo-cimento mostraram uma relação direta entre o aumento do teor de cimento e a redução da contração as amostras. Segundo a classificação de Nogami & Villibor (1995) todas as misturas SC apresentam baixa contração.

Nas misturas solo-argila, como comportamento esperado da bentonita, houve uma relação direta entre o aumento da contração das amostras e o aumento do teor de argila. Nas amostras SA foi observado que para os valores próximos do teor de umidade ótima a contração foi menor.

O comportamento contráctil das misturas solo-cimento-argila, pode ser identificado como baixa contração segundo classificação de Nogami & Villibor (1995). A variação da contração foi baixa, mas se compararmos os resultados das amostras SCA-11 ($C = 0,95\%$), SCA-12 ($C = 11\%$) e SCA-13 ($C = 6\%$) foi possível observar que para menores teores de cimento ocorre uma contração mais elevada. A mistura SCA-11 também apresentou comportamento expansivo diferente das demais, sendo a única classificada como potencial baixo de expansão e as outras como muito baixo.

Os dados de expansão e contração mostram que o cimento foi um agente estabilizante das misturas.

10.4 DETERMINAÇÃO DA ZONA ADMISSÍVEL

Daniel & Benson (1990) determinaram métodos para alcançar uma zona admissível para verificar e garantir que os solos sejam adequados para uso como barreiras selantes. Os autores partiram do princípio do controle da massa específica seca, teor de umidade e a energia de compactação usado para garantir maior resistência do solo e inseriram a variável condutividade hidráulica.

Os métodos propostos por Daniel & Benson (1990) são amplamente utilizados e tem bons resultados para avaliação de solos compactados. Os autores ainda citam que para definir a região admissível podem ser considerados outros fatores como parâmetros de resistência, critérios de expansão e contração, práticas de construção, etc.

Usualmente para avaliar e testar diversos fatores, são estabelecidos parâmetros fixos e cada parâmetro é variado individualmente. Nos casos onde um material está sendo testado essa abordagem é eficaz. Porém quando se está trabalhando com diversos materiais, por exemplo em situações estabilização química, misturas ou melhorias de solos o número de variáveis aumenta de modo exponencial.

Como foi apresentado neste trabalho, o método de superfície de resposta permitiu o estudo do comportamento das variáveis independentes (w , C e A) e identificação da influência de cada uma das variáveis dependentes (parâmetros de fluxo, transporte, resistência, etc).

O uso do planejamento fatorial juntamente com o método das superfícies de resposta é recomendado para análises de misturas e apresentou bons resultados para interpretação do comportamento das misturas. Seu uso pode ser empregado nos estudos geotécnicos de melhorias e avaliação do comportamento de parâmetros do solo.

O método utilizado nesse trabalho serviu para descrever o comportamento dos parâmetros do solo em função de valores fáceis de dosagem de misturas. O comportamento das misturas de solo arenoso, cimento e argila se mostrou semelhante a materiais argilosos avaliados por outros autores, e adequado para aplicação em barreiras.

Os dados das misturas solo-cimento-argila servem de subsídios para futuros projetos de barreira de proteção ambiental e o método empregado pode ser utilizado em avaliações de outros materiais.

11. CONCLUSÕES

Os resultados dos ensaios de caracterização física, físico-química e mineralógica do solo da Fm. Botucatu, juntamente com os ensaios de percolação em coluna demonstraram que este material não é adequado para ser utilizado em barreiras de proteção ambiental.

Inicialmente foi estabelecida a proposta de que é possível alterar o solo e através da mistura com cimento e argila com a finalidade de aplicação para barreiras de proteção. Então foram estabelecidas as propriedades que precisavam ser explicadas: condutividade hidráulica, retenção de contaminante, parâmetros de resistência, expansão e contração. Para compreender o comportamento das misturas foram escolhidas as variáveis independentes: teores de umidade (w), cimento (C) e argila (A).

Os resultados mostraram que a estabilização química com cimento e adição de bentonita alteraram as propriedades do solo e, com isso, foram obtidas misturas com comportamento que indicam o potencial para aplicação em barreiras.

Foram determinados parâmetros de fluxo e transporte das misturas através de ensaios de percolação em coluna e ensaios de equilíbrio em lote. Os resultados obtidos nos ensaios de percolação em coluna mostraram que as misturas solo-cimento-argila apresentam grande redução da condutividade hidráulica, chegando a valores na ordem de 10^{-10} m/s pra fluxo com água e 10^{-9} m/s para o fluxo de solução de KCl.

A capacidade sorciva das misturas solo-cimento-argila (SCA) mostra que o material tem potencial para o uso em barreiras. Os valores de R_d , para a solução de KCl, foram semelhantes a outros materiais encontrados na literatura e indicados para aplicação em barreiras de proteção ambiental. O número de Peclet mostrou que algumas misturas apresentam comportamento difusivo e outras advectivo-difusivo.

Para os parâmetros de fluxo e transporte as três variáveis independentes (w, C e A) foram adequadas. Para condutividade hidráulica foi necessário transformar os valores de K em $\ln K$ para linearizar os dados. Os fatores de retardamento (R_d) encontrados nos ensaios de equilíbrio em lote e por percolação em coluna apresentaram comportamento semelhante aos resultados de CTC das misturas.

Os equipamentos montados para ensaio de coluna mostraram-se adequados para determinação dos parâmetros de fluxo e transporte e permitiram a realização de diversas amostras simultâneas em situações de fluxos diferentes.

A avaliação da resistência à compressão simples e ao cisalhamento direto das misturas mostrou que é possível determinar os parâmetros de resistência em função da dosagem das misturas através de modelos de regressão. Foi possível estabelecer inclusive um modelo de previsão da tensão ao cisalhamento em função dos fatores w , C , A e tensão normal aplicada.

Todas as misturas de solo-cimento-argila apresentaram resultados elevados de resistência à compressão, com valores de até 2,0 MPa para as amostras com imersão em água e 6,3 MPa sem imersão.

Os resultados de expansão e contração das misturas mostraram que o cimento promoveu a estabilização das misturas e reduziu o comportamento expansivo-contrátil.

Foram avaliadas misturas de solo-cimento e solo-argila para comparar o comportamento. As misturas solo-cimento (SC) apresentaram valores mais elevados de K , resistência semelhante às misturas solo-cimento-argila e não apresentaram comportamento expansivo-contrátil. As misturas solo-argila (SA) apresentaram valores menores de K e valores inferiores de resistência. As misturas SA apresentaram os maiores valores de contração e expansão, que pode ser explicado pelas propriedades da bentonita.

Assim as misturas solo-cimento-argila apresentam a vantagem de possuir fator de retardamento adequado, para a solução analisada, valores baixos de condutividade hidráulica, elevada resistência e comportamento contrátil baixo.

Através das análises térmicas diferenciais foram identificados picos característicos da formação de silicatos de cálcio hidratados nas misturas solo-cimento-argila e solo-cimento.

A avaliação da microestrutura das misturas, através do ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio, demonstrou a capacidade da estabilização química de alterar a configuração da matriz de poros do solo. O cimento promoveu grande redução dos diâmetros de poros nas misturas SCA e SC. Esta alteração da textura do solo justifica a redução da condutividade hidráulica encontrada.

A análise dos dados com o uso integrado do planejamento fatorial e técnica de superfícies de resposta permitiu a compreensão do comportamento das misturas solo-cimento-argila. Os métodos escolhidos possibilitaram a avaliação conjunta dos fatores intervenientes.

11.1 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Realização de ensaios de resistência com confinamento dos corpos-de-prova, para simular a situação in situ de barreiras de proteção ambiental.

Avaliar o comportamento de fluxo e transporte das misturas solo-cimento-argila com outras soluções contaminantes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACAR, Y.; OLIVIERI, I. *Pore fluids effects on the fabric and hydraulic conductivity of laboratory compacted clay*. **Transportation Research Record**. n. 1219, Transportation Research Board, Washington. p. 144-159.
- ADASKA, W. S. *Soil-Cement Liners*. In: JOHNSON, A. I.; FROBEL, R. K.; CAVALLI, N. J.; PETTERSSON, C. B. **Hydraulic Barriers in Soil and Rock**. ASTM, Baltimore, 1985. 332p.
- ALBRECHT, B. A.; BENSON, C.H., *Effects of desiccation on compacted natural clays*. **Journal of Geoenvironmental Engineering**, ASCE, v.127, n.1, 2001. p. 67-75.
- AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS – AASHTO. **M-145-91**: *Standard Specification for Classification of Soils and Soil-Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes*. AASHTO, Washington, 2004.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. **D698**: *Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12 400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³))*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012, DOI: 10.1520/D0698-12E02, www.astm.org.
- _____. **D1557**: *Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft³ (2,700 kN-m/m³))*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012, DOI: 10.1520/D1557-12E01, www.astm.org.
- _____. **D2487**: *Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)*. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2011. DOI: 10.1520/D2487-11, www.astm.org.

_____. **D3080**: *Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2004, DOI: 10.1520/D3080-04, www.astm.org.

_____. **D4829**: *Standard Test Method for Expansion Index of Soils*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2011, DOI: 10.1520/D4829-11, www.astm.org.

ANDERSON, M. J., WHITCOMB, P. J. *Optimisation of paint formulations made easy with computer-aided design of experiments for mixtures*. **Journal of Coatings Technology**, v. 68, 1996, p.71-76.

ARBIZU, I.P.; LUIS PEREZ, C.J. *Surface Roughness Prediction by Factorial De-sign of Experiments in Turning Processes*, **Journal of Materials Processing Technology**, v.143-144, 2003, pp. 390-396. DOI: 10.1016/S0924-0136(03)00407-2.

ASKARANI, K. K.; PAKBAZ, M. S. *Drained Shear Strenght of Over-Consolidated Compacted Soil-Cement*. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 28, n. 5, 2016. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001510.

ASLAN, N. *Application of response surface methodology and central composite rotatable design for modeling and optimization of a multi-gravity separator for chromite concentration*. **Powder Technology**, v.185, 2008. p.80-86.

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

_____. **NBR 6459**: *Solo – Determinação do Limite de Liquidez*. Rio de Janeiro, 1984.

_____. **NBR 6508**: *Grãos de Solo que Passam Pela Peneira 4,8 mm – Determinação da Massa Específica*. Rio de Janeiro, 1984.

_____. **NBR 7180:** Solo – Determinação do Limite de Plasticidade. Rio de Janeiro, 1984.

_____. **NBR 7181:** Solo – Análise Granulométrica. Rio de Janeiro, 1984.

_____. **NBR 7182:** Solo – Ensaio de Compactação. Rio de Janeiro, 1986.

_____. **NBR 11578:** Cimento Portland Composto. Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR 12023:** Solo Cimento – Ensaio de Compactação. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 12024:** Solo-cimento – Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos – Procedimento. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 12025:** Solo Cimento – Ensaio de Compressão Simples de Corpos de Prova Cilíndricos. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 12770:** Solo Coesivo – Determinação da Resistência à Compressão Não Confinada. Rio de Janeiro, 1992.

_____. **NBR 13600:** Solo - Determinação do teor de matéria orgânica por queima a 440 graus Celsius. Rio de Janeiro, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND - ABCP. **Dosagem das misturas de solo-cimento: normas de dosagem e métodos de ensaio.** ABCP, São Paulo, 1986, ET-35, 51p.

AZAMBUJA, R.M.B. Comportamento mecânico e hidráulico de misturas de solo-cimento-bentonita para a aplicação em barreiras verticais de contenção de contaminantes. **Dissertação** (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004. 99p.

- BARBETTA, P. A.; REIS, M. M.; BORNIA, A. C. **Estatística para cursos de engenharia e informática**. São Paulo, Atlas, 2004.
- BARROS, C. C. M. Ensaio de Coluna para Percolação de Contaminantes em Misturas Solo-Bentonita Visando Alternativa de Barreira Mineral em Região Costeira. **Dissertação** (Mestrado) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2013.
- BASSO, J. B. Transporte e retenção de K^+ , Cu^{2+} e Cl^- em uma mistura compactada de solos lateríticos para uso em barreiras selantes: procedimentos de homogeneização da mistura e adaptações em equipamentos de percolação em coluna. **Dissertação** (Mestrado) Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2003.
- BENSON, C. H.; ZHAI, H.; WANG, X. *Estimating Hydraulic Contivity of Compacted Clay Liners*. **Journal of Geotechnical Engineering**, v. 120, n. 2, 1994. p. 366-387.
- BILLINGS, M. P. **Structural geology**. 2 ed. *Prentice-Hall*, Englewood Cliffs, 1954. 514 p.
- BITTENCOURT, E. C.; SANTOS, I. G. S.; SILVA FILHO, T. N.; ASSIS, C. D. Adição de Solo Cimento para Melhoria da Resistência da Camada para Maior Economia na Fundação. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica – COBRAMSEG, 2014. Goiânia. **Anais...**, ABMS, 2014, v.1.
- BOSCOV, M. E. G. **Geotecnia Ambiental**. São Paulo, Oficina de textos, 2008. 248p.
- BOFF, F. E. Avaliação do Comportamento de uma Mistura Compactada de Solos Lateríticos Frente a Soluções de Cu^{2+} , K^+ , Cl^- em Soluções de Percolação. **Dissertação** (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.

- BOUAID, A.; MARTINEZ, M. ARACIL, J. *A comparative study of the production of ethyl esters from vegetable oils as a biodiesel fuel optimization by factorial design. Chemical Engineering Journal*, v.134, 2007. p.93-99.
- BOX, G. E. P.; DRAPPER, N. R. ***Response Surfaces, Mixtures, and Ridge Analyses***. 2nd ed. Hoboken, John Wiley & Sons, 2007. 857p.
- BOX, G. E. P.; HUNTER, J. S. *Multi-factor experimental designs for exploring response surfaces. Annals of Mathematical Statistics*, v.28, 1957. p.195-242.
- BRASIL. Lei N° 12.305, de 02 de agosto de 2010.
- _____. Decreto N° 7.404, de 23 de dezembro de 2010.
- BRINDLEY, G. W.; BROWN, G. ***Crystal Structures of Clay Minerals and Their X-Ray Identification***. Londres, Mineralogical Society, 1980. 495p.
- BRODERICK, G.P.; DANIEL, D.E. *Stabilizing compacted clay against chemical attack. Journal of Geotechnical Engineering*, v.116, n.10, 1990. p.1549-1567.
- BUILDING RESEARCH ADVISORY BOARD. ***Chemical Soil Stabilization***. National Academy of Science, Washington, 1969. 65p.
- BURKERT, J.F.M.; MAUGERI, F.; RODRIGUES, M.I. *Optimization of extracellular lipase production by Geotrichum sp. using factorial design. Bioresource Technology*, v.91, n.1, 2004.
- BURMISTER, D. M. *Principles and Techniques of Soil Identification. Highway Research Board Proceedings*, v.29, 1950. p. 402-433.
- CAMARGO, O.A.; MONIZ, A.C.; JORGE, J.A.; VALADARES, J.M.A.S. ***Métodos de Análise Química, Mineralógica e Física de Solos do Instituto Agronômico***

de Campinas. Instituto Agronômico, Campinas, 2009. 77p. (Boletim técnico, 106, Edição revista e atualizada)

CAPELLA-PEIRÓ, M.E.; BOSE, D.; RUBERT, M.F., ESTEVE-ROMERO, J. *Optimization of a capillary zone electrophoresis method by using a central composite factorial design for the determination of codeine and paracetamol in pharmaceuticals.* **Journal of Chromatography B**, v.839, 2006. p.95-101.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos Solos e Suas Aplicações.** 5 ed. Livros Técnicos e Científicos, Rio de Janeiro, 1987. v.2.

CARVALHO, C.M.L.; SERRALHEIRO, M.L.M.; CABRAL, J.M.S.; AIRES-BARROS, M.R. *Application of factorial design to the study of transesterification reactions using cutinase in AOT-reversed micelles.* **Enzyme and Microbial Technology**, v.21, 1997.

CETESB – COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Resíduos Sólidos Industriais.** 2 ed. CETESB, São Paulo, 1993. 2 ed.

CHAKOUMAKOS, B. C.; RACHEIL, B. M.; KOENIGS, R. P.; BRUCH, R, P.; FEYGENSON, M. *Empirically testing vaterite structural models using neutron diffraction and thermal analysis.* **Revista Scientific Reports**, v. 6, 2016.

CHARNET, R.; FEIRE, C.A.L.; CHARNET; E.M.R.; BONVINO, H. **Análise de Modelos de Regressão Linear.** 2 ed. Editora da Unicamp, Campinas, 2008. 356p.

CHEN, F. H. **Foundation on Expansive Soils.** Amsterdam, Elsevier, 1983. 463p.

CHEW, S. H.; KAMRUZZAMAN, A. H. M.; LEE, F. H. *Physicochemical and Engineering Behaviour of Cement Treated Clays.* **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 130, n. 7, 2004. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2004)130:7(696).

- CHO, H.; ZOH, K. *Photocatalytic degradation of azo dye (Reactive Red 120) in TiO₂/UV system: Optimization and modeling using a response surface methodology (RSM) based on the central composite design.* **Dyes and Pigments**, v.75, n.3, 2007.
- CHO, W.; LEE, J.; KANG, C. *A compilation and evaluation of thermal and mechanical properties of bentonite-based buffer materials for high-level waste repository.* **Journal of the Korean Nuclear Society**, v.34, n.1, 2002. p.90-103.
- COKCA, E.; EROL, O.; ARMANGIL, F. Effects of compaction moisture content on the shear strength of an unsaturated clay. *Geotechnical and Geological Engineering*, v. 22, 2004. p. 285–297.
- CONSOLI, N. C.; MONTARDO, J. P.; DONATO, M.; PRIETTO, P. D. M. *Effect of material properties on the behaviour of sand–cement–fibre composites.* **Ground Improvement**, v. 8, n. 2, 2004. p. 77–90. DOI: 10.1680/grim.2004.8.2.77.
- CONSOLI, N. C.; LOPES Jr., L. S.; FOPPA, D.; HEINECK, K. S. *Key parameters dictating strength of lime/cement-treated soils.* **Proceedings of the Institution of Civil Engineers Geotechnical Engineering**, v. 162, GE2, 2008. pp. 111–118. DOI: 10.1680/geng.2008.162.2.111.
- CONSOLI, N. C.; FONSECA, A. V.; CRUZ, R. C.; HEINECK, K. S. *Fundamental Parameters for the Stiffness and Strength Control of Artificially Cemented Sand.* **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 135, n. 9, 2009. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000008.
- CONSOLI, N. C.; DALLA ROSA, A.; CORTE, M. B.; LOPES Jr., L. S.; CONSOLI, B. S. *Porosity-Cement Ratio Controlling Strength of Artificially Cemented Clays.* **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 23, n. 8, 2011. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000283

- CONSOLI, N. C.; CRUZ, R. C.; FONSECA, A. V.; COOP, M. R. *Influence of Cement-Voids Ratio on Stress-Dilatancy Behavior of Artificially Cemented Sand. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering***, v. 138, n. 1, 2012a. pp. 100-109. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000565.
- CONSOLI, N. C.; DALLA ROSA JOHANN, A.; GAUER, E. A.; dos SANTOS, V. R.; MORETTO, R. L.; CORTE, M. B. *Key parameters for tensile and compressive strength of silt–lime Mixtures. **Géotechnique Letters***, v. 2, 2012b. pp. 81–85, DOI: 10.1680/geolett.12.00014.
- CONSOLI, N. C.; FONSECA, A. V.; SILVA, S. R.; CRUZ, R. C.; FONINI, A. *Parameters controlling stiffness and strength of artificially cemented soils. **Géotechnique***, v. 62, n. 2, 2012c. pp.177–183. DOI: 10.1680/geot.8.P.084.
- CONSOLI, N. C.; FESTUGATO, L.; ROCHA, C. G.; CRUZ, R. C. *Key parameters for strength control of rammed sand–cement mixtures: Influence of types of portland cement. **Construction and Building Materials***, v. 49, 2013. pp. 591–597. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.08.062.
- CORREIA, S.L., CURTO, K.A. S., HOTZA, D., SEGADÃES, A.M. *Using statistical techniques to model the flexural strength of dried triaxial ceramic bodies. **Journal of the European Ceramic Society***, v. 24, 2004. p. 2813-2818.
- CORREIA, S.L.; LOCH, F.C.; SCHACKOW, A.; SEGADÃES, A.M. Modelagem da Resistência à Compressão de Concretos Produzidos com Substituição Parcial de Cimento Portland por Rejeitos de Tijolos (RTP). In: Congresso Brasileiro de Cerâmica, 54., 2010, Foz do Iguaçu, **Anais...**, São Paulo, ABC, 2010a. v. 1. p. 1-12.
- CORREIA, S.L.; PARTALA, T.; LOCH, F.C.; SEGADÃES, A M. *Factorial design used to model the compressive strenght of mortars containing recycled rubber. **Composite Strcutures***, v.92, 2010b, p. 2047-2051.

- COUTINHO JUNIOR, T. A.; CARVALHO, S. G.; ZANARDO, A. A influência do teor e granulometria de carbonatos na produção de revertimentos cerâmicos no polo cerâmico de Santa Gertrudes. **Revista Cerâmica Industrial**, v. 17, n. 3, p. 37-46, 2012.
- DAFALLA, M.A. *Effects of Clay and Moisture Content on Direct Shear Tests for Clay-Sand Mixtures*. **Advances in Materials Science and Engineering**, v.2013. 2013.
- DANIEL, D.E. *Clay Liners*. In: DANIEL, D. E. **Geotechnical Practice for Waste Disposal**. Chapman & Hall, Londres, 1993. p.137-163.
- DANIEL, D.E.; BENSON, C.H. *Water content-density criteria for compacted soil liners*. **Journal of Geotechnical Engineering**, v.116, n.12, 1990. p.1811-1830.
- DANIEL, D.E.; WU, Y.K. *Compacted clay liners and covers for arid sites*. **Journal of Geotechnical Engineering**, v. 119, n.2, 1993. p. 223 – 237.
- DANIEL, D.E.; KOERNER, R.M. **Waste containment facilities: guidance for construction, quality assurance and quality control of liner and cover system**. ASCE, New York, 1995. 354 p.
- DINGWEN, Z.; LIBIN, F.; SONGYU, L.; YONGFENG, D. *Experimental Investigation of Unconfined Compression Strength and Stiffness of Cement Treated Salt-Rich Clay*. **Marine Georesources & Geotechnology**, v. 31, n. 4, 2013, p. 360-374, DOI: 10.1080/1064119X.2012.690826
- ELKADY, T.Y.; SHAKER, A.A.; DHOWAIN, A.W. *Shear strengths and volume changes of sand–attapulgitic clay mixtures*. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, v.74, n.2, 2014. p.595- 609.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA-SPI, 2009. 412p.

_____. **Sistema De Gestão Territorial Da ABAG/RP**: Área de Estudo. Disponível em: < <http://www.abagrp.cnpem.embrapa.br/areas/geologia.htm>> Acesso em: 15 nov. 2011.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). **Lining of Waste Impoundment and Disposal Facilities**. Office of Solid Waste and Emergency Resources, Washington, 1983.

EVERETT, D, H. *Manual of Symbols and Terminology for Physicochemical Quantities and Units: Appendix II, Part I. Pure And Applied Chemistry*, v. 31, n. 4, 1972. p. 577-638

FAGUNDES, J. R. T. Estudo Integrado das Características Geológico-Geotécnicas com Vista à Avaliação de Recarga de Aquífero: Região de São Carlos-SP. **Tese** (Doutorado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010, 2v.

FAGUNDES, J. R. Y.; ZUQUETTE, L. V. *Sorption behavior of the sandy residual unconsolidated materials from the sandstones of the Botucatu Formation, the main aquifer of Brazil*. **Environmental Earth Sciences**, v.62, 2011. p.831–845. DOI 10.1007/s12665-010-0570-y.

FERNANDES, M. A. Estudo dos mecanismos de instabilização em um talude de solo arenoso não saturado localizado na região Centro-Oeste Paulista. **Tese** (Doutorado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

FETTER, C. W. **Contaminant Hydrogeology**. Upper Saddle River, Prentice Hall, 1999, 500p.

- FOLKES, D.J. *Control of contaminant migration by the use of liners. **Canadian Geotechnical Journal** (Fifth Canadian Geotechnical Colloquium), v.19, 1982. p.320-344.*
- FONSECA, A. V.; CONSOLI, N. C. *Strength Properties of Sandy Soil–Cement Admixtures. **Geotechnical and Geological Engineering**, v. 27, n. 6, 2009. p. 681–686. DOI 10.1007/s10706-009-9267-y*
- FREDLUND, D. G. & RAHARDJO, H. **Soil mechanics for unsaturated soils**. John Wiley & Sons Inc., New York, 1993. 517p.
- FREEZE, R. A.; CHERRY J. A. **Groundwater**. Englewood Cliffs, Prentice-Hall Inc, 1979. 604p.
- FREIRE, W. J. Tratamento Prévio do Solo com Aditivos Químicos e seu Efeito sobre a Qualidade do Solo-cimento. **Tese** (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1976. 142p.
- FREITAS, G. C. Análise da Potencialidade de uso de um Solo Siltoso para Utilização em Barreira Mineral de Aterros Sanitários no Estado de Roraima. **Dissertação** (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.
- GAO, X.K.; LOW, T.S.; LIU; Z.T.; CHEN, S.X. *Robust design for torque optimization using response surface methodology. **IEEE Transactions on Magnetics**, v.38, n.2, 2002.*
- GEORGE, K.P. *Shrinkage characteristics of soil-cement mixtures. **Highway research record**, n. 255, 1968. p.42-58.*
- GHAZI, A. F. *Engineering characteristics of compacted sandbentonite mixtures. **Dissertação** (Mestrado) School of Engineering - Faculty of Health, Engineering*

and Science, Edith Cowan University, 2015. 84p. Disponível em: <https://ro.ecu.edu.au/theses/1615>.

GILES, C.H.; SMITH, D.; HUITSON, A. *A general treatment and classification of the solute adsorption isotherm*. **Journal of Colloid Interface Science**, v.47, n.3, 1974.

GRIM, R. E. **Clay Mineralogy**. New York, McGraw-Hill Book Company, 1953. 384p.

GÜRSSES, A.; YALÇIN, M.; DOGAR, C. *Electrocoagulation of some reactive dyes: a statistical investigation of some electrochemical variables*. **Waste Management**, v.22, n.5, 2002. p.491-499.

HARE, L. B. *Mixture designs applied to food formulation*. **Food technology**, v. 28, p.50-56, 1974.

HAXO JR., H. E.; WHITE, R.; HAXO, P. D., FONG, M. A. *Liner materials exposed to municipal solid waste leachate*. **Waste Management & Research**, v.3, 1985. p.41-54.

HAXO JR., H. E.; HAXO, R. S.; NELSON, N. A.; HAXO, P. D.; WHITE, R. M. DAKESSIAN, S. *Liner materials exposed to toxic and hazardous wastes*. **Waste Management & Research**, v.4, 1986. p.247-264.

HEAD, K.H. **Manual of Soil Laboratory Testing**. v. 3. Pentech Press, London, 1986. 712 p.

HEINECK, K.S.; LEMOS, R.G.; LAUTENSCHLAGER, C.E.R.; CONSOLI, N.C. *Behavior of Vertical Hydraulic Barriers Composed by Sandy Soil, Bentonite and Cement Subjected to Alkaline Contaminants*. In: **GeoFlorida 2010: Advances in Analysis, Modeling & Design**, 2010. p. 2462-2471.

- HEINECK, K.S.; IBEIRO, L.; AZAMBUJA, R.M.B. Comportamento de Misturas de Solo-Bentonita e Solo-Cimento-Bentonita para a Aplicação em Barreiras de Contenção de Contaminantes. **Geotecnia**, n. 136, 2016. p. 95-112.
- HINKELMANN, K. KEMPTHORNE, O. ***Design and Analysis of Experiments: Volume 1 Introduction to Experimental Design***. 2nd ed. Hoboken, John Wiley & Sons, 2008. 631p.
- HINZ, C. *Description of sorption data with isotherm equations*. **Geoderma**, v. 99 , 2001. p. 225-243.
- HUNG, S. L., WEN, T. C., GOPALAN, A. *Application of statistical strategies to optimise the conductivity of electrosynthesized polypyrrole*. **Materials Letters**, v. 55, 2002.
- INGLES, O. G.; METCALF, J. B. ***Soil Stabilization***. New York, Halsted Press, 1972. 373p.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico - 2008**. Rio de Janeiro, IBGE, 2010.
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO – IPT. **Mapa Geológico do Estado de São Paulo Escala 1:500000**. São Paulo, IPT, 1981.
- KENNEY, T.C.; van VEEM, W.A.; SWALOOW, M.A.; SUNGAILA, M.A. *Hydraulic conductivity of compacted bentonite-sand mixtures*. **Canadian Geotechnical Journal**, v.29, 1992. p.3644-374.
- KLEPPE, J.H.; OLSON, R.E. *Desiccation Cracking of Soil Barriers*. In: JOHNSON, A. I.; FROBEL, R. K.; CAVALLI, N. J.; PETTERSSON, C. B. ***Hydraulic Barriers in Soil and Rock***. ASTM, Baltimore, 1985. 332p.

- KNOP, A. Estudo do comportamento de liners atacado por ácido sulfúrico. **Tese** (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007. 230p.
- KOOREVAAR, P.; MENELIK, G.; DIRKSEN, C. ***Elements of soil physics: Developments in Soil Science. Netherlands, Elsevier Science***, 1983. 228p.
- KORF, Comportamento hidráulico e mecânico de uma mistura de solo-cimento para a aplicação em barreiras de contenção de resíduos ácidos contendo chumbo e cádmio. **Tese** (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011. 143p.
- KUMAR, S.; DUTTA, R. K. *Unconfined Compressive Strength of Bentonite-Lime-Phosphogypsum Mixture Reinforced with Sisal Fibers. **Jordan Journal of Civil Engineering***, v. 8, n. 3, 2014. P.239-250.
- LAMBE, T.W. *The structure of compacted clay. **Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division***. v.84, n.2, 1958. p. 1654-1 – 1654-34.
- LAMBE, T.W.; WHITMAN, R. V. ***Soil Mechanics***. New York, John Wiley & Sons, 1979. 553p.
- LEIJ, F. J.; S. A. BRADFORD, ***3DADE: A computer program for evaluating three-dimensional equilibrium solute transport in porous media, Research Report No. 134, U. S. Salinity Laboratory, USDA, ARS, Riverside, CA***, 1994.
- LEIJ, F. J.; N. TORIDE, ***N3DADE: A computer program for evaluating nonequilibrium threedimensional equilibrium solute transport in porous media, Research Report No. 143, U. S. Salinity Laboratory, USDA, ARS, Riverside, CA***, 1997.
- LEITE, A. L. Difusão Molecular de K⁺ e Cl em Solos Naturais Compactados: Uma Perspectiva para Uso em Liners. **Dissertação** (Mestrado em Geotecnia) -

Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1997.

LEITE, A. L. Migração de Íons Inorgânicos em Alguns Solos Tropicais, com Ênfase nos Processos de Sorção e Difusão Molecular. **Tese** (Doutorado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.

LEITE, J. C. Estudos Laboratoriais de Percolação em Colunas de Misturas de Solos Lateríticos Compactadas: Equipamentos e Ensaio. **Tese** (Doutorado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

LEITE, J. C. ; PARAGUASSÚ, A.B.; ZUQUETTE, L.V. An equipment for percolation test in soil columns. In: International Congress on Environmental Geotechnics, 4 th, Lisboa, Portugal, **Anais..** v.1, 1998. p.211-215.

LEMOS, R.G. Estudo do comportamento hidráulico, mecânico e químico de barreiras hidráulicas verticais, compostas por solo residual, bentonita e cimento sob ação de substâncias agressivas. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006. 310p.

LOCH, F.C.; CORREIA, S.L.; SCHACKOW, A.; EFFTING, C.; GLEIZE, P.J.P. Desenvolvimento de material de construção nanoestruturado: Efeito da substituição parcial de cimento portland por nano-sílica em misturas de argamassas. In: Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais CBECiMat, 20., 2012, Joinville. **Anais...**, São Paulo, 2012. v. 1.

LOCH, F.C. Barreiras de Solos Estabilizados com Cal e Cimento para Proteção Ambiental. **Dissertação** (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

- LOCH, F.C.; PEJON, O.J. *Use of factorial design to model hydraulic conductivity of a sandy soil chemically stabilized with lime*. In: Congresso de Meio Ambiente Subterrâneo, 3., 2013, São Paulo. **Anais...**, São Paulo, ABAS, 2013, v. 1.
- LUKIENTCHUKI, J.A. Influência do teor de bentonita na condutividade hidráulica e na resistência ao cisalhamento de um solo arenoso utilizado como barreira impermeabilizante. **Dissertação** (Mestrado em Geotecnia). Escola de Engenharia de São Carlos. 2007.
- MACKENZIE, R. C. ***The Differential Thermal Investigation of Clays***. Londres, *Mineralogical Society*, 1957.
- MANASSERO, M.; VAN IMPE, W.F.; BOUAZZA, A. Waste Disposal and Containment. In: International Congress on Environmental Geotechnics, 2, 1996. Osaka, Japan. **Proceedings** ..., Balkema, Rotterdam, 1997, v.3. p. 1425-1474.
- MARTINS, L. A. Influência da adição de bentonita em misturas alternativas para a utilização em barreiras impermeabilizantes de aterros sanitários. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Espírito Santo, 2017. 107p.
- MCCALLISTER, L. D. *The effect of of leaching on lime treated expansive clays*. **Tese** - University of Texas at Arlington, Arlington, 1990. 417p.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais**. São Paulo, Pini, 1994. 573p.
- MESRI, G.; OLSON, R. E.; *Mechanisms controlling the permeability of clays*. **Clays and Clay Minerals**, v. 19, 1971. p. 151-158.
- MITCHELL, J. K. ***Fundamentals of soil behavior***. New York, John Wiley & Sons, 1976. 442p.

- MITCHELL, J. K.; HOOPER, D. R.; CAMPANELLA, R. G. *Permeability of compacted clay*. **Journal of Soil Mechanics and Foundation Division**. ASCE, v.91, n.4, 1965. p.41-65.
- MONTGOMERY, D. C. **Design and Analysis of Experiments**. 7 ed. Hoboken, John Wiley & Sons, 2009. 656p.
- MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Applied Statistics for Engineers**. 3 ed. New York, John Wiley & Sons, 2003. 656p.
- MONTGOMERY, D. C.; PECK, E. A.; VINING, G. G. **Introduction to Linear Regression Analysis**. 4 ed. New York, John Wiley & Sons, 2004a. 612p.
- MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C.; HUBELE, N.F. **Estatística Aplicada à Engenharia**. 2 ed. LTC – Livros Técnicos e Científicos, Rio de Janeiro, 2004b. 335p.
- MOORE, D. M.; REYNOLDS JR., R. C. **X-Ray Diffraction and the Identification and Analysis of Clay Minerals**. New York, Oxford University Press, 1989. 332p.
- MURO, M. D. Carta de zoneamento para seleção de áreas frente à instalação de aterros sanitários no município de São Carlos-SP Escala 1:50.000. **Dissertação** (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000. 2v.
- MUSSO, M. Transporte de solutos em barreiras de material argiloso compactado (CCL) e geocomposto bentonítico (GCL): fluxos diretos, acoplados e comportamento membrana. **Tese** (Doutorado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.
- MYERS, R. H.; MONTGOMERY, D. C.; ANDERSON-COOK, C. M. **Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments**, 3rd ed. Hoboken, John Wiley & Sons, 2009. 1247p.

- NELSON J. D.; MILLER, D. J. **Expansive Soils: Problems and Practice in Foundation and Pavement Engineering**, John Wiley and Sons Inc., New York, 1992. 259p.
- NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. **Pavimentação de Baixo Custo com Solos Lateríticos**. São Paulo: Ed. Vilibor, 1995, 240p.
- NOGUEIRA, J. B. **Mecânica dos Solos** – Ensaio de Laboratório. São Carlos, Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, 1995. 248p.
- OBENG, D.P.; MORELL, S.; NAPIER-MUNN, T.J. *Application of central composite rotatable design to modelling the effect of some operating variables on the performance of the three-product cyclone*. **International Journal of Mineral Processing**, v.76, n.3, 2005. p.181-192.
- OLIVEIRA, J. B.; PRADO, H. **Levantamento Pedológico Semidetalhado do Estado de São Paulo**: Quadricula de São Carlos. II: Memorial Descritivo. Instituto Agrônomo, Campinas, 1984. 188p.
- OMIDI, G.H.; THOMAS, J.C.; BROWN, K.W. *Effect of desiccation cracking on the hydraulic conductivity of a compacted clay liner*. **Water, Air and Soil Pollution**, v. 89, 1996.
- PAGANI, B. R. Estudo de Misturas Solo-Cimento-Bentonita-Fibra para Uso em Barreiras Verticais de Contenção de Contaminantes. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007. 116p.
- PAIVA NETO, J. E. De; CATANI, H. A.; KÜPPER, A.; PENNA MEDINA, H.; VERDADE, F. C.; GUTMANS, M.; NASCIMENTO, A. C. Observações gerais sobre os grandes tipos de solo do estado de São Paulo. **Bragantia**, Campinas, v. 11, n. 7-9, 1951.

- PEARLMAN, L. ***Subsurface Containment and Monitoring Systems: Barriers and Beyond***. Washington, EUA: U.S. Environmental Protection Agency, 1999. 61p.
- PEJON, O. J. Mapeamento Geotécnico Regional da Folha de Piracicaba-SP (escala 1:100.000): Estudo de Aspectos Metodológicos, de Caracterização e de Apresentação de Atributos. **Tese** (Doutorado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1992, 2v.
- PICANÇO, M. S.; ANGÉLICA, R. S.; BARATA, M. S. Cimentos Portland aditivados com arenito zeolítico com propriedades pozolânicas. **Revista Matéria**, 2014. p. 68-80
- PINTO, C.S. **Curso básico de Mecânica dos Solos em 16 aulas**. São Paulo, Oficina de Textos, 2002. p.105.
- PORBAHA, A.; TANAKA, H.; KOBAYASHI, M. *State of the art in deep mixing technology: part II. Applications*. **Proceedings of the ICE - Ground Improvement**, vol. 2, n. 3, 1998. p.125 –139.
- PRUSINSKI, J. R.; BHATTACHARJA, S. *Effectiveness of Portland Cement and Lime in Stabilizing Clay Soils*. **Journal of the Transportation Research Board**, Washington, v. 1652, 1999.
- QUIGLEY, R. M.; FERNANDEZ, F.; YANFUL, E.; HELGASON, T.; MARGARITIS, A.; WHITBY, J. L. *Hidraulic Conduivity of contaminated natural clay directly below a domestic landfill*. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 24. 1987. p. 377-383.
- RAMÍREZ, J.; GUTIERREZ, H.; GSCHAEDLER, A. *Optimization of astaxanthin production by Phaffia rhodozyma through factorial design and response surface methodology*. **Journal of Biotechnology**, v.88, n.3, 2001.

- RIBEIRO, R. A. V. Avaliação do desempenho hidráulico de barreiras de proteção ambiental produzidas com solo laterítico arenoso compactado, estabilizado quimicamente. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Ilha Solteira, 2002.
- RIZZO, R. P. Avaliação da eficácia de barreiras de proteção ambiental produzidas com solo arenoso estabilizado quimicamente. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Ilha Solteira, 2004.
- RIZZO, R. P.; LOLLO, J. A. Capacidade de retenção de barreiras de proteção produzidas com solo arenoso estabilizado quimicamente. **Eng. Sanitária e Ambiental**, v.11, n.3, 2006. p.250-259.
- ROY, W.R.; KRAPAC, I.G.; CHOU, S.F.J.; GRIFFIN, R.A. **Batch-type procedures for estimating soil adsorption of chemicals**. Cincinnati, *Technical Resource Document*, EPA/530-SW-87-006-F, 1992.
- ROWE, R. K. *Barrier Systems*. In: **Geotechnical and geoenvironmental engineering handbook**. Ontario, Kluwer academic publishers, 2000. p.739-788.
- ROWE, R. K.; QUIGLEY, R. M.; BRACHMAN, R. W. I.; BOOKER, J. R. **Barrier Systems for Waste Disposal Facilities**. New York, *Spon Press*, 2.ed., 2004. 587p.
- SAAE – SERVIÇO AUTÔNOMO DE ÁGUA E ESGOTO. **Qualidade da água mensal**. Disponível em: <<http://www.saaesaocarlos.com.br/index.php/qualidade-da-agua>> Acesso em: 30 out. 2013.
- SACHETTI, A. S.; CORTE, M. B.; RABASSA, C. M.; FESTUGATO, L.; CONSOLI, N. C. Resistência à Compressão Simples de um Solo Artificialmente Cimentado Reforçado com Fibras de Vidro. In: V Seminário de Engenharia Geotécnica do

Rio Grande do Sul - GeoRS'2009, 2009, Pelotas. **Anais ...** São Paulo, ABMS, 2009, v.1

SAHA, P.; DATTA, S.; SANYAL, S.K. *Hazardous waste pollution using clay with admixtures*. **Clean**, v.36, n.2, 2008. p.230-238.

SANTOS, P. S. **Ciência e tecnologia de argilas**. 2 ed. rev. São Paulo, Editora Edgard Blücher, 1989. 1v.

SCHINCARIOL, R. A.; ROWE, R. K. *Contaminant Hydrogeology* In: ROWE, R. K. **Geotechnical and Geoenvironmental Engineering Book**. Boston, Kluwer Academic Publishers, 2000. p.711-738.

SEGANTINI, A. A. S. Utilização de Solo-cimento em Estacas Apiloadas para Obras de Pequeno Porte. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1994, 96p.

SEGANTINI, A. A. S. Utilização de Solo-Cimento em Estacas Escavadas com Trado em Ilha Solteira-SP. **Tese** (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2000, 176p.

SHACKELFORD, C.D. *Contaminant Transport*. In: DANIEL, D. E. **Geotechnical Practice for Waste Disposal**. Chapman & Hall, Londres, 1993. p.33-65.

SHACKELFORD, C.D. *Critical concepts for column testing*. **Journal of Geotechnical Engineering**, v. 120, 1994. p.1804-1828.

SHACKELFORD, C.D. *Cumulative mass approach for column testing*. **Journal of Geotechnical Engineering**, v. 121, 1995. p.696-703.

SHARMA, H. D.; LEWIS, P. E. **Waste Containment Systems, Waste Stabilization, and Landfills: Design and Evaluation**. New York, John Wiley & Sons Inc., 1994. 588p.

SILVA, D. P. Influência da contaminação por cloreto de cobre na resistência ao cisalhamento de solos utilizados em liners. **Dissertação** (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos– Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

SILVA, C. F. Estudo do comportamento hidráulico de mistura solo-bentonita visando alternativa de emprego como sistema de proteção para aterros sanitários. **Dissertação** (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos– Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

SILVEIRA, A. **Estabilização de Solos com Cimento**. Publicação nº 128 – Síntese de Notas de Aula – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1966.

SILVEIRA, E. B. S. **Estabilização do Solo**. Publicação nº 129 – Notas de Aula – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 196?.

ŠIMŮNEK, J.; KÖHNE, J.N.; KODEŠOVÁ, R.; ŠEJNA, M. *Simulating non equilibrium movement of water, solutes and particles using HYDRUS – A review of recent applications*. **Soil and Water Resources**, Athens, v. 3, (Special Edition 1), 2008. p. 42-51.

SKEMPTON, A. W. *Long-term stability of clay slopes*. **Geotechnique**, v.14, n.2, 1964. p. 77-102.

SKEMPTON, A. W. *Residual strength of clay in landslides, folded strata and the laboratory*. **Geotechnique**, v.35, n.1, 1985. p.3-18.

- SOARES, V. Utilização de mistura de solo saprolítico com bentonita na construção de revestimento de fundo de aterros. **Dissertação** (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012. 105p.
- SOUZA, G. T. (Coord.) **Glossário de Termos Hidrológicos**. Brasília, Comissão Brasileira para o Decênio Hidrológico Internacional, 1976, 291p.
- SOUZA, R. F. A. Migração de Poluentes Inorgânicos em Liners Compostos. **Dissertação** (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos– Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009. 124p.
- STANCATI, G. Estudo experimental do comportamento tensão-deformação de uma argila adensada unidirecionalmente. **Tese** (Doutorado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1991. 244 p.
- STATSOFT. **Statistica 11**. [S. l.], 2012.
- TCHOBANOGLIOUS, G.; THEISEN, H.; VIGIL, S. **Integrated Solid Waste Management Engineering Principles and Management Issues**. New York, McGraw-Hill Inc., 1993. 978p.
- THOMÉ, A.; DONATO, M.; CONSOLI, N. C.; GRAHAM, J. *Circular footings on a cemented layer above weak foundation soil*. **Canadian Geotechnical Journal**, v.42, 2005. p.1569-1584.
- TRANSPORTATION RESEARCH BOARD – TRB. *State of the art – Lime Stabilization: Reactions, Properties, Design, Construction*. Circular nº 180, 1976. 31p.
- van GENUCHTEN, M. T. **Determining Transport Parameters From Solute Displacement Experiments**. Research Report No. 118, U. S. Salinity Laboratory, USDA, ARS, Riverside, CA, 1980. 37p.

- van GENUCHTEN, M. Th. *Analytical solutions for chemical transport with simultaneous adsorption, zero order production and first order decay.* **Journal of Hydrology** (Amsterdam), v. 49, p. 213-233, 1981.
- van GENUCHTEN, M. Th., *Convective-dispersive transport of solutes involved in sequential first-order decay reactions,* **Computers & Geosciences**, v.11, n.2, p. 129-147, 1985.
- van GENUCHTEN, M. Th.; WIERENGA, P. J. *Solute dispersion coefficients and retardation factors. In: Methods of soil analysis, Part 1. Madison: American Society of Agronomy - Soil Science Society of America*, 1986. p.1025-1054
- VARGAS, M. **Introdução à Mecânica dos Solos.** São Paulo, McGraw-Hill, 1977. 510p.
- VISUDMEDANUKUL, P.; KAMON, M.; KATSUMI, T. *Chloride Transport through Cement-Bentonite Barriers.* **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 133, n. 2, 2007. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2007)133:2(175).
- VITALI, O. P. M. Efeito da Composição de Misturas de Solo-Cimento nos Parâmetros de Rigidez e de Resistência. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2008. 152p.
- WANG, Q.; CUI, Y.; TANG, A.M.; BARNICHON, J.D.; SABA, S.; YE, W.M. *Hydraulic conductivity and microstructure changes of compacted bentonite/sand mixture during hydration.* **Engineering Geology**, v.164, 2013. p. 67–76
- WATABE, Y.; YAMADA, K.; SAITOH, K. Hydraulic conductivity and compressibility of mixtures of Nagoya clay with sand or bentonite. **Géotechnique**, v.61, n.3, 2011. p. 211-219.

- WIERENGA, P.J. van GENUCHTEN, M.Th. *Solute transport through small and large unsaturated soil cloumns*. **Ground Water**, Westerville, v. 27, n. 1,1989. p. 35-42.
- WILSON, M. J. ***A Handbook of Determinative Methods in Clay Mineralogy***. New York, Blakie & Son Limited, 1987. 308p.
- WISE, W. R. *Effects of laboratory scale variability upon batch and column determinations of nonlinearly sorption behavior in porous media*. **Water Resources Research**, v.29, 1993. p. 2983-2992.
- WOLFRAN. **Wolfran Mathematica 9**. 2013.
- ZHANG, X.; WANG, R. YANG, X. YU, J. *Central composite experimental design applied to the catalytic aromatization of isophorone to 3,5-xyleneol*. **Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems**, v.89, 2007. p.45-50.
- ZUQUETTE, L. V.; SILVA Jr, E. M.; GARCIA, A. Aspectos de sorção para os materiais inconsolidados da região de São Carlos (SP), Brasil. **Revista Escola de Minas**, v.61, n.2, 2008. p.219-230.

APÊNDICE A
DADOS DOS ENSAIOS DE COLUNA

Dados do ensaio de percolação em coluna da mistura SCA-01.

Fonte: Do autor.

Dados do ensaio de percolação em coluna da mistura SCA-02.

Fonte: Do autor.

Dados do ensaio de percolação em coluna da mistura SCA-03.

(a) Curva pH vs. volume de poros

(b) Curva CE (mS) vs. volume de poros

(c) Curva de chegada K^+

(d) Curva de chegada Cl^-

Fonte: Do autor.

Dados do ensaio de percolação em coluna da mistura SCA-04.

(a) Curva pH vs. volume de poros

(b) Curva CE (mS) vs. volume de poros

(c) Curva de chegada K^+

(d) Curva de chegada Cl^-

Fonte: Do autor.

Dados do ensaio de percolação em coluna da mistura SCA-05.

Fonte: Do autor.

Dados do ensaio de percolação em coluna da mistura SCA-06.

Fonte: Do autor.

Dados do ensaio de percolação em coluna da mistura SCA-07.

Fonte: Do autor.

Dados do ensaio de percolação em coluna da mistura SCA-08.

Fonte: Do autor.

Dados do ensaio de percolação em coluna da mistura SCA-09.

Fonte: Do autor.

Dados do ensaio de percolação em coluna da mistura SCA-10.

Fonte: Do autor.

Dados do ensaio de percolação em coluna da mistura SCA-11.

(a) Curva pH vs. volume de poros

(b) Curva CE (mS) vs. volume de poros

(c) Curva de chegada K⁺

(d) Curva de chegada Cl⁻

Fonte: Do autor.

Dados do ensaio de percolação em coluna da mistura SCA-12.

(a) Curva pH vs. volume de poros

(b) Curva CE (mS) vs. volume de poros

(c) Curva de chegada K⁺

(d) Curva de chegada Cl⁻

Fonte: Do autor.

Dados do ensaio de percolação em coluna da mistura SCA-13.

Fonte: Do autor.

Dados do ensaio de percolação em coluna da mistura SCA-14.

Fonte: Do autor.

Dados do ensaio de percolação em coluna da mistura SCA-15.

Fonte: Do autor.

Dados do ensaio de percolação em coluna da mistura SCA-16.

Fonte: Do autor.

Probabilidade Normal dos Resíduos de $\ln(R_d)$ das misturas SCA.

Fonte: Do autor.

Resíduos versus Valores Previstos de $\ln(R_d)$ das misturas SCA.

Fonte: Do autor.

APÊNDICE B
DADOS DOS ENSAIOS DE EQUILÍBRIO EM LOTE

Ajustes das isotermas da mistura BOT: (a) linear, (b) Freundlich, (c) Langmuir I e (d) Langmuir II.

Fonte: Do autor.

Ajustes das isotermas da mistura BEN: (a) linear, (b) Freundlich, (c) Langmuir I e (d) Langmuir II.

Fonte: Do autor.

Ajustes das isotermas da mistura SCA-01: (a) linear, (b) Freundlich, (c) Langmuir I e (d) Langmuir II.

Fonte: Do autor.

Ajustes das isotermas da mistura SCA-02: (a) linear, (b) Freundlich, (c) Langmuir I e (d) Langmuir II.

Do autor.

Fonte:

Ajustes das isotermas da mistura SCA-03: (a) linear, (b) Freundlich, (c) Langmuir I e (d) Langmuir II.

Fonte: Do autor.

Ajustes das isotermas da mistura SCA-04: (a) linear, (b) Freundlich, (c) Langmuir I e (d) Langmuir II.

Fonte: Do autor.

Ajustes das isotermas da mistura SCA-05: (a) linear, (b) Freundlich, (c) Langmuir I e (d) Langmuir II.

Fonte: Do autor.

Ajustes das isotermas da mistura SCA-06: (a) linear, (b) Freundlich, (c) Langmuir I e (d) Langmuir II.

Fonte: Do autor.

Ajustes das isotermas da mistura SCA-07: (a) linear, (b) Freundlich, (c) Langmuir I e (d) Langmuir II.

Fonte: Do autor.

Ajustes das isotermas da mistura SCA-08: (a) linear, (b) Freundlich, (c) Langmuir I e (d) Langmuir II.

Fonte: Do autor.

Ajustes das isotermas da mistura SCA-09: (a) linear, (b) Freundlich, (c) Langmuir I e (d) Langmuir II.

Fonte: Do autor.

Ajustes das isotermas da mistura SCA-10: (a) linear, (b) Freundlich, (c) Langmuir I e (d) Langmuir II.

Fonte: Do autor.

Ajustes das isotermas da mistura SCA-11: (a) linear, (b) Freundlich, (c) Langmuir I e (d) Langmuir II.

Fonte: Do autor.

Ajustes das isotermas da mistura SCA-12: (a) linear, (b) Freundlich, (c) Langmuir I e (d) Langmuir II.

Fonte: Do autor.

Ajustes das isotermas da mistura SCA-13: (a) linear, (b) Freundlich, (c) Langmuir I e (d) Langmuir II.

Fonte: Do autor.

das isotermas da mistura SCA-14: (a) linear, (b) Freundlich, (c) Langmuir I e (d) Langmuir II.

Fonte: Do autor.

Ajustes das isotermas da mistura SCA-15: (a) linear, (b) Freundlich, (c) Langmuir I e (d) Langmuir II.

Fonte: Do autor.

Ajustes das isotermas da mistura SCA-16: (a) linear, (b) Freundlich, (c) Langmuir I e (d) Langmuir II.

Fonte: Do autor.

Ajustes das isotermas da mistura SCA-17: (a) linear, (b) Freundlich, (c) Langmuir I e (d) Langmuir II.

Fonte: Do autor.

Ajustes das isotermas da mistura SCA-18: (a) linear, (b) Freundlich, (c) Langmuir I e (d) Langmuir II.

Fonte: Do autor.

Probabilidade Normal dos Resíduos (Rd), ajuste linear, das misturas SCA.

Fonte: Do autor.

Resíduos versus Valores Previstos (Rd), ajuste linear, das misturas SCA.

Fonte: Do autor.

Probabilidade Normal dos Resíduos (Rd), modelo de Freundlich, das misturas SCA.

Fonte: Do autor.

Resíduos versus Valores Previstos (Rd), modelo de Freundlich, das misturas SCA.

Fonte: Do autor.

APÊNDICE C
DADOS DOS ENSAIOS DE CTC

I. MISTURAS SOLO-CIMENTO-ARGILA

Probabilidade Normal dos Resíduos (CTC) das misturas SCA.

Fonte: Do autor.

Resíduos versus Valores Previstos CTC das misturas SCA.

Fonte: Do autor.

II. MISTURAS SOLO-CIMENTO

Probabilidade Normal dos Resíduos (CTC) das misturas SC (Fatorial 3²).

Fonte: Do autor.

Resíduos versus Valores Previstos CTC das misturas SC (Fatorial 3²).

Fonte: Do autor.

III. MISTURAS SOLO-ARGILA

a. Fatorial 3²

Probabilidade Normal dos Resíduos (CTC) das misturas SA (Fatorial 3²).

Fonte: Do autor.

Resíduos versus Valores Previstos CTC das misturas SA (Fatorial 3²).

Fonte: Do autor.

a. Fatorial 2² composto

Probabilidade Normal dos Resíduos (CTC) das misturas SA (Fatorial 3²).

Fonte: Do autor.

Resíduos versus Valores Previstos CTC das misturas SA (Fatorial 3²).

Fonte: Do autor.

APÊNDICE D
DADOS DOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

I. MISTURAS SOLO-CIMENTO

b. Fatorial 3^2

Probabilidade Normal dos Resíduos $RC7_{SC3}$ (Fatorial 3^2).

Fonte: Do autor.

Resíduos versus Valores Previstos $RC7_{SC3}$ (Fatorial 3^2).

Fonte: Do autor.

Probabilidade Normal dos Resíduos RC28_{SC3} (Fatorial 3²).

Fonte: Do autor.

Resíduos versus Valores Previstos RC28_{SC3} (Fatorial 3²).

Fonte: Do autor.

c. Fatorial 2² composto

Probabilidade Normal dos Resíduos RC7_{SC2} (Fatorial 2² composto).

Fonte: Do autor.

Resíduos versus Valores Previstos RC7_{SC2} (Fatorial 2² composto).

Fonte: Do autor.

Probabilidade Normal dos Resíduos RC28_{SC2} (Fatorial 2² composto).

Fonte: Do autor

Resíduos versus Valores Previstos RC28_{SC2} (Fatorial 2² composto).

Fonte: Do autor.

II. MISTURAS SOLO-ARGILA

Fonte: Do autor.

Fonte: Do autor.

APÊNDICE E
DADOS DOS ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO

I. MISTURAS SOLO-CIMENTO-ARGILA

a. Dados dos ensaios após 7 dias de cura

Curva tensão cisalhante vs. deformação específica e envoltória de resistência da mistura SCA-01, após 7 dias de cura.

Fonte: Do autor.

Curva tensão cisalhante vs. deformação específica e envoltória de resistência da mistura SCA-02, após 7 dias de cura.

Fonte: Do autor.

Curva tensão cisalhante vs. deformação específica e envoltória de resistência da mistura SCA-03, após 7 dias de cura.

Fonte: Do autor.

Curva tensão cisalhante vs. deformação específica e envoltória de resistência da mistura SCA-04, após 7 dias de cura.

Fonte: Do autor.

Curva tensão cisalhante vs. deformação específica e envoltória de resistência da mistura SCA-05, após 7 dias de cura.

Fonte: Do autor.

Curva tensão cisalhante vs. deformação específica e envoltória de resistência da mistura SCA-06, após 7 dias de cura.

Fonte: Do autor.

Curva tensão cisalhante vs. deformação específica e envoltória de resistência da mistura SCA-07, após 7 dias de cura.

Fonte: Do autor.

Curva tensão cisalhante vs. deformação específica e envoltória de resistência da mistura SCA-08, após 7 dias de cura.

Fonte: Do autor.

Curva tensão cisalhante vs. deformação específica e envoltória de resistência da mistura SCA-09, após 7 dias de cura.

Fonte: Do autor.

Curva tensão cisalhante vs. deformação específica e envoltória de resistência da mistura SCA-10, após 7 dias de cura.

Fonte: Do autor.

Curva tensão cisalhante vs. deformação específica e envoltória de resistência da mistura SCA-11, após 7 dias de cura.

Fonte: Do autor.

Curva tensão cisalhante vs. deformação específica e envoltória de resistência da mistura SCA-12, após 7 dias de cura.

Fonte: Do autor.

Curva tensão cisalhante vs. deformação específica e envoltória de resistência da mistura SCA-13, após 7 dias de cura.

Fonte: Do autor.

Curva tensão cisalhante vs. deformação específica e envoltória de resistência da mistura SCA-14, após 7 dias de cura.

Fonte: Do autor.

Curva tensão cisalhante vs. deformação específica e envoltória de resistência da mistura SCA-15, após 7 dias de cura.

Fonte: Do autor.

Curva tensão cisalhante vs. deformação específica e envoltória de resistência da mistura SCA-16, após 7 dias de cura.

Fonte: Do autor.

Probabilidade Normal dos Resíduos dos valores de coesão (kPa) para as misturas SCA, após 7 dias de cura.

Fonte: Do autor.

Resíduos vs. valores previstos de coesão (kPa) para as misturas SCA, após 7 dias de cura.

Fonte: Do autor.

Probabilidade Normal dos Resíduos dos valores de tensão ao cisalhamento máxima (kPa) para as misturas SCA, após 7 dias de cura .

Fonte: Do autor.

Resíduos vs. valores previstos de tensão ao cisalhamento máxima (kPa) para as misturas SCA, após 7 dias de cura .

Fonte: Do autor.

b. Dados dos ensaios após 28 dias de cura

Curva tensão cisalhante vs. deformação específica e envoltória de resistência da mistura SCA-01, para 28 dias de cura.

Fonte: Do autor.

Curva tensão cisalhante vs. deformação específica e envoltória de resistência da mistura SCA-02, para 28 dias de cura.

Fonte: Do autor.

Curva tensão cisalhante vs. deformação específica e envoltória de resistência da mistura SCA-03, para 28 dias de cura.

Fonte: Do autor.

Curva tensão cisalhante vs. deformação específica e envoltória de resistência da mistura SCA-04, para 28 dias de cura.

Fonte: Do autor.

Curva tensão cisalhante vs. deformação específica e envoltória de resistência da mistura SCA-05, para 28 dias de cura.

Fonte: Do autor.

Curva tensão cisalhante vs. deformação específica e envoltória de resistência da mistura SCA-06, para 28 dias de cura.

Fonte: Do autor.

Curva tensão cisalhante vs. deformação específica e envoltória de resistência da mistura SCA-07, para 28 dias de cura.

Fonte: Do autor.

Curva tensão cisalhante vs. deformação específica e envoltória de resistência da mistura SCA-08, para 28 dias de cura.

Fonte: Do autor.

Curva tensão cisalhante vs. deformação específica e envoltória de resistência da mistura SCA-09, para 28 dias de cura.

Fonte: Do autor.

Curva tensão cisalhante vs. deformação específica e envoltória de resistência da mistura SCA-10, para 28 dias de cura.

Fonte: Do autor.

Curva tensão cisalhante vs. deformação específica e envoltória de resistência da mistura SCA-11, para 28 dias de cura.

Fonte: Do autor.

Curva tensão cisalhante vs. deformação específica e envoltória de resistência da mistura SCA-12, para 28 dias de cura.

Fonte: Do autor.

Curva tensão cisalhante vs. deformação específica e envoltória de resistência da mistura SCA-13, para 28 dias de cura.

Fonte: Do autor.

Curva tensão cisalhante vs. deformação específica e envoltória de resistência da mistura SCA-14, para 28 dias de cura.

Fonte: Do autor.

Curva tensão cisalhante vs. deformação específica e envoltória de resistência da mistura SCA-15, para 28 dias de cura.

Fonte: Do autor.

Curva tensão cisalhante vs. deformação específica e envoltória de resistência da mistura SCA-16, para 28 dias de cura.

Fonte: Do autor.

Probabilidade Normal dos Resíduos dos valores de coesão (kPa) para as misturas SCA, após 28 dias de cura.

Fonte: Do autor.

Resíduos vs. valores previstos de coesão (kPa) para as misturas SCA, após 28 dias de cura.

Fonte: Do autor.

Probabilidade Normal dos Resíduos dos valores de ângulo de atrito (°) para as misturas SCA, após 28 dias de cura.

Fonte: Do autor.

Resíduos vs. valores previstos de ângulo de atrito (°) para as misturas SCA, após 28 dias de cura.

Fonte: Do autor.

II. MISTURAS SOLO-CIMENTO

a. Dados dos ensaios após 7 dias de cura

Curva tensão cisalhante vs. deformação específica e envoltória de resistência da mistura SC-301, após 7 dias de cura.

Fonte: Do autor.

Curva tensão cisalhante vs. deformação específica e envoltória de resistência da mistura SC-302, após 7 dias de cura.

Fonte: Do autor.

Curva tensão cisalhante vs. deformação específica e envoltória de resistência da mistura SC-303, após 7 dias de cura.

Fonte: Do autor.

Curva tensão cisalhante vs. deformação específica e envoltória de resistência da mistura SC-304, após 7 dias de cura.

Fonte: Do autor.

Curva tensão cisalhante vs. deformação específica e envoltória de resistência da mistura SC-305, após 7 dias de cura.

Fonte: Do autor.

Curva tensão cisalhante vs. deformação específica e envoltória de resistência da mistura SC-306, após sete dias de cura.

Fonte: Do autor.

Curva tensão cisalhante vs. deformação específica e envoltória de resistência da mistura SC-307, após 7 dias de cura.

Fonte: Do autor.

Curva tensão cisalhante vs. deformação específica e envoltória de resistência da mistura SC-308, após 7 dias de cura.

Fonte: Do autor.

Curva tensão cisalhante vs. deformação específica e envoltória de resistência da mistura SC-309, após 7 dias de cura.

Fonte: Do autor.

Curva tensão cisalhante vs. deformação específica e envoltória de resistência da mistura SC-310, após 7 dias de cura.

Fonte: Do autor.

Curva tensão cisalhante vs. deformação específica e envoltória de resistência da mistura SC-311, após 7 dias de cura.

Fonte: Do autor.

Probabilidade Normal dos Resíduos dos valores de coesão (kPa) para as misturas SC, após 7 dias de cura.

Fonte: Do autor.

Resíduos vs. valores previstos de coesão (kPa) para as misturas SC, após 7 dias.

Fonte: Do autor.

Probabilidade Normal dos Resíduos dos valores de ângulo de atrito ($^{\circ}$) para as misturas SC, após 7 dias de cura.

Fonte: Do autor.

Resíduos vs. valores previstos de ângulo de atrito (°) para as misturas SC, após 7 dias.

Fonte: Do autor.

b. Dados dos ensaios após 28 dias de cura

Curva tensão cisalhante vs. deformação específica e envoltória de resistência da mistura SC-301, após 28 dias de cura.

Fonte: Do autor.

Curva tensão cisalhante vs. deformação específica e envoltória de resistência da mistura SC-302, após 28 dias de cura.

Fonte: Do autor.

Curva tensão cisalhante vs. deformação específica e envoltória de resistência da mistura SC-303, após 28 dias de cura.

Fonte: Do autor.

Curva tensão cisalhante vs. deformação específica e envoltória de resistência da mistura SC-304, após 28 dias de cura.

Fonte: Do autor.

Curva tensão cisalhante vs. deformação específica e envoltória de resistência da mistura SC-305, após 28 dias de cura.

Fonte: Do autor.

Curva tensão cisalhante vs. deformação específica e envoltória de resistência da mistura SC-306, após 28 dias de cura.

Fonte: Do autor.

Curva tensão cisalhante vs. deformação específica e envoltória de resistência da mistura SC-307, após 28 dias de cura.

Fonte: Do autor.

Curva tensão cisalhante vs. deformação específica e envoltória de resistência da mistura SC-308, após 28 dias de cura.

Fonte: Do autor.

Curva tensão cisalhante vs. deformação específica e envoltória de resistência da mistura SC-309, após 28 dias de cura.

Fonte: Do autor.

Curva tensão cisalhante vs. deformação específica e envoltória de resistência da mistura SC-310, após 28 dias de cura.

Fonte: Do autor.

Curva tensão cisalhante vs. deformação específica e envoltória de resistência da mistura SC-311, após 28 dias de cura.

Fonte: Do autor.

Probabilidade Normal dos Resíduos dos valores de coesão (kPa) para as misturas SC, após 28 dias de cura.

Fonte: Do autor.

Resíduos vs. valores previstos de coesão (kPa) para as misturas SC, após 28 dias.

Fonte: Do autor.

Probabilidade Normal dos Resíduos dos valores de ângulo de atrito ($^{\circ}$) para as misturas SC, após 28 dias de cura.

Fonte: Do autor.

Resíduos vs. valores previstos de ângulo de atrito ($^{\circ}$) para as misturas SC, após 28 dias.

Fonte: Do autor.

III. MISTURAS SOLO-ARGILA

Curva tensão cisalhante vs. deformação específica e envoltória de resistência da mistura SA-301.

Fonte: Do autor.

Curva tensão cisalhante vs. deformação específica e envoltória de resistência da mistura SA-302.

Fonte: Do autor.

Curva tensão cisalhante vs. deformação específica e envoltória de resistência da mistura SA-303.

Fonte: Do autor.

Curva tensão cisalhante vs. deformação específica e envoltória de resistência da mistura SA-304.

Fonte: Do autor.

Curva tensão cisalhante vs. deformação específica e envoltória de resistência da mistura SA-305.

Fonte: Do autor.

Curva tensão cisalhante vs. deformação específica e envoltória de resistência da mistura SA-306.

Fonte: Do autor.

Curva tensão cisalhante vs. deformação específica e envoltória de resistência da mistura SA-307.

Fonte: Do autor.

Curva tensão cisalhante vs. deformação específica e envoltória de resistência da mistura SA-308.

Fonte: Do autor.

Curva tensão cisalhante vs. deformação específica e envoltória de resistência da mistura SA-309.

Fonte: Do autor.

Curva tensão cisalhante vs. deformação específica e envoltória de resistência da mistura SA-310.

Fonte: Do autor.

Curva tensão cisalhante vs. deformação específica e envoltória de resistência da mistura SA-311.

Fonte: Do autor.

Probabilidade Normal dos Resíduos dos valores de coesão (kPa) para as misturas SA.

Fonte: Do autor.

Resíduos vs. valores previstos de coesão (kPa) para as misturas SA.

Fonte: Do autor.

Probabilidade Normal dos Resíduos dos valores de ângulo de atrito ($^{\circ}$) para as misturas SA.

Fonte: Do autor.

Resíduos vs. valores previstos de ângulo de atrito (°) para as misturas SA.

Fonte: Do autor.

APÊNDICE F
DADOS DOS ENSAIOS DE EXPANSÃO

I. MISTURAS SOLO-CIMENTO-ARGILA

Resultados de IE em função do tempo para misturas SCA

Fonte: Do autor.

Fonte: Do autor.

Fonte: Do autor.

II. MISTURAS SOLO-CIMENTO

Resultados de IE em função do tempo para misturas SC

Fonte: Do autor.

III. MISTURAS SOLO-ARGILA

Fonte: Do autor.

Probabilidade normal dos resíduos do modelo IE_{SA}. (Fatorial 3²).

Fonte: Do autor.

Resíduos vs. valores previstos de IE para as misturas solo-argila (Fatorial 3²).

Fonte: Do autor.

APÊNDICE G
DADOS DOS ENSAIOS DE CONTRAÇÃO

I. MISTURAS SOLO-CIMENTO-ARGILA

Probabilidade normal dos resíduos do modelo CO para misturas SCA.

Fonte: Do autor.

Resíduos vs. valores previstos de CO para as misturas SCA.

Fonte: Do autor.

II. MISTURAS SOLO-CIMENTO

Probabilidade normal dos resíduos do modelo CO para misturas SC, após 7 dias de cura (Fatorial 3^2).

Fonte: Do autor.

Resíduos vs. valores previstos de CO para as misturas SC, após 7 dias de cura (Fatorial 3^2).

Fonte: Do autor.

Probabilidade normal dos resíduos do modelo CO para misturas SC, após 28 dias de cura (Fatorial 3^2).

Fonte: Do autor.

Resíduos vs. valores previstos de CO para as misturas SC, após 7 dias de cura (Fatorial 3^2).

Fonte: Do autor.

III. MISTURAS SOLO-ARGILA

Probabilidade normal dos resíduos do modelo CO para misturas SA.

Fonte: Do autor.

Resíduos vs. valores previstos de CO para as misturas SA.

Fonte: Do autor.