Serviço de Pós-Graduação EESC/USP

EXEMPLAR REVISADO

Data de entrada no Serviço: 08 / 05 / 01

Ass.: Guilherme

ESTUDO DO FENÔMENO DE EXPANSÃO DOS
SEDIMENTOS DA FORMAÇÃO LIBERTAD
(QUATERNÁRIO): METODOLOGIA DE
AVALIAÇÃO E MAPEAMENTO NA REGIÃO DE
MONTEVIDÉU –URUGUAI

Marcos Andrés Musso Laespiga

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Geotecnia.

DEDALUS - Acervo - EESC

31100017389

ORIENTADOR: Prof. Dr. Osni José Pejon

São Carlos
2001

FOLHA DE APROVAÇÃO

Candidato: Licenciado **MARCOS ANDRÉS MUSSO LAESPIGA**

Dissertação defendida e aprovada em 17-04-2001
pela Comissão Julgadora:

Prof. Doutor **OSNI JOSÉ PELION (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)

Prof. Titular **ANTENOR BRAGA PARAGUASSU**
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)

Prof. Doutor **SÉRGIO ANTONIO RÖHM**
(UFSCar - Universidade Federal de São Carlos)

JOSÉ CARLOS A. CINTRA
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia
Presidente da Comissão de Pós-Graduação da EESC

Joaquín Torres García

A Cecilia por ser "...mi amor, mi cómplice y todo, y en la calle, codo a codo, somos mucho más que dos..."

Mario Benedetti

AGRADECIMENTOS

À CAPES e ao Departamento de Geotecnia da Escola de Engenharia de São Carlos, USP, pela concessão da bolsa de estudo

À Facultad de Ciencias da Universidad de la República Oriental del Uruguay por permitir-me o afastamento das tarefas docentes e o apoio nos trabalhos de campo.

Aos Profs. Benjamín Nahoum e Hector Goso do Departamento de Geotecnia da Facultad de Ingenieria de Universidad de la República Oriental del Uruguay, por permitir o uso dos materiais de amostragem e dos equipamentos para os ensaios de expansão. Também pelas sugestões, conselhos e críticas que contribuíram ao enriquecimento do trabalho.

Aos professores do Departamento de Geotecnia- EESC, pelo ensino dentro e fora das aulas.

A meu orientador, Dr. Osni José Pejon, pela confiança, dedicação, conhecimento transmitido, críticas e sugestões à este trabalho, também pela sua amizade e paciência com meu português.

Ao Dr. Lázaro Zuquette pelo apoio, colaboração e predica permanente para racionalizar e equacionar nossas pesquisas geológico-geotécnicas.

Ao Prof. Luis de León, pelo estímulo, respaldo e confiança para estudar os argilo-minerais.

Ao Ing. David Borgunder de SIG da Intendencia Municipal de Montevideo, pela cessão dos materiais cartográficos digitalizados, facilitando os trabalhos de desenho dos mapas

A Sergio de Souza e Ernesto Goso pela colaboração trabalhos de campo e discussões enriquecedoras durante os mesmos.

A meus colegas da Turma 1999 pela sua amizade, compreensão e ensino de português.

A Adriana Adlhert, Ana Valéria Vieira, Edmundo Talamani Neto, Ígor de Ávila, Luiz Baras e Rogério Ribeiro pela amizade, ensino e discussões enriquecedoras que contribuíram a minha formação pessoal.

Aos colegas Paulo Lopes e Silvana Fontes, pelo auxílio no uso dos programas de desenho dos mapas.

Aos colegas Adilson do Lago Leite, Ronaldo Limo Gomes, Eliana Pereira e Miguel Alfaro pela sua amizade, apoio, sugestões e críticas durante o desenvolvimento do trabalho.

Aos meus pais, Héctor e Mariaa Esther, e aos pais de Cecília, Geza e Raquel, pelo amor, compreensão e apoio as minhas decisões. A meus irmão, Alejandro e Cecília, tios e avô pelo amor e carinho

A Cecília, minha companheira, por seu amor, compreensão e apoio nos bons e maus momentos.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	i
LISTA DE TABELAS	v
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	vii
LISTA DE SIMBOLOS	viii
RESUMO	x
ABSTRACT	xi
CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivos	3
1.1.1 Geral	3
1.1.2 Específicos	3
CAPÍTULO 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 Aspectos Composicionais	5
2.1.1 Argilominerais e suas propriedades	5
2.1.1.1 Capacidade de troca catiônica e aniônica	7
2.2 Factores Ambientais do Solo	8
2.2.1 Fenômeno de Dupla Camada Elétrica	8
2.2.2 Sorção de Água – Expansão	11
2.2.2.1 Expansão intracristalina	12
2.2.2.2 Expansão Osmótica	12
2.3 Procedimentos Para Medir Expansão	14
2.3.1 Ensaios para determinar a pressão de expansão e a deformação uniaxial	15
2.3.1.1 Carregamento seguido de Expansão (M1)	15
2.3.1.2 Expansão sob diferentes sobrecargas (M2)	16
2.3.1.3 Volume Constante (M3)	16
2.3.1.4 Aparelho de LAMBE (M4)	17
2.3.1.5 Ensaio edométrico duplo (M5)	17

2.3.1.6 Ensaio de descarregamento M(6)	17
2.3.2 Ensaio triaxial de trajetoria de tensões (TRIAXIAL STRESS PATH CELL)	20
2.3.3 Ensaios com Sucção Controlada	23
2.4 Métodos de Identificação de Solos Expansivos	25
2.4.1 Métodos Indiretos	25
2.4.1.1 Indicadores Mineralógicos	25
2.4.1.2 Indicadores relacionadas a Propriedades Físico-químicas	25
2.4.1.3 Indicadores relacionados a Propriedades Físicas	26
2.4.1.4 Indicadores relacionados a Propriedades Índices – limites de Atterberg, Massa Específica Seca (pd)	26
2.4.2 Métodos Combinados	27
2.4.2.1. Indicadores relacionados as Classificações Geotécnicas	27
2.4.2.2 Uso de Cartas e Tabelas para Prever Expansão	27
2.4.2.2.a Carta de Skempton (1953)	27
2.4.2.2.b Carta de SEED et al. (1962)	29
2.4.2.2.c Carta de VAN DER MERWE (1964) modificada por WILLIAMS & DONALSON (1980)	32
2.4.2.2.d Carta de Previsão para solos expansivos usada na Espanha	35
2.4.2.2.e Cartas de Previsão no Brasil	36
2.4.2.3. Uso de Tabelas	38
2.5 Mapeamento Geotécnico	40
2.5.1 Teoria dos Sistemas	40
2.5.2 Metodologias Gerais	41
2.5.2.1 Metodologia Zuquette (Brasil)	42
2.5.2.1.a Princípios gerais	42
2.5.2.1.b Tipos de documentos	44
2.5.2.1.c Princípios básicos da elaboração dos documentos	45
2.5.3. Metodologias de Mapeamento de Solos Expansivos	46
2.5.3.1 Metodologia da Espanha	46
2.5.3.1.a Critérios de caracterização	46
2.5.3.1.b Critérios de avaliação de potencial de expansão	48
2.5.3.2 Mapeamento nos Estados Unidos	49
2.5.3.2.a Critérios de caracterização	50

2.5.3.3 Mapeamento no Brasil	50
2.6 Solos Expansivos em Argentina, Brasil e Uruguai	51
 CAPÍTULO 3 CARACTERÍSTICAS GERAIS DA ÁREA DE ESTUDO	 55
3.1 Introdução	55
3.2 Características Gerais da Área	55
3.3 Geologia Regional	56
3.4 Geomorfologia	60
3.5 Pedologia	61
3.6 Geologia da Região de Estudo	63
3.7 Clima	63
 CAPÍTULO 4 MATERIAIS E MÉTODOS	 65
4.1 Materiais Estudados	65
4.1.1. Aspectos Geológicos da Fm. Libertad	65
4.1.2 Características Geotécnicas dos Materiais da Fm. Libertad	66
4.2 Métodos	68
4.2.1 Técnica de Avaliação de Terreno e Mapeamento Geotécnico	68
4.2.2 Coleta das Amostras	69
4.2.3 Ensaios	70
4.2.3.1 Granulometria, Limites de Atterberg	70
4.2.3.2 Determinação da CTC	70
4.2.3.3 Difração de Raios X	73
4.2.3.4 Ensaios de Determinação de Expansão	73
 CAPÍTULO 5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	 77
5.1 Ensaios de Caracterização	
Limites de Atterberg, Capacidade Troca de Cátions, Difração de Raios X	77
5.1.1 Análise Granulométrica	77
5.1.2 Limites de Atterberg	82
5.1.3 Análises dos índices obtidos no ensaio de Azul de Metileno (CTCsolo, CTCargila, VB, Acb, SEsolo, SEargila)	85
5.1.4 Classificações Geotecnicas	87
5.1.5 Análise de Difração de Raios X	87

5.1.5.1 Amostras da Classe 40-55 cmol/kg	87
5.1.5.2 Amostras da Classe 55-74 cmol/kg	89
5.1.5.3 Amostras da Classe 74-94 cmol/kg	90
5.1.5.4 Amostras da Classe 94-117 cmol/kg	90
5.2 Ensaaios de Expansão	96
5.2.1 Amostras Indeformadas	96
5.2.1.1 Umidade "Natural"	96
5.2.1.2 Secas ao ar.	98
5.2.2 Amostras Compactadas	101
5.3 Correlações entre índices	104
5.3.1 Correlações entre índices de caracterização	104
5.3.2 Correlações entre índices de caracterização e Pressão de Expansão das amostras compactadas	104
5.4 Cartas de Previsão de Expansão	109
5.4.1 Carta de VAN der MERWE (1964) modificada por WILLIAMS & DONALSON (1980)	110
5.4.2 Carta de SEED et al. (1962)	110
5.4.3 Carta de PEREIRA & PEJON (1999)	111
 CAPÍTULO 6 DOCUMENTOS CARTOGRÁFICOS	 113
6.1 Mapas e Cartas Básicas	113
6.1.1 Mapa de Documentação	113
6.1.2 Mapa Topográfico	113
6.1.3 Mapa das Unidades Geológicas Superficiais	113
6.1.3.1 Embasamento Pré-cambriano	114
6.1.3.2 Fm Fray Bentos	114
6.1.3.3 Fm Raigón	114
6.1.3.4 Fm Libertad	115
6.1.3.4 Aluviões	117
6.1.4 Carta de Declividade	117
6.1.5 Mapa de Landform	118
6.1.5.1 Sistema A	119
6.1.5.1.1 Unidade 1	119
6.1.5.1.2 Unidade 2	119
6.1.5.1.3 Unidade3	120

6.1.5.2 Sistema B	122
6.1.5.2.1 Unidade 4	122
6.1.5.2.1 Unidade 5	122
6.1.5.2.2 Unidade 6	124
6.1.5.2.1 Unidade 7	124
6.1.5.3 Sistema C	125
6.1.5.3.1 Unidade 8	125
6.2 Documentos Cartográficos Interpretativos	126
6.2.1 Carta de Potencial de Expansão dos sedimentos da Fm. Libertad	126
6.2.2 Avaliação de terreno	126
6.2.2.1 Evidencias de problemas causados por solos expansivos	127
6.3 Proposta Metodológica de Mapeamento de Solos Expansivos	131
 CAPÍTULO 7 CONCLUSÕES	 135
7.1 Gerais	135
7.2 Sobre a área mapeada	136
7.3 Sugestões para trabalhos futuros	137
 CAPÍTULO 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	 138
 ANEXO I MAPA DE DOCUMENTAÇÃO	
ANEXO II MAPA TOPOGRÁFICO	
ANEXO III CARTA DE DECLIVIDADE	
ANEXO IV MAPA DE LANDFORMS	
ANEXO V MAPA DE UNIDADES GEOLÓGICAS SUPERFICIAS	
ANEXO VI CARTA DO POTENCIAL DE EXPANSÃO DOS SEDIMENTOS DA FM. LIBERTAD.	

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 01 - Arranjo estrutural dos diferentes grupos de filosilicatos	6
FIGURA 02 - Distribuição de íons na adjacência de superfície de argila segundo a Teoria da Dupla Camada Difusa	9
FIGURA 03 - Distribuição de íons junto a superfície das partículas coloidais segundo a Teoria de Stern	9
FIGURA 04 - Expansão intracristalina da Montmorillonita Sódica	14
FIGURA 05 - Efeito de expansão osmótica gerada pela maior concentração de íons no interior das duas placas de argila, em relação a solução do meio e o decaimento do potencial com aumento da distância	14
FIGURA 06 - Isoterma de Absorção de água em Montmorillonita Sódica e Cálcica	14
FIGURA 07 - Aparelho para determinar a expansão livre	16
FIGURA 08 - Variações nos valores de pressão de expansão segundo diferentes métodos de medição	19
FIGURA 09 - Valores da pressão de expansão de amostras com diferentes conteúdo de argila e de densidade seca	20
FIGURA 10 - Aparelho triaxial de trajetória de tensões	21
FIGURA 11 - Expansão em função da pressão confinante	22
FIGURA 12 - Comparação da expansão obtidas em ensaios edométricos e triaxial	22
FIGURA 13 - Comparação das medidas de expansão em ensaios edométricos, triaxiais e no campo	23
FIGURA 14 - Expansão livre por inundação de amostras com diferentes umidades Iniciais	24
FIGURA 15 - Expansão livre com sucção controlada do mesmo material que na Figura 14 com umidade inicial de 24 %	24
FIGURA 16 - Atividade das diferentes argilas da Inglaterra	29
FIGURA 17 - Porcentagem de expansão de materiais com diferenciais na porcentagem e composição da fração argila	30
FIGURA 18 - Carta de previsão de potencial de expansão em função da atividade e conteúdo da fração argila	31
FIGURA 19 - Classificação de solos naturais segundo a carta da FIGURA 3.8	32
FIGURA 20 - Carta de previsão de expansão de VAN DER MERWE (1964)	33
FIGURA 21 - Modificação da Carta de VAN DER MERWE	34

FIGURA 22 - Carta de expansividade em função do limite de liquidez e da razão umidade/limite de liquidez	35
FIGURA 23 - Cartas de predição de pressão de expansão e expansão livre em função do limite de liquidez e a umidade natural para os solos da Espanha	36
FIGURA 24 - Representação dos dados de VB vs porcentagem da fração argilosa, com os respectivos valores de Expansão Livre (%) determinados para os materiais de 11 blocos indeformados e a separação de porções do material que apresentam potenciais expansivos distintos	37
FIGURA 25 - Valores de VB vs % da fração argilosa, com dados referentes aos ensaios de Pressão de Expansão (kPa) para as amostras dos 11 blocos indeformadas	37
FIGURA 26 - Fluxograma da metodologia de classificação dos solos expansivos da Espanha	47
FIGURA 27 - Correlação entre Limite de Liquidez (LL) e Pressão de Expansão em função da umidade natural, para os solos da Espanha	48
FIGURA 28 - Mapa Previsor do Risco de Expansividade dos Solos Argilosos da Espanha	49
FIGURA 29 - Carta de Solos Expansivos do Uruguai	54
FIGURA 30 - Mapa de localização da área de estudo em Montevideu	56
FIGURA 31 - Mapa Geológico do Uruguai	57
FIGURA 32 - Mapa Geomorfológico do Uruguai	61
FIGURA 33 - Carta de Reconhecimento de Solos da área de estudo, folhas La Unión (J-29) e La Barra (K 29) a escala 1:100.000	62
FIGURA 34 - Mapa Geológico da área de estudo, folhas La Unión (J-29) e La Barra (K-29)	63
FIGURA 35 - Trado usado para retirada de amostras deformadas	71
FIGURA 36 - Foto do amostrador e do sistema utilizado para retirada de amostras Indeformadas	71
FIGURA 37 - Moldagem do corpo de prova para ensaio de expansão	74
FIGURA 38 - Contração lateral da amostra 40-3 depois de seca ao ar	74
FIGURA 39 - Amostra 40-3 seca ao ar no anel de consolidação e preenchida com areia fina para completar o espaço até a parede do anel	75
FIGURA 40 - Amostra 45-3 seca ao ar no anel de consolidação e preenchida com areia fina para completar o espaço até a parede do anel	75

FIGURA 41 - Distribuição das amostras da Fm. Libertad,segundo sua granulometria	81
FIGURA 42 Curva granulométrica típica das Famílias F-1-A, F-1-B, F-1-C, F-2-A, F-2-B dadas pelas amostras 10, 35-4, 37-1 ,26-3 e 38-3,respectivamente.	81
FIGURA 43 Frequência de distribuição fração passante na peneira # 200	83
FIGURA 44 Frequência de distribuição fração silte	83
FIGURA 45 Frequência de distribuição fração argila (< 2 μ m)	83
FIGURA 46 Frequência de distribuição do LP	84
FIGURA 47 Frequência de distribuição do LL	84
FIGURA 48 Frequência de distribuição do IP	84
FIGURA 49 Frequência de distribuição da CTC do solo	86
FIGURA 50 Frequência de distribuição dos valores de VB	86
FIGURA 51 Frequência de distribuição dos valores de Acb	86
FIGURA 52 Frequência de distribuição dos valores da CTCargila	86
FIGURA 53 Difratoograma amostra normal 36-2	93
FIGURA 54 Difratoograma amostra glicolada 36-2	93
FIGURA 55 Difratoograma amostra normal 39-1 e 35-3	93
FIGURA 56 Difratoograma amostra glicolada 39-1 e 35-3	93
FIGURA 57 Difratoograma amostra normal 26-1 e 26-2	94
FIGURA 58 Difratoograma amostra glicolada 26-1 e 26-2	94
FIGURA 59 Difratoograma amostra normal 35-5 e 47-4	94
FIGURA 60 Difratoograma amostra glicolada 35-5 e 47-4	94
FIGURA 61 Difratoograma amostras normal 26-4 e 39-2	95
FIGURA 62 Difratoograma amostra glicolada 26-4 e 39-	95
FIGURA 63 Expansão livre amostras com umidade natural	99
FIGURA 64 Pressão de Expansão amostras com umidade natural	99
FIGURA 65 Expansão livre amostras secas ao ar	101
FIGURA 66 Pressão de Expansão secas ao ar	101
FIGURA 67 Concreções de CaCO ₃ na amostra 44-1	103
FIGURA 68 Pressão de expansão das amostras compactadas estaticamente e W = 15 %.	103
FIGURA 69 Superfície de Pressão de Expansão das amostras compactadas	107
FIGURA 70 Superfície de Pressão de Expansão das amostras compactadas sem	

CACO ₃	107
FIGURA 71 Superfície de Pressão de Expansão das amostras compactadas e secas ao ar	108
FIGURA 72 Plotagem dos valores de Pressão de expansão das amostras secas ao ar	108
FIGURA 73 Superfície de Pressão de Expansão das amostras secas ao ar	109
FIGURA 74 Carta de Previsão de Expansão VAN der MERWE (1964) modificada por WILLIAMS & DONALSON (1980)	110
FIGURA 75 Carta de Previsão de Expansão SEED et Al. (1962)	111
FIGURA 76 Carta de Previsão de Expansão PEREIRA & PEJON (1999)	112
FIGURA 77 a) Concreções de carbonato de cálcio, de cor branco, ao longo do perfil do ponto 49. b) Estrutura de “pop-corn” (empastilhamento), típica em taludes submetidos a secagem e umedecimento.	116
FIGURA 78 Detalhe do nível de Loess no ponto 40 e as concreções de carbonato de cálcio de cor branco.	116
FIGURA 79 Formas das vertentes (S plana, V convexa, C côncava)	118
FIGURA 80 Relevo típico da Unidade A-2, com presença de matacões	120
FIGURA 81 Visão desde o ponto 26 em direção aos pontos 35 e 57. Colinas suaves com topo planos e ondulados. Unidade A-3	121
FIGURA 82 Identificação de dois níveis de loess no ponto 40, Unidade B-5	123
FIGURA 83 Relevo de colinas suave na região do ponto 40, unidade B-5	123
FIGURA 84 Topo plano no ponto 44, unidade B-7	124
FIGURA 85 Relevo de colinas suaves da unidade B-7	125
FIGURA 86 Planície associada ao A. Manga, Unidade C-8	125
FIGURA 87 Pavimento com rachaduras e postes de luz inclinados, na região da Unidade A-3(ponto 57)	128
FIGURA 88 Casa com rachaduras na região da Unidade B-5 (ponto 40)	128
FIGURA 89 Casa com rachaduras na região da Unidade B-5 (ponto 132)	129
FIGURA 90 Casa com rachaduras na região da Unidade B-5 (ponto 47)	129
FIGURA 91 Casa com rachaduras na região de unidade B-6	130
FIGURA 92 Casa com rachaduras na região da Unidade B-6 (ponto 44)	130
FIGURA 93 Fluxograma Guia para Identificação e Mapeamento de Solos Expansivos	132
FIGURA 93 (cont) Fluxograma Guia para Identificação e Mapeamento de Solos Expansivos	133

LISTA DE TABELAS

TABELA 01 - Classificação de minerais argilosos	6
TABELA 02 - Capacidade de Troca de Cátions e Superfície Específica de diferentes Argilominerais	7
TABELA 03 - Métodos para identificar solos expansivos	28
TABELA 04 - Variação da atividade do solo em função da mineralogia da fração argila	29
TABELA 05 - Determinação do potencial de expansão usando parâmetros indiretos	38
TABELA 06 - Dados para estimar a mudança de volume provável para solos Expansivos	38
TABELA 07 - Relações entre índices indireto e potencial de expansão para solos do Norte da Itália	39
TABELA 08 - Atributos a ser avaliados nos diferentes componentes, segundo mapas e cartas a serem gerados	43
TABELA 09 - Critérios de classificação dos solos expansivos da Espanha	47
TABELA 10 - Legenda da Classificação de Pedologica das La Unión (J-29) e La Barra (K 29)	62
TABELA 11 - Análise Granulométrica, Massa Específica dos Sólidos, Umidade natural, Limites de Atterberg, Capacidade Troca de Cations	78
TABELA 12 - Valores limites das diferentes Famílias granulométricas	77
TABELA 13 - Classificações Geotécnicas	88
TABELA 14 - Identificação de DRX semi-quantitativa de argilo-minerais (Amostra Natural)	91
TABELA 14 - (cont) Identificação de DRX semi-quantitativa de argilo-minerais (amostra Glicolada)	92
TABELA 15 - Propriedades Índices das amostras submetidas a Expansão Livre	97
TABELA 16 - Propriedades Índices das amostras submetidas a Pressão de Expansão (umidade natural)	97
TABELA 17 - Propriedades Índices das amostras submetidas a Expansão Livre	98
TABELA 18 - Propriedades Índices das amostras submetidas a Pressão de Expansão	100
TABELA 19 - Propriedades índices das amostras compactadas submetidas a ensaios de Pressão de Expansão	102
TABELA 20 - Correlações entre índices de caracterização	105

TABELA 21 - Correlações entre índices indiretos e com a pressão de expansão das amostras compactadas sem CaCO_3	106
TABELA 22 - Pressão de Expansão e intervalos de Potenciais de Expansão associados	126

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ASTM	American Standart Test Methods
ATD	Análise Térmico Diferencial
CaCO ₃	Carbonato de Calcio
CBR	California Bearing Ratio
CSIRO	Common Wealth Scientific and Industrial Organization
DINAMIGE	Dirección Nacional de Minería y Geología
DRX	Difração de Raios X
EI	Espectrometría Infravermelha
FAU	Força Aérea Uruguaia
FEM	Força Eletro-motriz
FEMA	Federal Emergency Management Agency
Fm.	Formação
FI	Faculdade de Engenharia
IAEG	Associação Internacional de Geologia de Engenharia
IMM	Intendencia Municipal de Montevideo
ISRM	International Society Rock Mechanics
MAP	Ministerio de Agricultura y Pesca
NBR	Normas Brasileiras Registradas
POT	Plan de Ordenamiento Territorial
PUCE	Patron Unit Component Evaluation
PVC	Potential Volumen Change
SEM	Microscopio electrónico de varredura
SIG	Servicio de Información Geográfico
SI	Índice de Expansão
SUCS	Soil Unified Classification System
UDELAR	Universidad de la República
URSS	União de Repúblicas Socialistas Sovieticas
USBR	United State Bureau Reclamation
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
SPT	Ensaio de Penetração Normal
HRB	Highway Road Bureau

LISTA DE SIMBOLOS

η_i	concentração eletrolítica, íons /m ³
ψ	potencial elétrico, J
x	distancia da superfície da partícula, m
e	carga do elétron, C
ϵ	constante dielétrica do fluido, C ² Nm ⁻²
v_i	valência ionica
k	constante de Boltzmann (1.38 x 10 ⁻²³)
pH	-log [H ⁺]
$n\lambda$	numero inteiro de comprimentos de onda, nm
d	espaçamento basal, nm
γ_d	densidade seca, kgm ⁻³
ω	umidade, %
ω_n	umidade natural, %
ω_{ini}	umidade inicial, %
ω_{fin}	umidade final, %
A	Atividade de SKEMPTOM
A'	Atividade de SEED
A _{cb}	Índice da atividade da fração argila, g/100g argila
B _t	Horizonte textural
C ₂	Porcentagem da fração argila no material, %
CPS	Centelheo por segundo
CTC	Capacidade de Troca Catiônica, cmol/kg
CTC _{solo}	Capacidade de Troca Catiônica do solo, cmol/kg
CTC _{arg}	Capacidade de Troca Catiônica da fração argila, cmol/kg
IC	Índice de Contração, %
e	Índice de vazios
LC	Límite de Contração, %
LL	Límite de Liquidez, %
LP	Límite de Plasticidade, %
IP	Índice de Plasticidade, %
M	Molaridade
MCT	Miniatura, Compactado, Tropical
N	Normalidade

N (SPT)	Número de golpes Ensaio Penetração Normal
N	porosidade, %
P	Pressão de Expansão, kg/cm^2
P_0	Pressão inicial, kPa
P_{sc}	Pressão de Expansão, kPa
P_{sz}	Pressão de Expansão, kPa
ρ_s	massa específica dos sólidos, kg/m^3
ρ_d	massa específica seca, kg/m^3
PVC	Mudança Potencial de Volume, %
SE	Superfície Específica, m^2g^{-1}
SEsolo	Superfície Específica do solo, m^2g^{-1}
SEarg.	Superfície Específica da fração argila, m^2g^{-1}
Sf	expansão livre, %
SPr	Expansão livre, %
SPd	Expansão livre, %
Sr	Grau saturação, %
$S_{r_{ini}}$	Grau de saturação inicial, %
$S_{r_{fin}}$	Grau de saturação final, %
T	temperatura, °K
VB	Valor de Adsorção de azul de metileno, g/100g de solo

RESUMO

MUSSO LAESPIGA, M. A. (2001) *Estudo do fenômeno de expansão dos sedimentos da Formação Libertad (Quaternário): Metodologia de avaliação e mapeamento na região de Montevideu- Uruguai*. São Carlos, 2001. 146p. Dissertação (Mestrado)- Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

O estudo do fenômeno de expansão em solos argilosos tem-se restringido, na maioria das vezes, a estudos laboratoriais referentes ao comportamento mecânico do solo e as correlações com as propriedades índices e as classificações geotécnicas. Poucos são os estudos na área de mapeamento geotécnico em média e grande escala, existindo um vazio nas metodologias de mapeamento geotécnico no que se refere a esta classe de solos. Durante o desenvolvimento desta pesquisa sobre as características expansivas da Fm. Libertad, Quaternário (Uruguai), foram combinados os produtos obtidos das técnicas de mapeamento com os propriedades identificadas nos ensaios de caracterização e as medidas de expansão. A técnica de avaliação de terreno usando Landforms para separar unidades homogêneas, resultou em um grande auxílio permitindo direcionar os trabalhos e observações de campo e diminuir o número de amostras a serem coletadas. O ensaio de caracterização da Capacidade de Troca Catiônica (CTC) da fração argila, usando a técnica de Azul de Metileno, mostrou-se coincidente com a identificação de argilo-minerais usando Difração de Raios X (DRX). Esses dados, associados aos valores de Pressão de Expansão e Expansão livre de amostra indeformadas, com umidade natural e secas ao ar, e de amostras compactadas com diferentes massas específicas seca (ρ_d) e umidade constante ($w=15\%$) permitiram identificar unidades com diferentes potenciais de expansão na Fm. Libertad. A combinação desses dados permitiu a produção da Carta de Potencial de Expansão do Solos, numa região de desenvolvimento urbano no Município de Montevideu, Uruguai. Este documento fornece aos planejadores do uso e ocupação da área o conhecimento dos diferentes graus de restrição que devem ser levados em conta devido à presença de solos potencialmente expansivos. Elaborou-se uma proposta metodológica para a execução de trabalhos de mapeamento geotécnico de solos expansivos.

Palavras-chave: azul de metileno; Fm. Libertad; difração de raios x; expansibilidade; metodologia mapeamento geotécnico; Metodologia pressão de expansão; solos expansivos; Montevideu; Uruguai.

ABSTRACT

Expansive sediments of Libertad Formation (Quaternary) research: Engineering Geological Mapping and evaluate methodology in suburban area of Montevideo City, Uruguay. São Carlos 2001. 146 p. Dissertação (Mestrado)- Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

The swelling phenomenon of the clay soils has been studied mainly in laboratory with the objective of understand the behavior of the soil and the correlations with the index properties and with the geotechnical classifications. In Engineering Geotechnical Mapping there is a lack of methodology about swell soil mapping in medium or large scale. In this research the swelling characteristics of the Libertad Formation (Uruguay) were studied by combination of the information obtained in the Engineering Geotechnical Mapping (scale 1:10.000) and the soil properties identified in the characterization and swelling tests. The technique of land evaluation using Landforms to separate homogeneous units, it resulted in a great aid allowing to guide the works and field observations and to reduce the number of samples to be collected. The characterization tests of cationic exchange capacity (CEC) of the clay, using the technique of adsorption of methylene blue, it was shown coincident with the identification of clay using X-Ray Diffraction (XRD). The swelling potentials of the Libertad Formation were determined based in the information of the values of swelling pressure and free swelling from undisturbed samples, both with natural moisture contents and air dried, besides the samples compacted with different apparent specific gravity (ρ_d) and with constant moisture content ($w=15\%$). This procedure allowed the production of the Swelling Potential Chart of the soil in an suburban area of Montevideo City, Uruguay. This document can supply the information to the management of the area taken in account the different swelling potential of the soils. Finally it is presented a methodology to carry out Engineering Geological Mapping of the swelling soils.

key Words: Methylene Blue; Libertad Formation; X-Ray Diffraction; swelling; Engeneering Geological Mapping; Swelling Pressure, clay soils; Montevideú, Uruguay.

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO

A caracterização e representação cartográfica dos solos argilosos expansivos é fundamental, dada a ampla distribuição espacial que apresentam na Terra e aos inumeráveis problemas a eles associados. Solos argilosos existem em muitas regiões do mundo, podendo ser residuais ou retrabalhados. Os primeiros são desenvolvidos a partir da alteração *in situ* de rochas ígneas, metamórficas ou sedimentares. Os segundos, no entanto são produto da acumulação de materiais previamente erodidos e transportados, pela água, vento ou gelo, desde seu lugar de gênese até outras regiões. Nestes materiais predominam as partículas de tamanho menor a 63 μm e podem ser compostos por diferentes minerais de argilas, que serão os principais responsáveis pelo seu comportamento.

O fenômeno de expansão em solos argilosos é muito complexo, tendo um grande número de variáveis envolvidas desde: composicionais (percentagem e mineralogia das argilas), estruturais (densidade, arranjo entre as partículas) e ambientais (grau de saturação, composição da água dos poros), além das interações entre elas, pelo qual uma melhor compreensão do fenômeno deve ser feita a partir de um enfoque abrangente do "sistema solo".

Apresentar ou não características expansivas depende, primeiro, se contém minerais argilosos com capacidade de expandir, segundo, estar submetido à condições ambientais que favoreçam este tipo de processo como: climas áridos e semi-áridos ou que a ação do homem faça com que sejam submetidos a processos de secagem e umedecimento estacional.

Assim, conhecer a mineralogia dos solos argilosos, sua distribuição geográfica e seu comportamento mecânico, são a base para identificar a existência de solos expansivos e sua localização com certo grau de confiança. Isto faz com que as etapas de investigação, em áreas de execução de projetos, devam intensificar-se e especializar-se os programas de sondagens e ensaios laboratoriais específicos para os fenômenos de expansão. Muitos pesquisadores têm desenvolvido, por enquanto, um grande número de técnicas de identificação, caracterização e previsão do comportamento dos solos expansivos, mas não há consenso entre os diversos pesquisadores com respeito aos melhores métodos. Para achar

soluções efetivas para estes problemas se faz necessário o trabalho conjunto de especialistas em minerais de argilas e engenheiros segundo LANG (1989).

Os projetos de construções leves são os mais afetados por estes problemas e a experiência mostra que, os custos para reparar os danos são muito mais elevados que os custos de um projeto feito com base no conhecimento do comportamento expansivo do solo KRAZYNSKI *apud NELSON & MILLER (1992).

Quando se dispõe de mapas básicos de solos com potencial de expansão, nas etapas iniciais de execução de projetos, pode-se planejar as sondagens e ensaios com maior precisão, em menos tempo e com menor custo.

Em várias regiões do mundo encontram-se grandes áreas de solos expansivos localizando-se em zonas de climas semi-árido, em regiões tropicais e temperadas. Alguns dos países afetados por problemas com solos expansivos são Arábia Saudita, Argentina, Austrália, África do Sul, Brasil, China, Espanha, Estados Unidos da América, Índia, Israel, México, Oman, Rússia, Uruguai, Venezuela, entre outros.

Em alguns destes países existe uma grande preocupação com a ocupação urbana de áreas com solos expansivos. EROL & DHOWIAM (1990) mostram que na Arábia Saudita, os problemas de expansão dos solos foram induzidos pela infiltração de água das regiões urbanizadas. Outras vezes o desconhecimento da existência dos mesmos produz os maiores desastres, como é o caso da região norte de Oman segundo AL-RAWAS (1999).

Nos Estados Unidos da América os danos nas construções (casas leves e estradas) causados pelos solos expansivos são superiores aos gerados pela soma dos outros desastres naturais como terremotos, furacões, etc., segundo JONES & HOLTZ (1973). Para NUHFER† apud AL-RAWAS & QAMARUDDIN (1997), os custos das perdas por solos expansivos são de 6000 a 11000 milhões por ano nos Estados Unidos da América. No entanto, segundo RAGOZIN (1994), na Rússia, as perdas por ano geradas por solos expansivos são de 3000 a 5000 milhões de dólares.

* KRAZYNSKI, L. M. (1979) Site investigation. The design and construction of residential slabs-on-ground: state of-the-art. Porc. Workshop Building Research Advisory board. (BRAB) Comision of sociotechnical Systems, Washington D.C. I: 33-48 apud NELSON, J.D. & MILLER, . (1992). *Expansive Soils: problems and practice in foundation and pavement engineering*. New York, John Wiley & Sons, Inc.

† NUHFER, E. B. (1994) What's a geology hazard. Geotimes, July p 4, apud AL-RAWAS, A. & QAMARUFFIN, M. (1998) Construction Problems of Engineering Structures Founded on Expansive Soils and Rocks in Northern Oman. *Building and Environment* Vol. 33, N2-3, p.159-171

Escolheu-se para desenvolver o trabalho de pesquisa da Dissertação de Mestrado uma região suburbana e rural da cidade de Montevidéu, Uruguai considerando:

- 1) Uma zona na qual se tenha identificado a presença da Formação Libertad, a qual tem sido reconhecida a presença de solos expansivos em trabalhos desenvolvidos no Departamento de Geotecnia - Faculdade de Engenharia – Universidade da República Oriental do Uruguai, por GOSO et al. (1993), NAHOUM et al.(1996), SOUZA et al. (1998), entre outros.
- 2) Seja uma região de expansão urbana, tal como está indicado no Plano de Ordenamento Territorial (POT) do Departamento de Montevidéu, segundo a Intendencia Municipal de Montevidéu IMM (1999).
- 3) Uma região a ser usada como área para testar metodologias de caracterização para mapeamento geotécnico de solos expansivos.
- 4) As características geotécnicas e sociais se enquadrem como uma zona potencial de prejuízo econômico, caso não se conheça o comportamento expansivo dos solos.
- 5) Que os resultados a serem obtidos sejam orientativos para os planejadores, melhorando o conhecimento do subsolo para fundações de edificações leves e de baixo custo, a construção de estradas e ruas, dutos enterrados, entre outras.

1.1 Objetivos

1.1.1 Geral

- I) Contribuir ao desenvolvimento de uma metodologia de identificação e caracterização de solos expansivos com a finalidade de seu mapeamento geotécnico.

1.1.2 Específicos

- I) Caracterizar o fenômeno de expansão dos materiais da Formação Libertad (Uruguai)
- II) Aplicar as metodologias para caracterizar geotecnicamente os solos desenvolvidos sobre Formação Libertad (Uruguai).
- III) Realizar o Mapeamento Geotécnico de unidades com diferentes potencialidade de ocorrência do fenômeno de expansão
- IV) Contribuir à validação e desenvolvimento de técnicas expeditas para caracterizar solos argilosos expansivos.

CAPÍTULO 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo será apresentado a revisão sobre tópicos relacionados com os solos expansivos abrangendo aspectos como mineralogia e propriedades dos argilominerais, a influência dos fatores ambientais, as metodologias de medir expansão, os métodos indiretos de prever expansão, as metodologias de mapeamento de solos expansivos e os solos expansivos na Argentina, Brasil e Uruguai.

O fenômeno de expansão dos solos é muito complexo, envolvendo um conjunto de fatores que influenciam e interagem entre si e podem ser agrupados, segundo CARRILLO (1975), PRESA (1984), IYER (1987) entre outros, em três categorias:

- 1) Composicionais: tipo de argilomineral, quantidade de argila, composição da água dos poros.
- 2) Ambientais: Natureza do fluido, íons presentes, pH, propriedades dielétricas do fluido, densidade inicial, grau de saturação, estrutura do solo, história de tensões ou trajetória de tensões, temperatura.
- 3) Procedimento: tamanho e forma do corpo de prova, grau de distorção ou deformação da estrutura original, método de compactação das amostras deformadas, método de medida da pressão de expansão.

Esta divisão deve ser considerada uma simplificação didática dos componentes principais do sistema estudado e da influência dos métodos de estudo, já que os aspectos composicionais e ambientais apresentam muitas interligações, por exemplo o fenômeno de dupla camada (será explicado a frente neste capítulo) é dependente do tipo de argilomineral, dos cátions que completam seu desbalanço de cargas e natureza do fluido ou suas propriedades dielétricas.

2.1 Aspectos Composicionais

2.1.1 Argilominerais e suas propriedades

Os minerais de argila são silicatos de alumínio ou magnésio hidratados, contendo cátions alcalinos ou alcalino-terrosos, com estrutura em folhas, ou seja que pertencem a família dos filossilicatos. As unidades elementares são o tetraedro de silício Si (acontecendo a vezes substituição por alumínio Al^{3+} ou ferro Fe^{3+}) coordenado com quatro oxigênios e o octaédro de alumínio ou magnésio (a vezes Fe^{2+} e Fe^{3+}) coordenado com oxigênio e hidroxilas. As ligações das unidades tetraédricas compõem as folhas tetraédricas na qual a união é feita compartilhando dos três oxigênios basais ficando o quarto oxigênio para ser compartilhado com os octaedros.

A menor estrutura octaédrica é formada pela união de três unidades octaédricas. Se todos os lugares correspondentes a cátion estiverem ocupados, então a estrutura é chamada de Trioctaédrica e o cátion presente terá valência dois. Se apenas dois dos três lugares centrais estiverem ocupados então a estrutura é chamada de Dioctaédrica, sendo o cátion presente de valência três.

Assim, o arranjo de uma folha tetraédrica com uma folha octaédrica é chamado de arranjo ou estrutura 1:1, enquanto um arranjo de duas folhas tetraédricas com uma folha octaédrica no meio é chamada estrutura 2:1. Estes arranjos são mostrados na FIGURA 1. Se os arranjos ou estruturas 1:1 ou 2:1 não estão compensadas eletricamente, o excesso de carga deve ser neutralizado por materiais localizados entre as camadas. Esses podem ser cátions, cátions hidratados e grupos de hidroxilas octaédricas ou folhas de hidroxilas. As argilas podem ser classificadas em sete grupos maiores baseando-se no tipo de camada (1:1, 2:1), a carga na camada e o tipo de ligação intercamada segundo MARTIN (1991). A classificação é mostrada na TABELA 1.

A maioria das propriedades dos argilominerais estão ligadas ou derivam da sua estrutura cristalina, da substituição isomórfica nas folhas tetraédricas e octaédricas, assim como dos cátions que satisfazem as deficiências de cargas e os tipos de ligações que eles geram com a estrutura.

FIGURA 1 Arranjo estrutural dos diferentes grupos de filosilicatos, BANLEY (1980).

TABELA 1 Classificação de minerais argilosos, modificado de MARTIN (1991)

Tipo de Arranjo	Grupo	Subgrupo
1:1	Serpentina-Caulinita	Serpentinas
		Caulinita
2:1	Talco-Pirofilita	Talco
		Pirofilitas
	Esmectitas	Saponitas
		Montmorilonitas
	Vermiculita	Vermiculitas Trioctaédricas
		Vermiculitas Dioctaédricas
	Mica	Mica Trioctaédricas Mica Dioctaédricas
2:1:1	Clorita	Clorita Dioctaédricas
		Clorita Di,Trioctaédricas
2:1 (em fitas)	Sepiolita-Palygorskita	Sepiolita
		Palygorskita

2.1.1.1 Capacidade de troca catiônica e aniônica

Os argilominerais apresentam a capacidade de sorção de ânions e cátions em posições de troca, os quais podem ser substituídos por outros íons dependendo das características do meio e dos íons propriamente. Muitas das propriedades associadas as argilas variam em função do cátion adsorvido, por exemplo a plasticidade de uma argila com Na^+ como cátion é maior que a plasticidade se o cátion for o Ca^{2+} (GRIM, 1953).

A Capacidade de Troca Catiônica (CTC) e a Superfície Específica (SE) são características próprias de cada argilomineral (TABELA 2) e comparável só quando se usa para sua determinação métodos normalizados.

TABELA 2 Capacidade de Troca de Cátions e Superfície Específica de diferentes argilominerais. (GRIM, 1953)

Mineral	CTC (cmol/kg)	SE (m^2/g)
Caulinita	5 - 15	10 - 20
Haloisita	5 - 40	35 - 70
Ilita	10 - 40	65 - 100
Clorita	10 - 40	65 - 100
Vermiculita	100 - 150	800
Esmectita	80-150	800

A CTC é dependente da localização do cátion na estrutura, da energia de ligação e do tipo de cátion, assim como do tamanho da partícula de argila. Os fatores responsáveis pela geração da CTC são:

a) quebras de ligação nas bordas dos minerais, gerando desbalanceamento de cargas, que é compensado pela adsorção de cátion. Nas caulinitas e haloisitas este fator é responsável pela maior proporção da CTC destes minerais, enquanto que nas esmectitas e vermiculitas só é responsável, no máximo, por 20 % da CTC. Com a diminuição do tamanho das partículas aumenta a CTC.

b) Substituição isomórfica na folha tetraédrica, onde o alumínio substitui ao silício ou, em menor proporção, o magnésio substitui ao alumínio nas folhas dioctaédricas. Isto provoca um desbalanço de carga que é compensada pela adsorção de cátion. Este processo é o responsável por 80 % da CTC das esmectitas e vermiculitas, e em menor proporção nas ilitas e cloritas.

c) Substituição do hidrogênio das hidroxilas. Acontece principalmente em materiais amorfos ou matéria orgânica.

O tipo de cátion influi no valor da CTC porque eles geram diferentes energias de ligação com a estrutura do mineral em função de sua valência e raio iônico, além de influenciar o raio de hidratação que varia nos diferentes cátions. Por exemplo no caso do sódio ele apresenta um raio iônico menor que o cálcio, mais seu raio de hidratação é maior. Isto determina que o cálcio possa substituir ao sódio na posição de troca mais facilmente, que o sódio ao cálcio, segundo GRIM (1953). A capacidade de troca aniônica é pouco estudada, dado que a maior parte da deficiência elétrica das argilas é negativa, no entanto segundo LEITE (1998), a mesma é muito importante nos solos tropicais pela presença de óxidos e hidróxidos de ferro que recobrem os minerais de argila. Os métodos mais comuns para determinar a capacidade de troca cátionica são: acetato de amônia e o azul de metileno, que serão descritos no Capítulo 5 Materiais e Métodos.

2.2 Fatores Ambientais do Solo

2.2.1 Fenômeno da Dupla Camada Elétrica

As cargas elétricas na superfície das argilas, quando colocadas em contato com líquidos interagem com eles, em particular com a água. O comportamento destes sistemas argila-agua-íons pode ser explicado pela Teoria da Dupla Camada Iônica ou Teoria de Gouy-Chapman (MITCHELL, 1993), modificada logo por Stern, denominada dupla camada difusa. Os cátions adsorvidos nas argilas se acham fortemente ligados a superfície destas quando estão secas. Colocadas em água, como existe uma concentração muito alta de cátions na superfície da argila, acontecem dois processos simultaneamente, por um lado os cátions atraem ânions da solução para a superfície da argila e, por outro lado, nas proximidades da superfície da argila existe uma concentração maior de cátions em solução, porém existe uma mobilização para a solução de alguns cátions da superfície da argila para equilibrar a solução como se observa na FIGURA 2. Isto gera duas regiões na proximidade da superfície da argila com diferentes concentrações de cátions. A região mais próxima com alta concentração de cátions é chamada de dupla camada elétrica ou camada de Stern e a região com menor concentração de cátions, porém maior que a concentração da solução, é chamada de dupla camada difusa ou camada de Gouy-Chapman como se observa na FIGURA 3.

FIGURA 2 Distribuição de íons na adjacência de superfície de argila segundo a Teoria da Dupla Camada Difusa, MITCHELL (1993)

FIGURA 3 Distribuição de íons junto a superfície das partículas coloidais segundo a Teoria de Stern, LEITE (1998).

O desenvolvimento matemático da Teoria da Dupla Camada difusa ou de Gouy – Chapman se baseia, segundo MITCHELL (1993) em considerar:

- 1) os íons da dupla camada são cargas pontuais e não interagem entre si,
- 2) a carga na superfície da argila é uniformemente distribuída
- 3) o tamanho da partícula de argila é muito maior em relação a espessura da dupla camada
- 4) a constante dielétrica do meio é independente da posição considerada

Pode-se relacionar a carga, com a concentração eletrolítica η_i , (íons /m³) e o potencial elétrico ψ (trabalho necessário para mover uma carga unitária positiva desde um ponto de referencia até um determinado ponto do campo elétrico, que neste caso é negativo, por ter a partícula de argila carga negativa). Segundo MITCHELL (1993) o potencial elétrico e a concentração de íons em função da distância é representado pela equação diferencial:

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} = -\frac{e}{\varepsilon} \sum v_i \eta_i \exp \frac{ve\psi}{kT} \quad eq.(1)$$

onde x distância da superfície da partícula, e carga do elétron, ε constante dielétrica do fluido, v_i valência ionica, η_i concentração eletrolítica no campo elétrico, k constante de Boltzmann (1.38×10^{-23}) e T temperatura em graus Kelvin.

Para o caso simples de ânions e cátions com igual valência a equação fica simplificada a

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} = -\frac{2\eta_0 ve}{\varepsilon} \sinh \frac{ve\psi}{kT} \quad eq.(2)$$

Segundo MITCHELL (1993), considerando uma superfície potencial pequena (menor que 25 mV) e $(ve\psi/kT) \ll 1$

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} = K^2 \psi \quad eq.(3)$$

que tem como solução

$$\psi = \psi_0 e^{-Kx} \quad eq.(4)$$

onde $K^2 = (2\eta e^2 v^2) / \varepsilon kT$.

Pode-se observar que na equação 4 o decaimento do potencial, além de depender da distância, depende:

- diretamente de η e v (valência iônica e concentração), quanto maiores qualquer delas mais rápido desce o valor do potencial então menor é a espessura da

dupla camada. Isto explica, em parte, porque a expansão da esmectita cálcica é menor que a expansão da esmectita sódica,

- inversamente com ϵ (constante dielétrica do meio), quanto menor ϵ maior o termo K , o potencial desce mais rápido, então a espessura da dupla camada é menor. Isto explica porque quando no meio o líquido é água ($\epsilon = 80$) a expansão das argilas é maior que quando o líquido é álcool ($\epsilon = 24$).

2.2.2 Sorção de Água - Expansão

Existem três tipos de expansão: mecânica, intracristalina e osmótica. A primeira é devido ao alívio de sobrecargas nos solos, enquanto as outras duas dependem das características dos minerais dos solos.

Minerais do tipo estrutural 2:1 como a biotita, vermiculita, pirofilita, talco, ilita e esmectita apresentam propriedades muito diferentes em função, principalmente, das substituições isomórficas nas folhas octaédricas e tetraédricas, no arranjo das folhas octaédricas e tetraédricas, assim como da localização e força de ligação dos cátions de troca, OSIPOV & SERGEEV (1972). A existência destas imperfeições explica o desbalanceamento das cargas elétricas, sendo o responsável pela existência da dupla camada elétrica ao redor da partícula de argila, assim como das diferentes propriedades a ela associadas como Capacidade de Troca de Cátions e sorção, entre outras. Um baixo grau de substituição isomórfica localizada na folha octaédrica, contribui para o aumento da expansão, no entanto se a substituição é muito alta e acontece na folha tetraédrica a expansão é menor, OSIPOV & SERGEEV (1972).

Também acontecem diferentes processos físico-químicos nas bordas dos argilominerais que têm influência no comportamento dos mesmos. Nas bordas ocorrem deficiências de cargas com sinal e densidade dependentes da interação com o meio.

As diferenças entre os valores das expansões intracristalinas dos diferentes argilominerais depende do grau e localização da substituição isomórfica. Segundo MADSEN & MÜLLER (1989) a expansão intracristalina é causada pela hidratação de cátions trocáveis em argilas secas e a expansão osmótica é resultante das diferenças de concentração de íons entre a superfície das argilas e a água dos poros.

A expansão nas argilas é o resultado da estrutura em camadas dos argilominerais e dos cátions adsorvidos. Duas fases de expansão pode-se observar nas argilas secas, na primeira a água hidrata os cátions trocáveis, ocorre nos argilo-minerais uma expansão intracristalina, como no caso das esmectitas. Na segunda fase, expansão osmótica, resulta

das diferenças entre as concentrações de cátion entre a superfície das camadas das argilas e da água dos poros.

2.2.2.1 Expansão intracristalina

Em uma montmorilonita desidratada os cátions trocáveis se acham na superfície da camada ou nos espaços hexagonais das folhas tetraédricas e a distância entre camadas é de 1,0 a 0,96 nm ($1\text{nm} = 10^{-9}\text{ m}$) como se observa na FIGURA 4.

Ao iniciar-se a hidratação dos cátions pela presença de água, produz-se um acréscimo do espaçamento basal da montmorilonita, chegando a produzir pressões de expansão da ordem de 100 MPa. Neste processo, a polaridade da molécula d'água tem um papel fundamental na hidratação dos cátions, com os dipolos negativos da molécula se orientando para eles. Este processo de hidratação se realiza em etapas como é mostrado na FIGURA 4.

As pressões de expansão calculadas para a expansão intracristalina mediante isotermas de adsorção de vapor de água mostram que na primeira camada de água a tensão gerada é de 400 MPa, na segunda camada é de 110 MPa e na terceira e quarta é de 27 MPa, MADSEN & MÜLLER (1989). A sobrecarga necessária para impedir a expansão intracristalina é muito grande, sendo que os engenheiros não reparam neste problema, segundo MADSEN & MÜLLER (op. cit.). Assim, existem diferenças entre a montmorilonita sódica e cálcica. Quando a primeira é colocada em água deionizada, o sódio contido se move para a superfície acontecendo a máxima expansão intracristalina, enquanto na montmorilonita cálcica a expansão cessa quando a distância intracamadas atinge o valor de 1,4 nm MADSEN & MÜLLER (op. cit.).

2.2.2.2 Expansão Osmótica

A expansão osmótica se baseia na repulsão elétrica que acontece entre duas camadas elétricas, podendo atuar a distâncias maiores que a expansão intracristalina. No caso da Montmorilonita sódica a repulsão pode gerar a completa separação das camadas. A pressão de expansão gerada é da ordem de 2,0 MPa, significativamente menor que a expansão intracristalina. O que guia a expansão osmótica são as forças geradas pela diferença de concentrações entre os íons fixados eletrostaticamente na superfície do mineral e os íons da solução dos poros, como é mostrado na FIGURA 5.

FIGURA 4 Expansão intracristalina da Montmorilonita Sódica, MADSEN & MÜLLER (1989)

SIVAPULLAIAH (1987) estudou as variações do espaçamento basal das esmectitas em função do conteúdo de água intracristalina absorvida pelos cátions trocáveis e constatou que variam entre 1,2 a 2,0 nm. As isotermas de absorção da água mostram comportamentos diferentes entre as esmectitas sódicas e as cálcicas. A deficiência de cargas é compensada pelos cátions que se colocam na superfície do mineral onde a concentração é muito alta, decrescendo com o aumento da distância à superfície, como mostrado na FIGURA 5. A carga negativa da superfície do mineral e a nuvem de íons formam a chamada dupla camada elétrica difusa.

FIGURA 5 Efeito de expansão osmótica gerada pela maior concentração de íons no interior das duas placas de argila, em relação a solução do meio e o decaimento do potencial com aumento da distância, MADSEN & MÜLLER (1989)

As montmorilonitas cálcicas absorvem a maior quantidade d'água nos estados mais baixos de umidade relativa e menor para as umidade relativa mais altas, enquanto as sódicas apresentam comportamento contrário, absorvendo as maiores quantidades de água nos estágios de umidade relativa mais altas, como se observa na FIGURA 6. Segundo MERING* apud SIVAPULLAIAH (1987) as esmectitas cálcicas apresentam pequenos valores de expansão intracristalina. Porém a transformação da montmorillonita sódica em cálcica e/ou o incremento na concentração dos cátions na solução do solo pode resultar numa diminuição da espessura da dupla camada e na redução da pressão de expansão.

FIGURA 6 Isoterma de Absorção de água em Montmorilonita Sódica e Cálcica SIVAPULLAIAH (1987).

2.3 Procedimentos Para Medir Expansão

Existem vários métodos para determinar e quantificar a deformação e a pressão de expansão, tanto quando a amostra em estudo é saturada rapidamente ou quando se faz com sucção controlada. Todos eles têm com objetivo determinar tanto a tensão como a

* MERING (1946) On the hidration of Montmorillonite. Trans. Of Faraday Society, v. 42B, p. 205-219, apud SIVAPULLAIAH, P. V. (1987) Inter Layer Swelling of Na, Ca-Montmorillonite Clays. 6th. International Conference on Expansive Solis, New Delhi, India. 423-426 pp.

deformação uniaxial, e nos ensaios com sucção controlada a maioria é executada para determinar a deformação uniaxial com diferentes tensões de sobrecarga e de sucção.

2.3.1 Ensaios para determinar a pressão de expansão e a deformação uniaxial

Existem vários métodos de ensaio para determinar a pressão de expansão nos solos em ensaios edométrico, segundo são apresentados por PRESA (1984), JIMENEZ SALAS & ROY (1987), SCHREINER & BURLAND (1991), BASMA et al. (1995), FENG et al. (1998) entre outros e podem resumir-se em:

Sobrecarga ou Carregamento seguido de expansão (M1), Expansão sob diferentes sobrecargas (M2), Volume Constante (M3), Aparelho de LAMBE (M4), Ensaio edométrico duplo (M5), Ensaio de descarregamento usado na China (M6)

2.3.1.1 Carregamento seguido de Expansão (M1)

A amostra, em condições naturais de umidade, é colocada no anel de consolidação e aplica-se uma sobrecarga igual aquela gerada pela fundação da estrutura prevista sobre o solo. Em seguida a amostra é inundada e deixada expandir, quando finalizada a expansão carrega-se axialmente, em sucessivos incrementos, até atingir a espessura inicial da amostra. Este método foi descrito por JENNINGS & KNIGHT* apud SCHREINER & BURLAND (1991).

Neste método é possível fazer-se duas variações:

a) nenhuma sobrecarga é colocada na amostra e deixa-se expandir, denominando-se Expansão Livre. Se este método não é desenvolvido num edômetro, coloca-se uma banda de aço flexível para confiná-la lateralmente, sendo possível determinar, além da deformação axial, a deformação radial. Este procedimento é recomendado pela International Society Rock Mechanics (ISRM) segundo MADSEN (1999). Um esquema deste método se observa na FIGURA 7.

b) Se a amostra ensaiada em um edômetro, segundo processo descrito em a), depois da expansão é adensada. A pressão de expansão é a sobrecarga aplicada para atingir o volume inicial da amostra.

* JENNINGS, J. E. B. & KNIGHT, K. (1957) The prediction of total heave from the double oedometer test. Trans. South African Inst. Civil Eng. V 7, p. 285-291, apud SCHREINER, H. D. & BURLAND, J.B. (1991) A comparison of the three swell test procedures. in Geotechnics in the African Environment, BLIGHT et al (eds.) Balkema, Rotterdam

2.3.1.2 Expansão sob diferentes sobrecargas (M2)

São necessários três ou mais amostras com iguais condições iniciais, as quais se carregam axialmente com diferentes sobrecargas. Uma amostra é consolidada (ou adensada) para determinar os índices de vazios e obter-se a curva de conteúdo natural d'água. As amostras são inundadas e deixadas expandir. Este método foi descrito por HOLTZ & GIBBS (1956).

FIGURA 7 Aparelho para determinar a expansão livre, MADSEN (1999)

2.3.1.3 Volume Constante (M3)

A amostra é colocada no anel de consolidação e carregada com o valor da sobrecarga *in situ* ou um valor inicial mínimo no entorno de 25 kPa. Inunda-se a amostra, quando começa a expandir incrementa-se a carga para impedir a expansão. Assim continua-se até que o volume fique constante (igual ao volume inicial). Depois a amostra é consolidada ou adensada como é convencional duplicando o carregamento em cada incremento. Este método foi descrito por SULLIVAN & McCLELLAND* (1969) *apud* SCHREINER & BURLAND (1987).

* SULLIVAN, R. A. & McCLELLAND, B. (1969) Predicting heave of buildings on unsaturated clay. Proceedings 2nd International Research and Engineering Conference on Expansive Clays, Texas A & M. University, p. 404-420, *apud* SCHREINER, H. D. & BURLAND, J. B. (1987) Stress Paths Swellings of Compacted Soils under Controlled Suction, 6th International Conference on Expansive Soils 1-4 December, New Dheli, p. 155-159.

A International Society Rock Mechanics (ISRM) através do Comitê de Rochas Expansivas e do Comitê de Ensaios padronizou os ensaios para determinar a expansão livre e a pressão de expansão para rochas MADSEN (1999), sendo também usado para caracterizar solos expansivos.

2.3.1.4 Aparelho de LAMBE (M4)

Baseado no aparelho desenvolvido por LAMBE* (1960) apud Presa (1984), consiste em preparar três amostras deformadas de material passante pela peneira # 10 com diferentes teores de umidade e com energia de compactação diferente. Assim preparadas são colocadas no aparelho de Lambe e aplicada uma tensão de 10 kPa. Inunda-se a amostra e mede-se a pressão desenvolvida pelas amostras depois de duas horas, chamando a este valor “índice de expansibilidade”. Conhecido o “índice de expansibilidade” e usando a carta desenvolvida por Lambe determina-se a “mudança potencial de volume” ou PVC, uma medida semi-quantitativa do potencial de expansão do material.

2.3.1.5 Ensaio edométrico duplo (M5)

Dois espécimens idênticos são ensaiados. Um deles é adensado, depois de alcançado o equilíbrio em cada carregamento é incrementado a pressão vertical até completar o adensamento. O outro é inundado, sem carregamento, e deixado expandir totalmente. A diferença entre a altura inicial e a final para cada nível de tensão é definida como o potencial de expansão. A pressão de expansão é definida como a tensão necessária para que a deformação por adensamento da primeira amostra seja igual a deformação por expansão da segunda amostra.

2.3.1.6 Ensaio de descarregamento M(6)

A amostra, com umidade natural, é consolidada usando uma sobrecarga, dependendo do tipo de construção a ser realizada e superior ao valor estimado de pressão de expansão. Culminado o adensamento inunda-se a amostra, quando a expansão cessa

* LAMBE, T. W. (1960) The character and identification of Expansive Soils, Soil PVC meter. Federal Housing Administration, Technical Studies Program. FHA 701 apud PRESA, E. P. (1984) *Deformabilidad de las arcillas expansivas bajo succión controlada*. Madrid, Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. España

descarrega-se a amostra. A pressão de expansão é determinada sob a curva de descarregamento onde o índice de vazios é igual a valor inicial da amostra.

Os ensaios edométricos são os mais usados para determinação da expansão, ainda que alguns pesquisadores tenham usado o aparelho triaxial, segundo JIMENEZ SALAS & ROY (1987). Existem muitas formas de definir e determinar a pressão de expansão e os valores de pressão de expansão obtidos em cada um destes ensaios são diferentes sendo, em ordem decrescente, o valor de $M1b) > M4 > M2$. Segundo JIMENEZ SALAZ & ROY (op. cit.) uma precisa determinação da pressão de expansão não é muito importante dado que, em geral, não corresponde a nenhuma situação real.

BASMA et al. (1995) estudando solos da Jordânia, classificados como CH e MH segundo SUCS, compararam os valores de pressão de expansão dos métodos M1, M2, M3 e M5, variando alguns dos parâmetros dos solos estudados como conteúdo inicial de água e densidade seca em corpos de prova deformados, compactados mediante pisoteamento.

Alguns dos resultados obtidos são apresentados na FIGURA 8, onde se observa a influência do conteúdo inicial de água e a influência do conteúdo da fração argila das diferentes amostras, na pressão de expansão nos quatro ensaios. Observa-se que, com o aumento da umidade inicial a pressão de expansão diminui em todos os métodos aplicados.

No entanto com o aumento da densidade seca o valor de pressão de expansão aumenta como se observa na FIGURA 9. Além destes resultados os autores determinaram algumas equações de correlação múltipla, considerando os resultados obtidos com os diferentes métodos utilizados e alguns atributos dos solos tais como: porcentagem da fração argila (CF), umidade inicial (ω_i), densidade seca (γ_d) e atividade da argila (A). A seguir apresenta-se as principais correlações obtidas pelos autores:

a) Ensaio Expansão/Consolidação (Método 1)

$$\ln(p_{sc}) = 0.06CF + 5.24 A - 0.05 \omega_i + 0.082 \gamma_d - 6.99 \quad r^2 = 0.843$$

p_{sc} em kPa, CF (%), ω_i (%), γ_d (kN/m³)

b) Ensaio volume constante (Método 3)

$$\ln(p_{sz}) = 0.05CF + 3.12 A - 0.023 \omega_i + 0.13 \gamma_d - 8.92 \quad r^2 = 0.871$$

p_{sz} em kPa

c) Ensaio expansão em diferentes corpos de prova com diferentes sobrecargas (Método 2)

$$SP_r = 0.24CF - 0.21 \omega_i + 1.0 \gamma_d + 0.017p_0 - 14.87 \quad r^2 = 0.904$$

Onde p_0 é a carga inicial aplicada.

SP_r em (%), p₀ carga inicial aplicada (kPa)

d) Ensaio de expansão edométrico duplo (Método 5)

$$SP_d = 0.26CF - 0.20 \omega_i + 1.2 \gamma_d + 0.0033p_0 - 22.28$$

$$r^2 = 0.882$$

Onde p₀ e a carga inicial aplicada (kPa)

FIGURA 8 Variações nos valores de pressão de expansão segundo diferentes métodos de medição, BASMA et al. (1995).

Assim, avaliando os resultados obtidos nos diferentes ensaios determinaram que em todos eles o potencial de expansão decresce quando o peso unitário seco e o conteúdo de argila diminuem e /ou o conteúdo inicial de água e a sobrecarga no solo aumentam.

O ensaio de expansão e consolidação (M1) e com volume constante (M3) geram os valores maiores e menores, respectivamente, de pressão de expansão em todas as condições

ensaiadas. Nos demais ensaios propostos sempre obtém-se valores intermediários. BASMA et al. (1995) consideram que o ensaio de expansão restringida é o que melhor reproduz as condições de campo

FIGURA 9 Valores da pressão de expansão de amostras com diferentes conteúdo de argila e de densidade seca, BASMA et al. (1995)

2.3.2 Ensaio triaxial de trajetoria de tensões (TRIAXIAL STRESS PATH CELL)

AL-SHAMRANI & AL-MHAIDIB (1999) estudaram as variações que ocorrem nos diferentes ensaios para determinar a pressão de expansão nos solos, usando ensaios edométricos e triaxial de trajetórias de tensões (TRIAXIAL STRESS PATH CELL) usando o aparelho desenvolvido por BISHOP & WESLEY (1975), mostrado na FIGURA 10. Os autores fizeram diferentes ensaios onde variaram a pressão confinante e determinaram que,

com o aumento do confinamento, diminui a deformação axial como se observa na FIGURA 11.

FIGURA 10 Aparelho triaxial de trajetória de tensões, AL-SHAMRANI & AL-MHAIDIB (1999).

Determinaram também que os valores de deformação axial obtidos nos ensaios uniaxiais eram três vezes superior aos obtidos com o aparelho triaxial, como mostrado na FIGURA 12. Comparado com dados obtidos em ensaios de campo os valores obtidos com o ensaio triaxial coincidem melhor que os determinados com o ensaio uniaxial, como se observa na FIGURA 13. Segundo AL-SHAMRANI & AL-MHAIDIB (1999), algumas das limitações dos ensaios uniaxiais com inundação são:

- a) o valor de expansão determinado neste ensaio é várias vezes superior ao determinado em campo,

- b) as amostras ensaiadas são delgadas (aproximadamente 2 cm) e estão expostas a saturação total de maneira rápida, no entanto no campo a espessura é diferente e a exposição a água não é tão favorável

FIGURA 11 Expansão em função da pressão confinante, AL-SHAMRANI & AL-MHAIDIB (1999)

FIGURA 12 Comparação da expansão obtida em ensaios edométricos e triaxial, AL-SHAMRANI & AL-MHAIDIB (1999)

FIGURA 13 Comparação das medidas de expansão em ensaios edométricos, triaxiais e no campo, AL-SHAMRANI & AL-MHAIDIB (1999).

2.3.3 Ensaios com Sucção Controlada

PRESA (1984), estudando solos da Espanha em ensaios edométricos com inundação e com sucção controlada, com diferentes sobrecargas e umidades iniciais, determinou que os valores de expansão obtidos nos primeiros ensaios foram maiores, o dobro em alguns casos, que os obtidos com sucção controlada, como se observa nas FIGURAS 14 e 15.

JUCÁ et al. (1998) ensaiaram amostras indeformadas de diferentes profundidades de solos argilosos de Pernambuco, tanto pelo método de inundação rápida como de sucção controlada em ensaios uniaxiais. Observaram que os valores de expansão determinados com sucção controlada foram semelhantes, ao redor de 1 % independentemente da sobrecarga a que estavam submetidas as amostras. No entanto as amostras ensaiadas com inundação rápida mostraram valores de expansão de 6 a 2 %, sendo menores nas amostras com maior sobrecarga. Os valores de pressão de expansão obtidos em todas as amostras se mostrou independente da profundidade com valores de 110 a 160 kPa.

Segundo JUCÁ et al. (1998) o parâmetro principal que controla o comportamento a expansão do solo é a sucção.

FIGURA 14 Expansão livre por inundação de amostras com diferentes umidades iniciais, PRESA (1984).

FIGURA 15 Expansão livre com sucção controlada do mesmo material que na FIGURA 14 com umidade inicial de 24 %, PRESA (1984).

2.4 Métodos de Identificação de Solos Expansivos

Uma grande quantidade de pesquisas tem sido feitas para identificar e classificar os solos expansivos, surgindo numerosas técnicas para estes fins. As mesmas podem ser classificadas em 3 grandes grupos: indiretas, diretas e combinadas.

2.4.1 Métodos Indiretos

2.4.1.1 Indicadores Mineralógicos

Nesta classe de métodos identificam-se os minerais argilosos, buscando determinar a presença ou não de minerais expansivos, principalmente do grupo das esmectitas. Os métodos de identificação que podem ser usados são Difracção de Raios X (DRX), Análises Térmico Diferencial (ATD), Espectrometria Infravermelha (EI). Estas técnicas são indicadas como úteis por PRESA (1984), LÓPEZ et al. (1999), entre outros.

2.4.1.2 Indicadores relacionadas a Propriedades Físico-químicas

A capacidade de troca de cátions (CTC) pode ser determinada por dois métodos basicamente: método de extração com acetato de amônia, muito usado nas pesquisas agrônomicas de caracterização dos solos, e pelo método de azul de metileno a partir dos trabalhos de LAN, T. N. (1977) no Laboratoire Central des Ponts et Chaussées onde começou a ter aplicações nas áreas de geologia de engenharia e geotecnia. Anteriormente este método era usado nas áreas de cerâmica e de controle de bentonita para lamas de perfuração em poços de petróleo. Outros pesquisadores da França como TOURENQ & LAN (1989), MAGMAN & YOUSSEFIAN (1989), LAUTRIN (1989) e SCHAFFNER (1989), entre outros, adaptaram o ensaio para caracterizar solos, rochas e agregados, assim como sua aplicação para classificação geotécnica dos materiais e uso prático em projetos de engenharia civil.

PEJON (1992) adaptou este método para os solos brasileiros e achou boas correlações entre os valores obtidos neste ensaio e os índices da classificação MCT. COCKA & BIRAND (1993) utilizaram este método para classificar solos de diferentes origens na região de Ankara, Turquia. Os autores antes citados concordam que o ensaio de azul de metileno é simples, confiável, repetitivo e permite obter boas correlações com outros ensaios de caracterização de solos finos.

Usando o ensaio de azul de metileno associado a determinações de mineralogia das argilas e pressão de expansão, PEREIRA & PEJON (1999) afirmam que este método, além de ser rápido, se mostrou eficaz para identificar solos com potencial expansivo em mapeamento geotécnico, obtendo boas correlações entre o valor de VB e a expansibilidade medida no ensaio de expansão livre. MEISINA (2000) aplicou este método para caracterizar solos finos e rochas argilosas com potencial de expansão do norte de Itália, combinado-o com ensaios de pressão de expansão, Difração de Raios X, granulometria e limites de Atterberg. Determinou boas correlações entre o VB e a pressão de expansão nas amostras remoldadas e entre p_d e a pressão d e expansão das amostras remoldadas. A técnica de azul de Metileno será explicada no Capítulo 5 Materiais e Métodos.

O método de extração com acetato de amônia, basicamente, consiste em extrair os cátions trocáveis das argilas usando uma solução de acetato de amônia 1 M a pH 7, recolhendo a solução passada pelo material para determinar e quantificar os cátions presentes mediante análises químicas. Depois de extraídas as bases, a amostra é lavada com álcool, para logo ser saturado com uma solução 1 M de cloreto de sódio ou bário. Se recolhe a solução e determina-se por titulação a Capacidade de Troca Catiônica e mediante análise em espectrofotômetro da absorção atômica os cátions trocáveis.

2.4.1.3 Indicadores relacionados a Propriedades Físicas

A análise granulométrica, em particular a determinação da quantidade de partículas menores que 2 μm , ou fração argila, no total da amostra do solo, tem importância na identificação de materiais expansivos. Com o estudo das partículas do solo, mediante Microscopia Eletrônica de Varredura e de Transmissão, pode-se determinar as formas e arranjos entre os diferentes componentes do solo, sendo possível identificar os minerais de argila.

2.4.1.4 Indicadores relacionados a Propriedades Índices - limites de Atterberg, Massa Específica Seca (ρ_d)

Os valores dos limites de Atterberg: Limite de Plasticidade (LP), Limite Líquidez (LL), Limite de Contração (LC), Índice de Contração (IC) e o Índice de Plasticidade (IP) determinam qual é a capacidade de absorver água da fração fina do solo, em relação com as mudanças de comportamento do solo de semisólido a “plástico” e de plástico a líquido. Assim, podem ser usados como indicadores da possibilidade de acontecer processos de

expansão no solo em função da capacidade de absorver água. Muitos pesquisadores do fenômeno de expansão como LAMBE (1958), OLOO et al. (1987), entre outros consideram o índice de contração como um indicador muito adequado para determinar solos expansivos. No entanto SRIDHARAM & PRAKASH (1998), SRIDHARAM & PRAKASH (2000) estudando os fatores e os mecanismos que controlam o Limite de Contração dos solos concluem que o índice não depende das características de plasticidade mas sim é governado pela distribuição granulométrica e não pelo argilomineral dominante.

Outro parâmetro muito utilizado é o valor de p_d como é indicado por SEED et al. (1962), KOMORNIK & DAVID (1969), CHEN (1975), IYER (1987) e BASMA et al. (1995) entre outros. Estes autores concordam em que um aumento do p_d tem seu reflexo num aumento da Pressão de Expansão e da Expansão Livre dos solos argilosos. É um parâmetro de fácil obtenção para as amostras compactadas através do ensaio Proctor e das amostras indeformadas talhadas nos anéis de consolidação.

2.4.2 Métodos Combinados

2.4.2.1. Indicadores relacionados as Classificações Geotécnicas

Nos sistemas de classificação de solos AASHTO (ou HBR) e SUCS, os materiais classificados nos grupos (A-6, A-7) e (CL, CH, MH) são classificados como potencialmente expansivos, considerando os valores da granulometria e dos limites de Atterberg, segundo NELSON & MILLER (1992). Estes métodos e outros não comentados são resumidos na Tabela 3.

2.4.2.2 Uso de Cartas e Tabelas para Prever Expansão

2.4.2.2.a Carta de SKEMPTON (1953)

SKEMPTON (1953), estudando a relação entre o teor da fração argila e o índice de plasticidade verificou que os diferentes materiais estudados apresentavam linhas de tendências características e diferentes uns dos outros, como se observa na FIGURA 16.

Assim, deduziu que dois materiais com igual conteúdo de argila e com diferentes valores de índice de plasticidade tinham comportamento diferenciado em função do tipo de argila ou melhor da atividade da argila da amostra expressada pela relação entre o índice de plasticidade e o conteúdo da fração argila. Define a Atividade como:

$$A = \frac{IP}{C_2}$$

IP, índice de plasticidade, C_2 porcentagem da fração argila

Propôs uma alteração da classificação inicial em função da mineralogia da fração presente nas amostras, apresentada na TABELA 4.

TABELA 3 Métodos para identificar solos expansivos, NELSON & MILLER (1992)

Ensaio	Referencia	Propriedades investigadas	Parâmetros determinados
Limites de Atterberg	ASTM Ensaios 1999	Plasticidade, Consistência	IP = (LL - LP), LL, LP
Limite de Liquidez (LL)	ASTM D-4308	Limite superior de conteúdo de água do estado plástico	LL
Limite de Plasticidade (LP)	ASTM D-4318	Limite inferior de conteúdo de água do estado plástico	LP
Limite de Contração (LC)	ASTM D-427	Limite inferior de conteúdo de água da contração do solo	R – razão de contração Ls – contração linear
Conteúdo de Argila	ASTM D-422	Distribuição das partículas finas	Porcentagem menor a 2 micras
Ensaios Mineralógicos	Whiting (1964)	Mineralogia das partículas argilosas	Espaçamento Basal
Difração de Raios X	ASTM STP 479 (1970)	Características das dimensões cristalinas	
Análise Térmico Diferencial	Barshad (1965)	Comportamento ante o aquecimento	Amplitude e área de picos de reações térmicas
Microscopia eletrônica	McCronoe and Delly	Tamanho e arranjo das partículas de argila	Registro visual de partículas
Capacidade de troca de cátions	Chapman (1965)	Diferença de cargas e superfície ativas das argilas	CTC (cmol/kg)
Ensaio de expansão livre	Holtz & Gibbs (1956)	Expansão inconsolida e não confinada por inundação da amostra de solo seca ao ar	Expansão Livre = $((V_{umido} - V_{seco}) / V_{seco}) * 100 \%$
Medida da variação potencial do volume	Lambe (1960b)	Expansão unidimensional e presto de compactação, amostra deformada com controle das condições de compactação	SI (índice de expansão) e PVC (variação potencial de volume)
Ensaio de CBR	Yoder and Witezak (1975); Kassif et al (1969)	Expansão unidimensional da amostra deformada compactada a pressão de sobrecarga e conteúdo de umidade parcial	Porcentagem de Expansão de CBR (%)

FIGURA 16 Atividade das diferentes argilas da Inglaterra, SKEMPTON (1953).

TABELA 4 Variação da atividade do solo em função da mineralogia da fração argila, SKEMPTON (1953).

Grupo	Variação Atividade	Mineralogia da fração argila	
		Dominante	Secundária
Inativa	< 0.5	Q, Mi, C, K, I	Q, Mi, V, E
	0.5-0.75	I, K	V
Normal	0.75-1.25	I	H, E, K
Ativa	1.25-2.0	I	K
	> 2.0	E	

Legenda: Q Quartzo, I Ilita, C Carbonato, K Caulinita, Mi Mica, E Esmectita, V Vermiculita, H Haloisita.

2.4.2.2.b Carta de SEED et al. (1962)

SEED et al. (1962) estudaram o comportamento de solos preparados com diferentes proporções de caulinita, ilita e bentonita misturados com proporções de areia. Determinaram suas características, tanto de granulometria e limites de Atterberg, Atividade de SKEMPTON como seu comportamento expansivo quando eram compactados na umidade ótima e na máxima densidade, segundo a norma AASHTO, e colocados em anel de consolidação com 7 kPa de sobrecarga e inundados, deixando expandir.

Os autores observaram que o tipo de compactação influi no comportamento; quando compactado de forma estática a porcentagem de expansão é maior que quando

compactado por impacto (ou pisoteamento). Isto resultaria em diferentes estruturas ou arranjos na fábrica do solo. O comportamento nos solos preparados com diferentes proporções de minerais argilosos difere em relação a expansão, como se observa na FIGURA 17.

Além disto, propõem uma modificação do parâmetro Atividade definido por SKEMPTON, dado que os valores por eles obtidos diferiam, em parte, daqueles apresentados por este autor para os solos preparados a partir de misturas artificiais de diferentes materiais argilosos e

$$\text{Atividade SEED et al. (1962)} \quad A' = \frac{PI}{C - 10}$$

PI índice de plasticidade, C conteúdo de argila

e para os solos naturais dos Estados Unidos de América

$$A' = \frac{PI}{C - 5}$$

FIGURA 17 Porcentagem de expansão de materiais com diferenças na porcentagem e composição da fração argila, SEED et al. (1962).

Assim, usando esta relação e os valores de expansão livre das amostras preparadas, geraram a carta de classificação de potencial de expansão da FIGURA 18.

FIGURA 18 Carta de previsão de potencial de expansão em função da atividade e conteúdo da fração argila, SEED et al. (1962).

Desta maneira, para corroborar a utilidade desta carta foram caracterizados 27 solos fornecidos pela United State Bureau Reclamation (USBR) e como se observa na FIGURA 19 só 4 destes solos foram classificados incorretamente, pelo que deduziram que a carta pode ser usada com segurança como método de previsão. Os autores observam que a carta classifica razoavelmente bem, mas não é um procedimento para determinar a expansão esperada do solo em condições de campo. Para isto devem ser feitos ensaios exclusivos para esse propósito.

FIGURA 19 Classificação de solos naturais segundo a carta da FIGURA 3.8, SEED et al. (1962).

2.4.2.2.c Carta de VAN DER MERWE (1964) modificada por WILLIAMS & DONALDSON (1980)

Na década do 60, na África do Sul, foi desenvolvida uma carta de potencial de expansão por parte de VAN DER MERWE* apud WILLIAMS & DONALDSON (1980) para prever a expansão de argilas de origem lacustre e folhelhos alterados. Baseia-se o uso de parâmetros obtidos rotineiramente nos trabalhos de caracterização geotécnica de solos como IP e porcentagem de fração argila, assim como no conceito de Atividade do solo de SKEMPTON (1953) como se observa na FIGURA 20.

* VAN DER MERWE, D. H. (1964) The prediction of heave from the plasticity index and percentage clay fraction of soils. Trans. South Africa in Civil Engineers, v. 6, n. 5, p. 103-107 apud WILLIAMS & DONALDSON (1980) *Building on expansive soils in South Africa : 1973 - 1980*. Fourth International Conference of Expansive Soils. Denver, Colorado.

FIGURA 20 Carta de previsão de expansão de VAN DER MERWE (1964), apud WILLIAMS & DONALSON (1980).

Segundo WILLIAMS & DONALSON (1980) as previsões feitas com esta carta tem sido razoavelmente adequadas para as condições dos solos de África de sul, onde a maioria deles se acha com teores muito baixos de umidade. No entanto aplicado em outras regiões do mundo não tem dado resultados satisfatórios, quando aplicados a outros solos, conteúdos de umidade e climas mais úmidos.

Além dos fatos indicados, existem algumas dificuldades ou inconsistência na mesma carta de previsão como é a transição entre atividade baixa para alta e muito alta na região da linha A-A. WILLIAMS & DONALSON (op. cit.) consideram este limite não real pelo fato de que um aumento de 2 ou 3 % no conteúdo da fração argila faz com que o material considerado de alta a muito alta expansividade seja identificado como de baixa expansividade. Para corrigir este fato introduziram uma modificação na carta original, mas reconhecem que a correção não tem suporte de dados experimentais (FIGURA 21).

Outro problema associado é a presença de carbonatos e sulfatos nos solos argilosos. Propõem ainda, modificar o valor de IP em função do porcentagem da fração usada na determinação dos limites de Atterberg (geralmente < 425 micras) no total da amostra $IP (amostra\ total) = IP (fração\ X) \times ((massa\ da\ fração\ X) / massa\ amostra\ total)$.

FIGURA 21 Modificação da Carta de VAN DER MERWE, WILLIAMS & DONALSON (1980).

OLOO et al. (1987) compararam dados de diferentes autores e diferentes técnicas de determinação de expansão; acharam algumas dificuldades na hora de comparar os dados: algumas vezes a classificação do solo era omitida, outras a densidade de compactação era dada, em outros casos se referia a ela como a densidade padrão do método AASHTO. Consideram que existe um uso abusivo das cartas de previsão e que as diferentes cartas, usando os mesmos parâmetros, geram limites diferentes de classificação de solos expansivos.

Comparando os valores obtidos no ensaio de expansão com 7 kPa de sobrecarga, com diferentes graus de compactação, linhas de tendências muito grosseira mostraram que com aumento do LL e IP aumenta o valor da expansão, mas existe uma grande superposição dos dados para-se obter conclusões fiáveis. OLOO et al. (1987) afirmam que a confiança nos valores obtidos, usando os métodos de predição ou cartas, é muito baixa. Concluem que o parâmetro usado nas classificações de solos que melhor se adequa para obtenção de valores intrínsecos de expansividade é o limite de contração e recomendam o uso do Índice de Contração conjuntamente com a Atividade de Skempton ou a porcentagem da fração argila.

2.4.2.2.d Carta de Previsão para solos expansivos usada na Espanha.

SALINAS & OTEO (1989) revisaram e avaliaram os critérios mais comuns usados na Espanha na determinação do potencial expansivo dos solos, usando parâmetros indiretos como: limites de Atterberg, umidade natural, densidade aparente seca e úmida, índice de vazios, granulometria das frações finas, mineralogia, valor da expansão de LAMBE, pressão de expansão e expansão livre.

Buscaram achar correlação entre:

- Umidade natural com densidade, limites de Atterberg, pressão de expansão e expansão livre
- Conteúdo de carbonatos com limite de liquidez e índice de LAMBE
- Porcentagem da fração fina e argilosa com expansão livre
- Densidade(seca e úmida) com limites de Atterberg, índice de LAMBE e pressão de expansão
- Limites de Atterberg com índice de LAMBE

Os autores não obtiveram bons resultados, sendo a dispersão muito elevada. Por exemplo, verificam que o critério de atividade de argila (SKEMPTON, 1953) não é um critério confiável, por si só, para determinar a expansividade do solo, assim como, a carta de predição de SEED et al. (1962) não dá bons resultados para os solos espanhóis, sendo mais adequadas para estes solos a relação apresentado na FIGURA 22.

FIGURA 22 Carta de expansividade em função do limite de liquidez e da razão umidade/limite de liquidez, SALINAS & OTEO(1989).

Estes autores acham que é difícil estabelecer relações confiáveis a partir de parâmetros geotécnicos indiretos, os valores obtidos nestes métodos só podem ser orientativos. Consideram que para as condições dos solos da Espanha o critério exposto por SALINAS & OTEO (1989) é o que melhor se adéqua, relacionando o limite de liquidez e umidade natural para determinar o potencial de expansividade do solo FIGURA 22. Propõem o uso, para os solos da Espanha, das cartas de predição de pressão de expansão e expansão livre da FIGURA 23.

FIGURA 23 Cartas de predição de pressão de expansão e expansão livre em função do limite de liquidez e a umidade natural para os solos da Espanha, SALINAS & OTEO (1989)

2.4.2.2 5 Cartas de Previsão no Brasil

PEREIRA & PEJON (1999) analisaram as características expansivas dos materiais sedimentares da Formação Guabirotuba através de ensaios de caracterização mineralógica, granulométrica, de expansão livre e de pressão de expansão em amostras indeformadas. Em função dos dados obtidos e das correlações encontradas entre o valor de VB, obtido através

do método do azul de metileno, e da porcentagem da fração argila elaboraram as cartas de previsão de expansão livre (FIGURA 24) e da pressão de expansão (FIGURA 25). As áreas delimitadas nos gráficos foram de potencial de expansão: Muito Alto, Alto, Médio e Baixo. Os limites superior e inferior foram obtidos respectivamente a partir de misturas de porcentagens de montmorilonita e caulinita com areia.

FIGURA 24 - Representação dos dados de VB vs porcentagem da fração argilosa, com os respectivos valores de Expansão Livre (%) determinados para os materiais de 11 blocos indeformados e a separação de porções do material que apresentam potenciais expansivos distintos, PEREIRA & PEJON (1999).

FIGURA 25 – Valores de VB vs % da fração argilosa, com dados referentes aos ensaios de Pressão de Expansão (kPa) para as amostras dos 11 blocos indeformados PEREIRA & PEJON (1999)

Segundo os autores esta análise é preliminar, sendo necessário um maior número de amostras para definir melhor os limites. Acreditam que as correlações obtidas são boas e indicativas do potencial expansivo das amostras analisadas.

2.4.2.3 Uso de Tabelas

Além dessas cartas de predição de expansão existem diferentes tabelas combinando indicadores indiretos (LL, IP, LC, Índice de Contração, granulometria, valor n do SPT) com valores de pressão de expansão ou de expansão livre. HOLTZ & GIBBS (1956) apresentam a Tabela 5 combinando valores de teor da fração menor 1 μm e valores dos ensaios de consistência

Tabela 5 Determinação do potencial de expansão usando parâmetros indiretos, HOLTZ & GIBBS (1956)

Ensaio Índice			Expansão Provável (% de variação total de volume)	Grau de Expansão
% < 1 μm	Índice Plasticidade (%)	Limite Contração (%)		
>28	>35	<11	>30	Muito Alto
20-31	25-41	7-12	20-30	Alto
13-23	15-28	10-16	10-20	Meio
<15	<18	>5	<10	Baixo

CHEN (1975) usando dados dos solos expansivos da região das *Rock Mountain* (montanhas rochosas) nos Estados Unidos de América desenvolveu a Tabela 6

Tabela 6 Dados para estimar a mudança de volume provável para solos expansivos, CHEN (1975)

Passante # 200 (%)	LL (%)	N (SPT)	Expansão provável (% total de variação de volume)	Grau Expansão
>95	>60	>30	>10	Muito Alto
60-95	40-60	20-30	3-10	Alto
30-60	30-40	10-20	1-5	Medio
<30	<30	<10	<1	Baixo

MEISINA (2000) além dos parâmetros rotineiros em classificação de solos utilizou o Método de Azul de Metileno para determinar a CTC do solo e os valores de A_{cb} e VB, e

realizou ensaios de pressão de expansão com amostras remoldadas com o teor de umidade igual ao limite de contração e propos a Tabela 7

Tabela 7 Relações entre índices indiretos e potencial de expansão para solos do norte da Itália, MEISINA (2000)

VB	IP (%)	Pressão Expansão (kPa)	Potencial de Expansão / Contração
<2,5	<12	0-100	Baixo
2,5-4,5	12-35	100-300	Médio
4,5-9	35-45	300-500	Alto
>9	>45	>500	Muito Alto

Além das cartas de predição e das tabelas existem na literatura diversas equações para correlacionar os valores obtidos mediante índices como LL, IP, p_d , ω , etc. A seguir será apresentada a proposta de KOMORNIK & DAVID (1969) pelo fato de fazer uma abordagem integral do fenômeno. Os autores citados estudaram diversos solos argilosos de Israel e determinaram que as variáveis que governam a pressão de expansão são: o índice de vazios ou densidade e a superfície específica das argilas, considerando que além dessas variáveis a estrutura do solo e o grau de saturação (ou sucção) são também importantes.

Fazendo correlação múltipla entre LL, p_d , ω com a Pressão de Expansão medida acharam a seguinte equação:

$$\text{Log}P = 2,132 + 0,0208(LL) + 0,000665(p_d) - 0,0269(\omega)$$

$$r^2 = 0,60$$

$$\text{LL em \%}, p_d \text{ em g/cm}^3, \omega \text{ em \%} \text{ e } P \text{ em kg/cm}^2$$

No entanto correlacionado LL, p_d com a Pressão de Expansão o $r^2 = 0,51$. Considerando individualmente cada índice a melhor correlação foi obtida com LL com ($r^2 = 0,16$). Isto indica que a Pressão de Expansão não é só uma função das propriedades potenciais, mas também das condições iniciais do (p_d , ω e estrutura).

Além da conclusão dos autores, fica claro que o fenômeno de expansão nos solos deve ser considerado como a resposta de um sistema composto por diferentes partículas, com diferentes potencialidades de expansão, com um determinado arranjo estrutural e condições ambientais próprias e as interações entre os diferentes componentes, sendo o resultado final a gênese da expansão.

2.5 Mapeamento Geotécnico

2.5.1 Teoria dos Sistemas

A Teoria Geral dos Sistemas foi introduzida pela primeira vez por BERTALANFFY na área da biologia na década de 20 segundo BERTALANFFY (1977), mais só recentemente tornou-se visível a necessidade de um abordagem global na solução de problemas práticos ao mostrar-se insuficiente o esquema mecanicista dos estudos de causas isoladas ou tratamento por parte dos fenômenos estudados. A ciência clássica estuda uma entidade mediante um processo analítico que analisa cada uma das partes e depois reconstitui o todo. Este processo de análise depende:

1) do fato de não existir interações entre as partes ou que sejam muito fracas de maneira que possam ser desprezadas

2) as relações que descrevem o comportamento das partes sejam lineares, isto significa que a equação que descreve o comportamento do todo é da mesma forma que as equações que descrevem o comportamento das partes.

Na área de geociências existem muitos exemplo de sistemas, como a evolução do relevo ou Geomorfologia, os sistemas hídricos, o comportamento mecânico dos solos, a Paisagem (*Landscape*) entre outros. A paisagem (*Landscape*) é definida como uma percepção plurissensorial de um sistema de relações ecológicas segundo GONZALEZ BERNALDES (1981). Este conceito leva em si mesmo uma conotação de informação. Para GONZALEZ BERNALDES (op. cit.) o sistema de relações ecológicas pode ser dividido em duas componentes:

I) o Fenosistema ou Paisagem, conjunto de componentes perceptíveis a visualmente

II) o Criptosistema, como o complemento do Fenosistema, é aquilo que é de difícil observação, sendo necessário o uso de instrumento de medida ou observação.

Para compreender a Paisagem é necessário conhecer o Criptosistema, usando indicadores ou signos facilmente perceptíveis que permitem a passagem do Fenosistema ao Criptosistema segundo GONZALEZ BERNALDES (op. cit.). O caminho inverso também poderia acontecer, a partir da análise do Criptosistema, usando propriedades índices (através

de diferentes análises laboratoriais ou instrumentais) para caracterizar a paisagem quando não pode ser feito com indicadores visuais.

Os indicadores devem ser usados mediante um inventário sistemático de regularidade ou mediante formulações matemáticas, existindo nessas correlações e associações relações funcionais. Porém a Paisagem Natural é definida como uma estrutura conspícua de um sistema de interações com muita dinâmica segundo GONZALEZ BERNALDES (1981). Considerar a paisagem como um sistema permite examinar as propriedades exibidas pelo conjunto de elementos e suas interações, o que não seria possível mediante a dedução analítica por separado de cada um dos diferentes componentes do sistema.

A busca de indicadores para descrever a Paisagem muitas vezes é dada por tentativa e erro, quando não se tem experiência. Mais é possível a escolha adequada, quando existem estudos muito detalhados de poucos indicadores de um processo, fazendo uma análise que abrange globalmente o problema a partir dos componentes do sistema e suas interações. Assim poder-se-á realizar-se um enfoque multivariado onde o “objeto” ou “fenômeno” analisado é caracterizado por vários indicadores simultaneamente. Por outro lado a busca de padrões (*patterns*) na paisagem é de grande auxílio nos trabalhos de cartografia de solos ao simplificar e diminuir os estudos laboratoriais. Esta forma de trabalho foi inicialmente desenvolvida na área da pedologia por MILNE (1935), através do conceito de “Catena”, definido como uma unidade cartográfica conveniente, na qual se inclui uma seqüência ou repetição regular de perfis de solos associados a determinadas formas do relevo. Utilizando uma abordagem global nos estudos de solos e com o auxílio de indicadores da Paisagem foram desenvolvidas técnicas de sistematização e cartografia na Austrália pelo CSIRO e na antiga URSS, segundo GONZALEZ BERNALDES (1981). Segundo LOLLO & ZUQUETTE (1997) as técnicas de avaliação do terreno ou Paisagem usando Landform é uma forma muito eficaz nos trabalhos de mapeamento.

2.5.2 Metodologias Gerais

Os primeiros trabalhos de Mapeamento Geotécnico são do começo do século passado em Nova Iorque e na Alemanha, e serviram de auxílio para a planificação de uso do território segundo ZUQUETTE & KATAZAWA (1997). Nas décadas de 60 e 70 aconteceu o maior desenvolvimento de metodologias de Mapeamento Geotécnico, como a metodologia AIGE (1976), Metodologia Francesa (SAJENOU 1972), Estados Unidos (KIEFER 1967), metodologia australiana PUCE desenvolvida pelo CSIRO (GRANT 1972). Todas elas tem

como objetivo principal auxiliar no planejamento de uso e ocupação do território. Seu objeto de estudo é o meio físico, caracterizando os diferentes atributos como geologia, pedologia, hidrologia, hidrogeologia, geomorfologia.

O desconhecimento por parte do homem das características do meio físico tem levado a degradação ambiental de diferentes regiões do planeta, como resultado de um uso e ocupação inadequado do território. As metodologias antes citadas não contém um roteiro específico para caracterizar solos expansivos, assim sendo, descreve-se a seguir, apenas a metodologia de ZUQUETTE (1987) que apesar de ser de caráter geral foi usada parcialmente neste trabalho.

2.5.2.1 Metodologia Zuquette (Brasil)

No Departamento de Geotecnia da Escola de Engenharia de São Carlos foi desenvolvida e aperfeiçoada uma metodologia de Mapeamento Geotécnico por sucessivos trabalhos de ZUQUETTE (1987), ZUQUETTE (1993), ZUQUETTE et al. (1997). É produto da crítica e adaptação de diversas metodologias de mapeamento geotécnico para a realidade do Brasil. Propõe os princípios básicos para a obtenção da informação do meio físico, através da escolha dos atributos mais relevantes, necessários para a elaboração de diversas cartas e mapas, segundo o nível de detalhe requerido e a aplicação da mesma, assim como as relações e interdependência com outros componentes do sistema (biológico e antrópico)

2.5.2.1.a Princípios gerais

Na escolha dos atributos deve considerar-se as relações entre o “enfoque principal” e o meio ambiente. Os atributos que devem ser avaliados estão relacionados ou agrupados em diferentes componentes do sistema, tais como: águas (superficiais e subterrâneas), Geomorfologia (morfometria e morfologia), Geologia (substrato rochoso, evidências de processos, materiais inconsolidados), feições do tecnógenos, biológicos, climáticos, processos antrópicos superficiais recentes, sócio-econômicos.

Uma descrição detalhada dos atributos necessários para a elaboração destes documentos pode ser encontrada nos diversos trabalhos citados, serão apresentados só alguns atributos, como exemplo (TABELA 8) em função do uso em alguns dos tipos documentos

TABELA 8 Atributos a ser avaliados nos diferentes componentes, segundo mapas e cartas a serem gerados. Modificada de ZUQUETTE et al. (1997)

Componente	Tipo/Aspecto	Atributo	Finalidade Fundamental
Água	Superficiais	Infiltração	Básica
		Características físico-químicas	Básica
		Escoamento superficial	Erosão, zoneamento
		Canais de drenagem com fluxo permanente	Básica, zoneamento
	Subterrâneas	Aqüíferos (livres, confinados)	Zoneamento
		Áreas de recarga	Zoneamento
		Poços existentes	Básico
		Características físico-químicas	Básica
Geomorfologia	Morfometria	Declividade	Básica, zoneamento, erosão
		Direção e sentido da maior declividade	Básica, zoneamento
	Morfologia	Formas das encostas ou Landforms	Básica, zoneamento, erosão
Geologia	Substrato rochoso	Tipo rochoso/Grupo litológico	Básico
		distribuição	Básico, zoneamento
		Resistência mecânica	Básico
		Profundidade, espessura	Básico
	Materiais Inconsolidados	Origem	Erosão, básico, zoneamento
Componente	Tipo/Aspecto	Atributo	Finalidade Fundamental
	Materiais Inconsolidados	Origem	Erosão, básico, zoneamento
		Distribuição	Erosão, básico, zoneamento
		Expansividade (potencial)	Erosão, básico,
	Evidencias de processos	Movimentos de massa	Básico, zoneamento
		Erosivos	Básico, zoneamento
Feições do tecnógeno		Áreas de Aterros e entulhos	Básico, zoneamento
		Explorações minerais	Básico, zoneamento
Biológicos	Animais	Inventario	Análise ambiental
		Distribuição ou tendências	Análise ambiental
	Vegetação	Inventario	Análise ambiental
		Valor econômico ou preservacionista	Análise ambiental
Climáticos		Pluviosidade	Erosão, básica, zoneamento
		Evapotranspiração real e potencial	básica, zoneamento
		Distribuição temporal das chuvas	Erosão, básica, zoneamento
Processos Antrópicos		Áreas de irrigação	Zoneamento
		Barragens ou barramentos	Zoneamento
Socioeconômicos		População, saúde escolas	Análise ambiental
		Uso atual do solo (indústrias, dutos, etc)	Análise ambiental

2.5.2.1.b Tipos de documentos

As informações obtidas dos atributos levantados nos diferentes componentes dos sistemas são a base para a elaboração dos diferentes tipo de documentos (mapas e cartas).

Estes documentos são classificados em 8 classes:

- I) Fundamentais básicos, nestes documentos apresentam-se as diferentes características do meio físico (mapa de substrato rochoso, mapa de materiais inconsolidados, mapa de “*landforms*”, mapa de bacia hidrográficas, carta de declividade entre outras; biológico (mapa de flora e fauna) e socio-econômico (mapas de infra-estrutura urbana, mapa de densidade populacional, entre outros),
- II) Fundamentais de síntese, são documentos onde se reúne ou sintetiza-se toda a informação da região analisada, sem elaborar análises específicas como Mapa de Condições Geológico-Geotécnicas, Carta de “Constraint”
- III) Cartas derivas ou interpretativas, onde a informação dos documentos anteriores é analisada em função de uma condição predefinida, sendo a classificação e as unidades criadas um reflexo das condições do meio ante um tipo de ocupação ou uso como por exemplo Carta de Zoneamento Geotécnico Geral, Carta de Zoneamento Geotécnico Específico, Carta para Escavabilidade, Carta de potencial Agrícola, Carta de Potencial a Movimentos de Massa, Carta de Potencial de Minerais e Materiais para a Construção Civil, Carta para Fundações entre outros,
- IV) Cartas analíticas básicas, em função das informações recolhidas nos trabalhos ou documentos anteriores se avalia a probabilidade de ocorrência de processo naturais, gerando-se documentos como, Carta do potencial a erosão, Carta de possibilidades de ocorrer eventos perigosos (Hazard),
- V) Carta de diagnósticos de zonas degradadas, Cartas de prognósticos, obtidos os quatro tipos de documentos anteriores pode-se, e considerando as características das interações dos diferentes constituintes do meio, elaborar-se Cartas de Prognósticos de Risco, Carta de Vulnerabilidade das água, Cartas com áreas com restrição de ocupação específica. Etc.
- VI) Carta de Procedimentos, onde se detalha as formas de ocupação mais adequada e o controle dos Riscos
- VII) Carta de Viabilidade, essas cartas são elaborados para os usuários e com base em todas as informações do meio ambiente em função de diferentes tipo de

- ocupação como Viabilidade para Parques industriais, Viabilidade para Aterros Sanitários, Viabilidade para construção de Residenciais entre outras
- VIII) Cartas e orientações conclusivas, são documentos que devem auxiliar na tomada de decisões administrativas ou econômica com respeito a ocupação de uma região, considerando só os atributos do meio físico em função das necessidades futuras de uso e ocupação do território

2.5.2.1.c Princípios básicos da elaboração dos documentos

Para a elaboração destes documentos deve seguir-se algumas premissas básicas:

Uma Carta Interpretativa é um documento elaborado a partir das informações contidas num Mapa Fundamental Básico, por exemplo a Carta de Declividade é obtida a partir de um Mapa Topográfico,

Uma Carta Derivada é elaborada a partir do uso ou cruzamento de vários atributos obtidos de diferentes mapas básicos,

Deve-se usar uma base cartográfica adequada, com precisão nas referências geográficas e os documentos básicos devem apresentar precisão nos atributos que são cartografados em função da escala usada.

Na elaboração das cartas interpretativas e derivadas deve-se usar o maior número de atributos, de maneira que as informações nelas contidas sejam de utilidade para os usuários. Para a obtenção das cartas interpretativas ou derivadas pode-se usar diferentes mecanismos, tanto manuais como automatizados, como superposição simples, matriz, classes taxonômicas, árvore lógica, hierarquização, métodos estatísticos e métodos determinísticos.

Estes documentos devem fornecer aos usuários as informações sob as vantagens e as limitações do meio físico para permitir:

- a) A forma mais adequada de ocupação e hierarquizar as diferentes formas da ocupação,
- b) Minimizar os impactos negativos das mesmas,
- c) Maior vida útil dos investimentos e economia nas obras civis gerando economia no longo prazo,
- d) Adoção de medidas preventivas ante eventos de risco,
- e) Evitar sobreposição de intervenções técnicas com o mesmo fim,
- f) Evitar a necessidade de intervenções no futuro pelo desconhecimento das limitações do meio físico

2.5.3. Metodologias de Mapeamento de Solos Expansivos

Embora os solos expansivos ocupem grandes extensões em vários países do mundo e causem muitos prejuízos, são ainda poucas as metodologias de mapeamento geotécnico desenvolvidas especificamente para solos expansivos. A seguir descreve-se algumas delas.

2.5.3.1 Metodologia da Espanha

Na década dos 80 foi desenvolvida uma pesquisa conjunta entre o Instituto Geológico y Minero e o Centro de Estudio y Experimentación de Obras Públicas para realizar um Mapa Previsor de Riesgos de Expansividad de Arcillas en Espanha na escala 1:1.000.000 AYALA et al. (1986).

O objetivo do trabalho era fornecer informação básicas aos técnicos responsáveis para projetos de fundações sobre argilas expansivas.

2.5.3.1.a Critérios de caracterização

A metodologia utilizada baseou-se em quatro critérios:

- 1) Definir as unidades geológicas com alto conteúdo de argila, com o fim de classificar os solos com características mineralógicas, texturais e estruturais semelhantes.
- 2) Definir, usando o índice de Thornthwaite, as condições climáticas regionais. Este índice estabelece, basicamente, se uma região é climatologicamente deficitária em umidade.
- 3) Compilar as informações sobre ensaios de laboratório das unidades argilosas nos laboratórios de entidades pública e privadas
- 4) Revisão, por regiões, dos ensaios de expansibilidade, constatação de problemas derivados da expansão e classificação das diferentes unidades geológicas. No caso de existir referências de problemas construtivos referido a um tipo de solo, essa unidade foi definida com o maior risco de expansão.

Na FIGURA 26 observa-se o roteiro da metodologia de classificação das argilas expansivas da Espanha. Para classificar as características expansivas das unidades argilosas em quatro Classes ou Grau de Expansividade utilizou-se os valores dos seguintes ensaios, como é mostrado na TABELA 9: os valores dos limites liquidez médios e extremos, o valor

da variação volumétrica potencial (obtida mediante o ensaio de LAMBE), a expansão linear provável e a pressão de expansão.

FIGURA 26 Fluxograma da metodologia de classificação dos solos expansivos da Espanha, OTEO et al. (1987)

TABELA 9 Critérios de classificação dos solos expansivos da Espanha, OTEO et al. (1987)

Grau Expansividade	Limite Líquides (medio) (%)	Limite Liquidez (extremo) (%)	P.V.C. (ensaio de LAMBE)	Expansão linear provável (%)	Pressão de Expansão (kPa)
Nulo a Baixo	< 35	<20/<50	<2	<1	<25
Baixo a Moderado	35-50	20-30/50-70	2-4	1-4	25-125
Moderado a Alto	50-65	30-40/70-90	4-6	4-10	125-300
Alto a muito Alto	>65	>40/>90	6	>10	>300

Na determinação da Expansão linear provável foi utilizada como unidade de referência as “Peñuelas” de Madrid e ensaiou-se as mesmas com diferentes grau de umidade natural (ω_n) obtendo-se valores de expansão de 1% para $\omega_n = 22\%$, 1 a 4 % para $\omega_n = 19\%$, 4 a 10 % para $\omega_n = 16\%$ e maiores 10 % $\omega_n = 13\%$. Obteve-se a FIGURA 27 onde pode-se avaliar a pressão de expansão em função do limite de liquidez e da umidade natural.

FIGURA 27 Correlação entre Limite de Liquidez (LL) e Pressão de Expansão em função da umidade natural, para os solos da Espanha, OTEO et al. (1987)

Para delimitar as possíveis regiões com características semelhantes quanto a potencialidade de ocorrência de solos expansivos, fez-se a classificação do território espanhol em função das características geológicas, geomorfológicas e climáticas, identificando-se sete regiões fisiográficas semelhantes.

2.5.3.1.b Critérios de avaliação de potencial de expansão

Assim, utilizando este conjunto de critérios classificaram as unidade geológicas argilosas da Espanha em quatro categorias:

- I) Argilas não expansivas ou disseminadas numa matriz não argilosa
- II) Argilas expansivas subordinadas ou localizadas em zonas climáticas sem déficit anual de umidade

III) Argilas expansivas localmente dominantes e localizadas em zonas climáticas com déficit de umidade anual

IV) Argilas expansivas dominantes regionalmente e localizadas em pontos com problemas derivados da expansividade.

Em função da distribuição espacial dos dados obtidos das distintas unidades geológicas analisadas foi possível elaborar um mapa de risco de expansividade dos solos argilosos da Espanha, FIGURA 28. O risco de expansão vinculado a solos argilosos aumenta, globalmente, para o sul, devido às condições climáticas deficitárias em umidade e a maior frequência de argilas do grupo da Esmectita nos solos.

FIGURA 28 Mapa Previsor do Risco de Expansividade dos Solos Argilosos da Espanha, OTEO et al.(1987).

2.5.3.2 Mapeamento nos Estados Unidos

Neste país os solos com potencial expansivo tem uma grande distribuição areal. O trabalho de síntese, desenvolvido por OLIVE et al. (1989) foi feito a escala 1:2.500.000, sob a base do mapa geológico daquele país, as unidades que apresentavam minerais argilosos expansivos e o seu conteúdo quantitativo.

2.5.3.2.a Critérios de caracterização

Para realizar esta classificação foi utilizada uma ampla e variada gama de dados, provenientes de diversos organismos estatais e empresas construtoras, que gerou uma grande heterogeneidade, tanto no tipo como na qualidade da informação.

As fontes de informação foram divididas em três classes:

1) Informação obtida em relatórios de engenheiros de áreas de construções pequenas, contendo valores de ensaios de índice de plasticidade, limite de contração, pressão de expansão, determinados ensaios de laboratórios e descrições de campo, as quais foi possível atribuir propriedades relacionadas com argilas expansivas ou características expansivas.

2) Análises mineralógicas de amostras de unidades argilosas, caracterizadas mediante raios X e que apresentavam as percentagem dos argilo-minerais presentes na amostras. Estes dados foram obtidos em milhares de relatórios geológicos, onde se descrevia a coluna estratigráfica, a geologia da região e as ocorrências de valor econômico de depósitos de argilas, assim como de algumas informações de empresas de construção.

3) Descrições das características físicas e grau de alteração de depósitos de argilas em informes geológicos, onde fosse possível atribuir em termos descritivos tais como: alta plasticidade, tenacidade, alto conteúdo de água uma conotação indicativa de propriedades expansivas desses depósitos ou mantos de alteração.

Os autores reconhecem que a metodologia é muito subjetiva, porque uma parte importante da classificação está baseada na interpretação dos dados segundo a experiência dos autores. Desta forma, foram feitos os mapas de argilas expansivas dos 48 estados americanos, na escala já referida.

2.5.3.3 Mapeamento no Brasil

Recentemente PEREIRA & PEJON (1999), desenvolveram duas cartas de previsão de expansão (FIGURAS 24 e 25) para identificar solos argilosos expansivos usando o método de azul de metileno e ensaios de expansão livre e pressão de expansão.

O mapa de materiais inconsolidados foi dividido em duas unidades:

a) materiais residuais que apresentavam espessuras menores a 1.5 m e predomínio dos argilominerais do grupo das esmectitas,

b) materiais transportados com espessuras maiores que 1.5 m e com predomínio dos argilominerais do grupo das caulinitas.

Os materiais analisados foram agrupados em três classes em função de apresentarem potencial de expansão Muito Alto, Alto e Médio e elaborada a Carta de Predisposição a Ocorrências de Problemas Expansivos. Os materiais com Potencial Muito Alto são sedimentos argilosos, com raras intercalações de arcósio e associados com solos residuais e transportados com espessuras de 0,5 a 1.5m. Os materiais com Potencial Alto são sedimentos argilosos, com intercalações decimétricas a métricas de arcósio e associados com solos residuais e transportados com espessuras de 0,5 a 1.5m. Os materiais com Potencial Médio são sedimentos argilosos, com intercalações de decimétricas a métricas de arcósio e associados com solos residuais e transportados com espessuras de 1,5 a 3,0m.

Além disto foi considerado a posição do nível freático, já que quanto mais próximo da superfície maior a susceptibilidade de ocorrência de expansão e a declividade por ser muito comum, nas obras de engenharia, realizar-se cortes quando a declividade é alta, na execução das obras deixando o material exposto a ciclos de secagem e umedecimento.

2.6 Solos Expansivos em Argentina, Brasil e Uruguai

As unidades geológicas de origem sedimentar, junto com os solos residuais desenvolvidos sobre rochas básicas, são as principais fontes de solos argilosos com minerais expansivos. Em particular, muitas das unidades quaternárias no mundo, associadas as glaciações desse período, apresentam solos siltosos e silto-argiloso potencialmente com características expansivas.

Depósitos de silte e silto-argilosos de idade Quaternária são encontrados na Argentina, denominando-se genericamente “Loess Pampeano” segundo IRIONDO & KRÖHLING (1995)* apud QUINTANA CRESPO (1998), e tendo uma ampla distribuição nas planícies da região oriental desse país. São denominados na região de Córdoba como formação Loess Córdoba segundo QUINTANA CRESPO (1998), atingindo espessuras de 10 a 15 metros. Estes materiais são classificados segundo a AASHTO como A4 (60 %) e A6 (20 %), sendo só 8 % de materiais tipo A7-5 e A7-6 sendo o restante A1-A, A1-B, A2-4 e A2-6.

* IRIONDO, M., & KRÖHLING, D (1995) El sistema Eólico Pampeano. Comunicaciones Nueva Serie. V. 5. Museo Provincial Florentino Ameghino. Santa Fé, Argentina apud QUINTANA CRESPO, E. (1998) *Análisis estadístico del valor soporte de los suelos loessicos de Córdoba*. ENCUENTRO DE GEOTECNICOS ARGENTINOS GT'98. Córdoba, Argentina. Sesión II.6, p.1-10

Segundo FABBRI & PERINI (1982) na província (estado) de Santa Fé alguns desses solos apresentam características de solos expansivos com alto conteúdo de fração argila, IP = 40 % classificando estes materiais como CH segundo a SUCS e como A7-6 segundo AASHTO e obtendo-se valores de expansão no ensaio de CBR de 7 a 12 %.

TREVISAN (1987), determinou, em solos siltosos com 20 a 25 % de fração argila e classificados como CH segundo SUCS, valores de pressão de expansão, em amostras com umidade natural, de 170 kPa e porcentagem de expansão de 2 %. Nos mesmos materiais, com umidade do limite de contração a pressão de expansão obtida foi maior que 1300 kPa e porcentagem de expansão de 20 %.

No Brasil, a existência de solos com características expansivas tem sido identificada nas Bacias Sedimentares do Recôncavo Baiano e do Paraná principalmente. Na Bacia do Paraná tem sido reconhecidas características expansivas nas rochas e desenvolvidos das unidades permianas pertencentes ao Grupo Tubarão, em particular as Fms. Palermo e Irati segundo SILVA FILHO (1976) e FRAZÃO & GOULART (1976). Também tem sido identificado problemas nas Fms. Corumbataí e Rio do Rastro segundo o Mapa Geológico do Estado de São Paulo IPT (1981).

As unidades geológicas que apresentam potencialidade expansiva, segundo COSTA NUNES* apud PEREIRA (1999) são:

na Bacia do Recôncavo Baiano os Grupos Ilha e Santo Amaro e o Membro meio da Formação São Sebastião; na Bacia de Curitiba a Formação Guabirota, na Bacia do Paraná a Formação Taubaté em São Paulo, a Formação Morro Pelado em Santa Catarina e as Formações Rosário do Sul / Estrada Nova no Rio Grande do Sul.

PEREIRA & PEJON (1999) determinaram as seguintes características para os materiais da Formação Guabirota na região de Curitiba: alta proporção de fração argila (30 a 60 %), capacidade de troca de cátions superior a 70 cmol/kg, mineralogia da fração argila, (obtida pela Difração de Raios-X) variáveis de uma amostra para a outra (esmetita, illita e caulinita), Limite de Liquidez (LL) entre 42 a 112 %, Limite de Plasticidade (LP) entre 24 e 49 % e Índice de Plasticidade (IP) entre 18 e 66%. Em ensaios de expansão livre e pressão de expansão obtiveram valores de até 94 % e 4187 kPa nas amostras secas ao ar antes de umedecimento

* COSTA NUNES* (1992) Engenharia goetecnia: Fundações em terrenos expansivos. Rio de Janeiro, 1992, p 161-190 apud PEREIRA,E. (1999) *Estudo do potencial expansivo dos materiais argilosos da Formação Guabirota na região do Alto Iguaçu-Pr.* São Carlos Dissertação (Mestrado).Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo

No sul do Brasil JOST (1975) reconheceram na planície costeira do Rio Grande do Sul uma seqüência estratigráfica quaternária denominada Grupo Patos, composto pelas formações Graxaim e Chuí. A Formação Graxaim apresenta-se como depósitos continentais, separada em dois membros, sendo um deles conglomeráticos (membro Gravataí) e o outro areno-siltoso (membro Pelotas). A Formação Chuí deposita-se sobre a Formação Graxaim, sendo o ambiente de deposição transicional a marinho apresentando areias (membro Taim), argilas plásticas com conteúdo variável de silte (membro Capivari) e areias finas bem selecionadas (membro Itapoã). Reconhece-se na região de Porto Alegre, sedimentos finos de origem fluvial denominados Formação Guaíba.

BASTOS & ALVES (1996) num trabalho de cartografia geotécnica reconheceram diferentes unidades geotécnicas utilizando a metodologia proposta por DAVISON DIAS & MILITITSKY (1994). As unidades foram diferenciadas em função de dois tipos de ensaios geotécnicos e químicos. Entre os primeiros se contam granulometria, limites de Atterberg assim como os valores de Atividade definida por SKEMPTON (1953); enquanto nas segundas determinou CTC, saturação de bases e alumínio.

Na Carta Geotécnica de Solos Expansivos do Uruguai de NAHOUM et al. (1996), FIGURA 29, se apresentam as unidades geológicas que na superfície desenvolvem solos expansivos, entre as quais se acha a Formação Libertad.

Sobre as Formações Frayle Muerto, Mangrullo, Paso Aguiar e Yaguari se desenvolvem solos que tem como minerais argilosos esmectita, clorita e illita, as vezes teores de matéria orgânica e carbonato de cálcio variável.

A Formação Fray Bentos são siltitos arenosos e argilitos compostos por illita e esmectita, apresentado-se as vezes silicificado ou com altos teores de carbonato de cálcio. As Formações Libertad e Dolores são constituídas por materiais silto-argilosos e argilo-siltosos de origem continental, vinculadas as glaciações Quaternárias, composta a fração argila por illita e esmectitas, com conteúdo variável de carbonato de cálcio

A caracterização das propriedades expansivas da Formação Libertad (Uruguai), feito por Nahoum et al. (1996), mostram que os solos desenvolvidos sobre a Fm. Libertad e Dolores são classificados como CL (70 % das amostras) e CH (20 % das amostras) segundo a SUCS. Os valores obtidos nos ensaios de expansão livre foram de 6% para amostras inalteradas e de 8 % para amostras deformadas e valores de pressão de expansão de 150 a 200 kPa.

FIGURA 29 Carta de Solos Expansivos do Uruguai, NAHOUM et al. (1996)

Assim podemos observar que em diversas regiões da Argentina, Brasil e Uruguai existem solos potencialmente expansivos, justificando a necessidade de pesquisa, tanto de caracterização como de mapeamento Geotécnico destes solos.

Capítulo 3 CARACTERÍSTICAS GERAIS DA ÁREA DE ESTUDO

3.1 Introdução

A República Oriental do Uruguai localiza-se na região sul-oriental de América do Sul entre os paralelos 30° e 35° de latitude sul e os meridianos 53° e 58° de longitude oeste, tendo fronteiras com a República Argentina ao sul e oeste, e com a República Federativa do Brasil ao norte Figura 30. A superfície do território é de aproximadamente 180.000 km² e a população é de cerca de 3.200.000 habitantes. Segundo o Censo de 1996, 91% da população habita nas zonas urbanas e 9 % nas regiões rurais, sendo a maior concentração na área metropolitana da cidade de Montevidéu, com quase 1.800.000 habitantes.

3.2 Características Gerais da Área

A região de estudo está localizada na região suburbana e rural da cidade de Montevidéu (Uruguai), coordenadas 56° 05'02'' a 56° 10'26'' de longitude oeste e 34° 46'43'' a 34° 49'09'' de latitude sul. Abrange uma área de 32 km², Figura 30, e apresenta altitudes variando entre 6 a 56 m. Existe uma densa rede de ruas e caminhos abundantes sendo os mais importantes Cno. Maldonado, Avda. J. Belloni, Av. de las Instrucciones y Cno. Mendoza, permitindo um fácil acesso aos diferentes lugares de estudo. As duas bacias hidrográficas a do arroio Manga e a do arroio Mendoza são separadas pelo divisor de águas localizado na região central da área de estudo

O uso do solo atualmente é misto, compreendo regiões urbanas (regularizadas e favelas) e agrícolas (hortícola e vinhedos, principalmente), existindo só algumas indústrias de aço e estruturas metálicas, fábricas de tijolos e de concretagem. A região leste abrange uma pequena parcela da Zona Franca de Montevidéu.

Figura 30 Mapa de localização da área de estudo em Montevidéu, modificado de IMM-SIG e SGM.

3.3 Geologia Regional

A geologia do Uruguai compreende rochas com idades do Proterozóico inferior até depósitos sedimentares do Quaternário segundo PRECIOZZI et al. (1988), BOSSI & NAVARRO (1988), BOSSI et al. (1993), DINAMIGE (2000) (Figura 31).

O embasamento Precambriano é composto por rochas metamórficas e graníticas de “greenstone belt” do Proterozóico inferior, agrupados no Terreno Piedra Alta; gnaisses granulitos, quartzitos, piroxenitos, gnáisses, granitos e milonitos agrupados no terreno Nico Perez do Proterozoico superior e rochas supracrustais de uma sequência vulcão-sedimentar pertencente ao Cinturón Dom Feliciano composta por filitos, quartzitos, calcários, mármore, metavulcânicas básicas a intermediárias com grau de metamorfismo médio afetadas pelo evento tectono-magmático do Ciclo Brasileiro e intrudido por rochas graníticas, BOSSI et al. (1993).

Figura 31 – Mapa de Geológico do Uruguai (obtido da página WEB da DINAMIGE, 14 de setembro de 2000), modificado.

Finalizado o Círculo Brasileiro, os primeiros registros sedimentares são de idade devoniana e estão associadas a bacia do Paraná, representados pelas formações Cerrezuelo, Cordobés e La Paloma. A Fm. Cerrezuelo é composta por arenitos grossos e conglomerados com camadas e lentes de siltitos, arenitos finos e argilitos caulíníficos. Os ambientes deposicionais são fluviais e fluviais costeiros, com algumas regiões com lagoas. A Fm. Cordobés é composta por arenitos finos, siltitos e argilitos caulíníficos, sendo o ambiente de deposição marinho de águas pouco profundas e redutor. A Fm. La Paloma é constituída por arenitos finos a médios, siltitos arenosos e arenitos médios a grossos, correspondendo a ambientes litorâneos e continentais fluviais, segundo PRECIOZZI et al. (1988)

Existe um hiato ou não registro sedimentar no carbonífero, gerando-se no Permiano os depósitos vinculados ao período glacial que aconteceu no supercontinente Gondwana das Formações San Gregorio e Três Islas de idade Permiana inferior. A Fm. San Gregorio (Fm. Itararé do Brasil) apresenta uma grande heterogeneidade litológica composta por diamictitos, siltitos, arenitos e ritmitos. Os ambientes de deposição fluviais, costeiros e lacustres estão associados a climas frios, glacial e periglacial. Esta unidade se apóia discordantemente sobre o embasamento precambriano ou sobre as unidades devonianas. A Fm. Tres Islas são depósitos de arenitos com intercalação de camadas pouco espessas de siltito e argilitos, descontínuas, com matéria orgânica e depósitos de carvão. O ambiente de deposição é fluvial litorâneo e fluvio-deltaico em condições de clima temperado, segundo PRECIOZZI et al. (op. cit.).

Os depósitos sedimentares do Permiano médio e superior estão representados pelas Formações Frayle Muerto, Mangrullo, Paso Aguiar e Yaguari. A Fm. Frayle Muerto é composta por arenitos finos e muito finos, siltitos e siltitos arenosos depositados em um ambiente de plataforma marinha, pouco profundo e redutor. A Fm. Mangrullo (Fm. Itararé no Brasil) é constituída por argilitos e folhelhos betuminosos com níveis de carbonato, com cores cinza a pretos. A deposição destas litologias foi em ambientes de águas calmas e redutoras. A Fm. Paso Aguiar (Fm. Estrada Nova em Rio Grande do Sul, Brasil) é composta por arenitos finos e siltitos cinzas e cinza esverdeados. O ambiente de deposição subaquático, redutor com baixa energia. A Fm. Yaguari (Fm. Estrada Nova e/ou Rio do Rastro no Brasil) é constituída por arenitos finos a médios, com níveis conglomeráticos, carbonatos, siltitos e argilitos depositados em ambientes de águas pouco profundas e planícies de maré, evoluindo a ambientes fluviais no topo da unidade, segundo PRECIOZZI et al. (op.cit.).

De idade Triássica são os sills e diques basálticos da Fm. Quaró, localizados na região da bacia de Paraná.

Durante o Jurássico depositaram-se os sedimentos arenosos eólicos da Fm. Tacuarembó (Fm. Botucatu no Brasil) vinculados ao paleodeserto nesta região do Gondwana. São depósitos de arenitos finos a médios, com níveis de argilitos, associados a ambientes fluviais e lacustres, e arenitos médios a finos de origem eólica, PRECIOZZI et al. (1988).

Na época da ruptura do supercontinente Gondwana e da formação do proto Oceano Atlântico foram geradas as bacias de Santa Lucia, do Litoral, de Lagoa Merim-Pelotas e a bacia marginal de Punta del Este. Na bacia do Litoral, segundo AGUILAR GOSO, C (1999) existem derrames basálticos da Fm. Arapey (Fm. Serra Geral no Brasil) com espessuras de mais de 1000 m em alguns lugares. O preenchimento desta bacia foi completado durante o Cretáceo pela Fm. Guichón, composta de arenitos fino com intercalações de argilitos e conglomerados depositados em ambiente fluvial em clima semi-árido e a Fm. Mercedes-Asencio, Cretáceo superior, constituída por arenitos e conglomerados depositados em ambiente semelhante a de a Fm. Guichon em um clima provavelmente mais úmido. Estas unidades seriam correlatas dos Grupos Caiua e Bauru (Brasil),(AGUILAR GOSO, op. cit.).

Nas outras bacias aconteceram derrames basálticos subaéreos e subaquáticos da Fm. Puerto Gomes, assim como riolitos da Fm. Arequita e o complexo alcalino de Valle Chico. Na bacia de Santa Lucia local dos derrames da Fm. Porto Gomes, preenchidas pelos sedimentos arenosos e conglomeráticos com intercalações de argilitos da Fm. Mígues. Cretáceo superior depositaram-se sedimentos da Fm. Mercedes-Asencio.

Durante o Cenozóico, segundo GOSO (1965), o registro sedimentar está representado por diversas intercalações de depósitos continentais e marinhos. O registro começa com a Fm. Fray Bentos, no Oligoceno, composta por siltitos e/ou arenitos finos, com níveis de Loess e Lodolitas depositados mediante fluxo de lama, aportes fluviais e eólicos em clima semi-árido. Vinculado ao Mioceno identifica-se arenitos e areias de granulometria variável, depósitos areno-argilosos e argilas cinzas esverdeadas da Fm. Camacho, depositados em ambientes marinhos e litoral marinho. Durante o Pleistoceno depositaram-se arenitos e areias com granulometria variável, com níveis conglomeráticos e argilosos da Fm. Raigón. O ambiente de deposição é transicional a litorâneo na base, mudando a ambientes fluviais no topo. Depósitos da mesma idade acontecem no norte e leste do Uruguai denominados Fm. Salto e Paso del Puerto. São depósitos continentais de origem fluvial compostos, principalmente, por areia fina a média com níveis conglomeráticos.

Durante o Quaternário a Terra esteve submetida a variações climáticas, acontecendo períodos glaciais e interglaciais. No Uruguai os depósitos continentais, vinculados as épocas glaciais, são as Formações Libertad, objeto de estudo neste trabalho, e

Dolores. Nos períodos interglaciais, aconteceram ingressões marinhas gerando os depósitos das formações Chuy e Villa Soriano.

A Formação Libertad foi definida por GOSO (1965), como um silte muito argiloso contendo quase constantemente areia grossa, pedregulho e até seixos dispersos na matriz. A mineralogia da fração argila é fundamentalmente Ilita, apresentando quase constantemente Carbonato de Cálcio na forma pulverulenta ou em forma de concreções. A espessura máxima achada é de vinte metros, tendo sua extensão areal mais importante na região sul do país, segundo GOSO (op. cit.). A Fm. Dolores é muito semelhante com a Fm. Libertad, também de origem continental com menores teores de carbonato de cálcio.

A Fm. Chuy é composta por areias finas a médias de origem litorânea e corresponde aos depósitos gerados nos períodos interglaciais do Quaternário. A Fm. Villa Soriano é composta por sedimentos arenosos, argilo-arenosos e argilosos vinculados a ingressão do Holoceno.

3.4 Geomorfologia

A evolução do relevo no Uruguai acha-se condicionada pelas características lito-estruturais de seu território, já que ao não existir grandes altitudes pode-se assumir um clima uniforme para os diferentes períodos, segundo PANARIO (1988). O território é caracterizado em dez regiões morfo-estruturais como se pode observa na Figura 32, controladas cada uma delas por eventos tectônicos maiores e pelas diferentes litologias de cada região.

Segundo este mapa elaborado por PANARIO (op. cit.), a região de estudo localiza-se nas regiões da Fossa Tectônica de Santa Lucía e no Sistema de Planícies e Fossa da Laguna Merin. A Fossa Tectônica de Santa Lucía foi preenchida de sedimentos até o quaternário inferior pelo qual seu potencial de morfogênese é muito baixo, por isso a paisagem é composta por colinas de declividade suave, com exceção das bordas da Fossa onde a pente é maior. Sistema de Planícies e Fossa da Laguna Merin tem depósitos sedimentares quaternários e holocênicos, a maioria deles em forma de terraços. Apresenta uma paisagem praticamente horizontal com potencial morfogenético quase nulo. Será discutido no Capítulo 6 (Mapa de Landforms) que esta descrição não é concordante com as observações e identificações de campo e laboratório realizadas nesta Dissertação.

Figura 32 Mapa Geomorfológico do Uruguai segundo PANARIO (1988)

3.5 Pedologia

Os solos da região estudada estão compreendidos na Unidade Toledo da Carta de Solos do Uruguai escala 1:1.000.000 (MAP, 1975). Nesta unidade os solos dominantes (ocupam uma área maior que 50%) são Brunosols eutróficos / subeutróficos (saturados e subsaturados em bases) típicos (não tem Bt) / lúvicos (tem Bt) de textura franca, siltosa e silto-argilosa, com CTC de 19 cmol/kg no horizonte A e de 33 cmol/kg no horizonte B. Estes solos são classificados como Hapludoll na classificação pedológica dos USA.

Os solos associados (aqueles que ocupam entre 10 a 50 % da unidade) são Argisols subeutróficos melânicos (ocricos) abrupáticos de textura siltosa, com CTC de 11 a 17 cmol/kg no horizonte A e de 27 a 30 cmol/kg no horizonte B. Estes solos são classificados como Argiudoll na classificação pedológica dos USA.

Os solos acessórios (aqueles que ocupam menos do 10 % da unidade) são Brunosols subeutróficos/eutróficos álicos (Hapludoll), Planosóls subeutróficos melânicos (Argialboll) e vertisols rúpticos lúvicos (Udert), este último com valores de CTC no horizonte B de 33 a 48 cmol/kg.

Na Carta de Reconhecimento de Solos (MAP, 1982) das folhas La Unión (J-29) e La Barra (K-29) na escala 1:100.000 (Figura 33) foram identificadas 6 séries de solos,

combinados o relevo, o tipo de solo e a característica do grau de erosão no qual se acha, FIGURA 33. As referências para identificação estão na Tabela 10.

Figura 33 Carta de Reconhecimento de Solos da área de estudo, folhas La Unión (J-29) e La Barra (K 29) a escala 1:100.000, MAP (1982).

Tabela 10 Classificação dos Solos das folhas La Unión (J-29) e La Barra (K 29)

SERIE	RELEVO/MATERIAL GERADOR	SOLO
1 Al s L (e1)	colinas suaves com altiplanícies, desenvolvida na Fm. Libertad, com erosão moderada	Brunosoles eutróficos típicos siltoargiloso (Hapludoll) e brunosoles eutróficos lúvicos (Argiudoll)
1 Lf L(RF)B (e2)	Colinas fortes desenvolvidas nas Fm.. Libertad, (Raigón, Fray Bentos) e rochas graníticas e metamórficas do embasamento precambriano, com erosão moderada	Brunosol eutróficos típico silto-argiloso (Hapludoll)
1 Vf (L)B (e2)	Vales profundos desenvolvido nas Fm. Libertad e rochas graníticas e metamórficas do embasamento precambriano, com erosão moderada	Brunosoles subeutrófico Háplico areoso-franco (Hapludoll), Brunosol eutrófico típico silto-argiloso (Hapludoll), brunosoles éutricos lúvicos (Argiudoll)
1 V pc Ldo	Vales planos costeiros desenvolvidos nas Fm. Libertad e Dolores	Planosol subeutrófico Melánico siltoso (Argialboll)
1 Vf LF	Vales profundos sobre as Fm. Libertad e Fray Bentos	Brunosol eutrófico típico franco (Hapludoll)
2 Lf L(RF)B e2	Colina forte desenvolvido nas Fm. Libertad, (Raigón , Fray Bentos), rochas graníticas e metamórficas do embasamento precambriano, com erosão moderada	Brunosoles eutróficos lúvicos (Argiudoll)

3.6 Geologia da Região de Estudo

Segundo GOSO et al. (1989 a, b) a região está incluída nas folhas La Barra e La Unión (escala 1:100.000) e foram cartografadas as Fm. Montevideo, Fm. Fray Bentos, Fm. Libertad e Fm. Dolores como se observa na Figura 34, e descrita no item 3.3 Geologia Regional.

Figura 34 Mapa Geológico da área de estudo, folhas La Unión (J-29) e La Barra (K-29), GOSO et al. (1989 a,b)

3.7 Clima

Os dados do clima forem obtidos da página na WEB do Depto. de Meteorologia da Faculdade de Ciências, SEVEROVA (1997).

Uruguai acha-se numa região temperada, sendo sua temperatura média anual de 17° C. Seu clima é influenciado pelos anticiclones do Atlântico e do Pacífico. O primeiro deles gera uma circulação horizontal onde os ventos gerados tem direção principal NE ao E aportando massas de ar de origem tropical. O segundo faz que cheguem massas de ar de origem polar, gerando ventos de direção SW.

As chuvas médias anuais totais variam de um mínimo de 1000mm na região sul, na beira do Rio de la Plata, até 1400 mm no Nordeste na fronteira com Brasil. O mês mais chuvoso é março e o menos chuvoso dezembro. A umidade relativa anual é de 70 a 75 %, sendo o mês mais úmido julho com 80 % e o mais seco janeiro com 60 %.

O clima segundo a classificação de Köeppen apresenta as seguintes características: a temperatura do mês mais frio entre -3° e 18° C, isto faz que seja classificado como "Cfa".

CAPÍTULO 4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Materiais Estudados

4.1.1. Aspectos Geológicos da Fm. Libertad

A Fm. Libertad foi definida por GOSO (1965) como um silte com muita argila, com areia grossa, pedregulho e seixos dispersos. A vezes se torna muito arenoso e outras vezes muito argiloso, sendo constante a presença de carbonato de cálcio, em concreções ou em forma pulverulenta e dispersa. Sua cor é marron pardo, podendo apresentar pequenas concreções de ferro, assim como poros recobertos com uma película pouco espessa de cor preta, provavelmente produto da decomposição de raízes. A fração argila é constituída principalmente por ilita. Não existe uma estratificação clara e a presença de seixos e de areia dispersos na massa faz lembrar a um till ou “tilloide”, sendo denominado por GOSO (1965) como “Lodolita”. É comum a presença de fóssil de mamíferos dos gêneros TOXODON, TYPOTHERIUM, GLYPTODON, entre outros. Esta unidade tem contatos discordantes com as unidades do Terciário Fm. Raigón, Fm. Camacho, Fm. Fray Bentos e também com o Embasamento Pré-cambriano, pelo qual atribui-se uma idade quaternária para estes materiais. A existência de bancos de loess na base da unidade, a fauna continental de ambiente de estepe, a idade quaternária, portanto vinculável com processos acontecidos nos períodos das glaciações faz que seja considerado eólico uma das possíveis origens deste material fino. Outra fonte de materiais finos pode ser o produto da alteração de unidades mais antigas em um período mais úmido, logo retrabalhado por processos erosivos e depositados como fluxo de lama quase sem estratificação. Existem zonas, barrancas de Kiyú por exemplo, onde a Formação Libertad se apresenta com níveis de loess espessos como um sinal claro da fixação do pó aportado pelo vento. Para GOSO (1965) a unidade litoestratigráfica definida como Fm. Libertad pode estar constituída por mais de uma unidade cronoestratigráfica.

ANTON & GOSO (1974) indicam que a evolução do Quaternário uruguaio está muito influenciado pelos sistemas de circulação atmosférica do hemisfério sul. Por um

lado acha-se o sistema pacífico constituído por um anticiclone subtropical de altas pressões, gerando massas de ar frio e seco. Por outro lado o sistema atlântico é um anticiclone subtropical gerando massas de ar quentes e úmidas. Assim, durante o quaternário devem ter acontecido variações de domínio de um ou outro sistema. O domínio do sistema pacífico se corresponderia com as glaciações reconhecidas no hemisfério norte. Durante essas épocas os ventos do sudoeste seriam responsáveis pelos aportes de silte que foram retidos pela vegetação de estepe. Além dos aportes aloctonos não pode descartar-se o aporte por erosão de materiais de alteração das unidades geológicas anteriores. Logo após esses primeiros depósitos, teve início o domínio do sistema atlântico onde começam a dominar os processos pedológicos sobre estes materiais, assim como entalhes e dissecção do relevo; associado a este período acham-se depósitos da ingressão marinha Chuy. Um novo domínio do sistema pacífico com novos aportes cólicos e com a erosão em forma de movimentos de massas nas vertentes, gerou a acumulação de materiais denominados Fm. Dolores ou Fm. Libertad II.

GOSO (1986) considera que a base dos trabalhos desenvolvidos nas décadas anteriores são válidas ainda e que para melhorar o conhecimento estratigráfico deve-se realizar um ordenamento cronoestratigráfico, usando, além dos aportes da paleontologia e da datação absoluta, critérios geomorfológicos e pedológicos fundamentalmente. Indica que os depósitos "Libertad"(dois ou mais) cobrem amplas regiões, desenvolvendo formas de encostas convexo-côncavas as vezes plano inclinadas com declividade variáveis e são mapeados conjuntamente, mas é possível de separar usando critérios geomorfológicos. Por outro lado a Fm. Dolores corresponde a uma planície, unidade morfoestratigráfica, separada da Fm. Villa Soriano por uma escarpa de abrasão gerada durante a ingressão marinha que deu origem a estes depósitos arenosos.

4.1.2 Características Geotécnicas dos Materiais da Fm. Libertad

Segundo o Departamento de Geotecnia da Faculdade de Engenharia - UDELAR (1997) os materiais da Fm. Libertad são enquadrados na categoria de baixa resistência, com valores de 100 a 200 kPa de tensões admissíveis. Valores superiores são obtidos quando aumenta a presença de carbonato de cálcio ou de areia e pedregulho, assim como quando acontecem perdas significativas na umidade. São materiais facilmente escaváveis e praticamente impermeáveis, com coeficientes de permeabilidade inferiores a 10^{-9} m/s.

As características desta unidade geológica permitem fazer fundações diretas de estruturas leves(casas de 1 ou 2 andares) ou com estacas de pequeno porte. Para estruturas

de porte maior, recomenda-se ampliar a superfície de fundação, usar estacas de maior diâmetro e comprimento ou carregar sobre um estrato subjacente de maior resistência.

Existem outros trabalhos de maior detalhe como os desenvolvidos por GOSO et al. (1993) e SOUZA et al. (1998). Estes autores são coincidentes em classificar a Fm. Libertad dentro de uma Unidade de Materiais Finos.

Predominam os materiais silto-argilosos e argilo-siltosos, com percentagens superiores a 95 % passando na peneira # 40, e 80 a 95 % passando a peneira # 200, não se tem dados do porcentagem da fração argila.

Os valores dos limite de consistência obtidos por GOSO et al. (1993) variam de 18 a 75 % no Limite de Liquidez (LL), de 11 a 30 % no Limite de Plasticidade (LL) e 7 a 45 % no Índice de Plasticidade (IP). Enquanto os valores obtidos por SOUZA et al. (1998) variam de 25 a 90 % no Limite de Liquidez (LL), de 15 a 35 % no Limite de Plasticidade (LP) e 10 a 55 % no Índice de Plasticidade (IP).

Os materiais são classificados em sua maioria como CL e CH no SUCS e como A-7-5, A7-6 e A-6 no AASHTO (ou HRB). Estes materiais são classificados como solos com potencial expansivo, usando os critérios de NELSON & MILLER (1992). Existem algumas diferenças nos valores dos limites de consistência, os materiais estudados por SOUZA et al. (1998) apresentam valores maiores, na média, por conseguinte essa área poderia apresentar maiores problemas de solos com potencial expansivo.

Os valores de resistência obtidos por GOSO et al. (1993) a partir de valores de N (número de golpes do ensaio SPT) de 5 a 15, permite trabalhar com tensões admissíveis de 50-75 kPa até 150 –200 kPa. SOUZA et al. (1998) obtiveram valores médios de N de 14 a 16, crescentes com a profundidade, permitindo deduzir tensões admissíveis na faixa de 150 a 200 kPa.

O estudo desenvolvido por NAHOUM et al. (1996) é uma das poucas pesquisas sob o fenômeno de expansão dos solos da Fm. Libertad. Eles apresentam um mapa dos materiais das diferentes bacias sedimentares expondo as unidades geológicas com características expansivas (FIGURA 29). Entre esses materiais se acham os solos da Fm. Libertad.

A maioria das amostras estudadas forem classificadas no SUCS como CL (mais de 70 %), enquanto só 10 % são classificadas como CH. Nos ensaios de expansão foram avaliadas amostras indeformadas e deformadas em ensaios com diferentes sobrecargas desde 0 até um carregamento alto que permitisse extrapolar a expansão nula. As amostras deformadas foram preparadas por compactação estática, com densidades secas semelhantes as amostras indeformadas e com umidade entre 15 a 20 %.

Os valores obtidos nos ensaios de expansão livre das amostras indeformadas foram de 6 % e de 8 % para as amostras deformadas. As pressões de expansão obtidas foram semelhantes para os dois tipos de amostras, com valores da ordem de 200 kPa.

NAHOUM et al. (1996) concluem que as amostras por eles estudadas deformadas e indeformadas, comportam-se de forma semelhante para sobrecargas altas e obtiveram valores diferentes para expansões livres. Os ensaios foram realizados com teores de umidade de 15 a 20 %, revelando pouca incidência no resultado final da expansão esta variação de umidade.

4.2 Métodos

4.2.1 Técnica de Avaliação de Terreno e Mapeamento Geotécnico

Desde várias décadas até o presente, tem se desenvolvido técnicas para avaliar as condições naturais do meio físico a custos baixos para o uso e planejamento de ocupação do território, sendo a técnica de avaliação de terreno (*Terrain Evaluation*) em termos de homogeneidade de feições de relevo e dos materiais a elas associados (substrato rochoso e materiais inconsolidados) muito utilizada. Esta técnica permite fazer o zoneamento do meio físico com vistas ao mapeamento geotécnico, segundo LOLLO & ZUQUETTE (1997).

A técnica consiste em dividir a área de estudo em unidades cada vez menores, dependendo do objetivo e a escala de trabalho, usando imagens de sensores remotos (fotos aéreas preferivelmente) e trabalhos de campo gerando um zoneamento de unidades com heterogeneidades mínimas. Essa divisão em unidades menores do terreno deve ser feita em função das feições ou formas do terreno (Landform). O conceito de Landform adotado por LOLLO & ZUQUETTE (1997) é um conceito operacional com conotação exclusivamente fisiográfica, onde um Landform é uma feição do terreno originada a partir de processos naturais e distinguível das porções vizinhas (outros Landforms) em pelo menos um dos seguintes elementos de identificação: forma e posição topográfica, frequência e organização de canais, inclinação das vertentes e amplitude de relevo”. Os autores propõem o uso de três níveis hierárquicos de Landform, sistema de terreno (land system), unidade de terreno (land unit) e elemento de terreno (land element).

Depois de realizado o zoneamento é necessário fazer a caracterização dos materiais (rochosos e inconsolidados) associados a esses Landforms, usando trabalhos anteriores de caracterização geotécnica e executando ensaios em campo e laboratório.

Os resultados obtidos da aplicação desta técnica são dois, segundo LOLLO & ZUQUETTE (1997): o Mapa de Landforms onde se apresentam as diferentes feições de terreno nos diferentes níveis hierárquicos e as interpretações das condições geotécnicas previstas (substrato rochoso e perfil de alteração de materiais inconsolidados) para cada Landform e por outro lado o Mapa de Condições Geotécnicas Gerais, onde são representadas as unidades geotécnicas obtidas da análise das unidades de terreno e dos ensaios de caracterização geotécnica dos materiais da região.

Para a elaboração dos documentos cartográficos foram consideradas as recomendações de ZUQUETTE et al. (1997), escolhendo os componentes do sistema que são importantes para este estudo. Os componentes considerados foram Água, Geomorfologia e Geologia, e os atributos considerados foram: poços existentes, declividade, landform, formas das encostas, litologia (profundidade, espessura) materiais inconsolidados (origem, distribuição, expansibilidade).

Avaliados esses atributos serão elaborados os mapas básicos de: Documentação, Topografia, Unidades Geológicas Superficiais, Landforms. As cartas derivadas: Declividade, obtida a partir do mapa topográfico digitalizado em Autocad 13 e processado no programa Idrisi 2.0. Com os mapas básicos e dos dados de campo e dos ensaios de laboratório foi possível avaliar os atributos mais importantes para gerar os Mapas de Potencial de Expansão.

Os documentos cartográficos usados foram as cartas topográficas 15, 16, 17, 24, 25 e 26 do departamento de Montevideu escala 1:10.000 digitalizadas em Autocad R13 pelo "Servicio de Información Geográfico" SIG da Intendencia Municipal de Montevideo (IMM); as fotografias aéreas escala 1:10.000 do ano 1991 do serviço fotográfico de Força Aérea do Uruguai (FAU). A informação de base da geologia da área foram as Cartas Geológicas escala 1:100.000 La Unión GOSO et al. (1989, a) e La Barra GOSO et al. (1989, b).

4.2.2 Coleta das Amostras

A amostragem de materiais deformados foi realizada usando um trado helicoidal com um equipamento motorizado (de 16 HP), com capacidade para realizar furos de até 6 metros de profundidade (FIGURA 35). As amostras foram coletadas de metro em metro, sendo simultaneamente realizado uma identificação visual-táctil na hora da amostragem. A maioria das amostras foi obtida desta maneira, sendo que algumas amostras foram retiradas em cortes de taludes de estradas ou pedreiras.

Depois de realizados e interpretados os resultados dos ensaios de caracterização, procedeu-se a retirada de amostras indeformadas em zonas onde havia sido identificado

diferentes materiais em função da granulometria, limites de Atterberg e CTC. Para realizar a amostragem indeformada foi utilizado um equipamento desenvolvido no Departamento de Geotecnia de Faculdade de Engenharia da Universidade da República Oriental do Uruguai (FIGURA 36). O equipamento, simplificado, consiste em duas barras de reação ancoradas um metro no terreno e uma trave fazendo a união entre elas. O amostrador é colocado na profundidade de amostragem e com um macaco realiza-se uma reação na trave, o que permite cravar o amostrador. Desta maneira obtém-se amostras do diâmetro do edômetro (~70 mm) e de 0.10 a 0.14 m de altura. As amostras obtidas foram envolvidas com várias capas de filme de nylon e colocadas em câmara úmida até a execução dos ensaios.

4.2.3 Ensaios

4.2.3.1 Granulometria, Limites de Atterberg

A preparação dos materiais estudados para a realização dos ensaios de caracterização foi feita seguindo as recomendações da norma brasileira NBR 6457. A análise granulométrica foi determinada seguindo as recomendações da norma brasileira NBR 7181, os limites de liquidez e plasticidade foram obtidos seguindo a norma brasileira NBR 6459 e 7180, a massa específica dos sólidos foi feita segundo a norma brasileira NBR 6508.

4.2.3.2 Determinação da CTC

A capacidade de troca de cátion foi obtida pelo Método do Azul de Metileno, proposto por LAN (1977), LAUTRIN (1989) e modificado por PEJON (1992). Neste trabalho foi usado o método da mancha no papel de filtro e será descrito a seguir. A amostra de solo é preparada segundo a NBR 6457, passada na peneira # 40 (determina-se a umidade). Pesa-se entre 1 e 1.5 g. de solo e coloca-se num backer de 250 ml com 10 a 20 ml de água destilada e mantém-se em suspensão com auxílio de um agitador magnético. Agrega-se 4 ml de uma solução de azul de metileno de concentração conhecida (5 g/l). A suspensão é agitada sem parar e depois de 3 minutos retira-se uma gota da suspensão e coloca-se em papel de filtro (Whatman 42 ou similar). Se a mancha é nítida, sem alo ou aureola, adicionasse 4ml de solução, repete-se o processo até que a auréola apareça. Quando isto acontece espera-se 3 minutos mais, retira-se outra gota e coloca-se no papel de filtro. Se a mancha é nítida o ensaio esta concluído. Se a auréola da mancha desaparece, adiciona-se a metade do volume da solução que foi adicionada no passo anterior. Espera-se 3 minutos e retira-se uma gota e coloca-se no papel de filtro.

FIGURA 35 Trado usado para retirada de amostras deformadas

FIGURA 36 Foto do amostrador e do sistema utilizado para retirada de amostras indeformadas.

Se a mancha é nítida sem alo ou aureola adiciona-se o mesmo volume da solução, repete-se o processo até que a aureola apareça. Quando isto acontece, espera-se 3 minutos mais, retira-se outra gota e coloca-se no papel de filtro. Se a mancha continua o ensaio está concluído. Se desapareceu, se diminui a metade o volume da solução a adicionar, assim até que a mancha com auréola continue depois de 6 minutos de agitação sem adição de solução, dando assim por concluído o ensaio.

Anotado o gasto da solução de azul de metileno pode calcular-se os seguintes parâmetros:

Capacidade de Troca de Cátions CTC (cmol/kg)

$$CTC = \frac{V \times C \times 100}{M}$$

onde V (ml) - volume gastado da solução de azul de metileno, C (N)- concentração da solução de azul de metileno (em normalidade), M (g)- Massa de solo seco

Superfície Específica SE (m²/g)

$$SE = \frac{A \times N \times m}{M \times 1000} \times V$$

onde A- área da face da molécula de azul de metileno (130), N- número de Avogadro, m- massa de azul de metileno seco (g), Mam- massa molecular do azul de metileno na forma anidra, V- volume gasta da solução de azul de metileno (ml), M- massa do solo seco (g)

O valor de Adsorção de azul de metileno (VB), é a massa de azul de metileno necessária para cobrir com uma camada monomolecular 100 g de massa de solo.

$$VB = \left(\frac{V \times Cs}{1000} \right) \times \frac{100}{M}$$

onde V (ml)- volume gastado da solução de azul de metileno, Cs (g/l)- concentração da solução de azul de metileno, M (g)- massa do solo seco

Índice da atividade da fração argila (A_{cb})

$$A_{cb} = \frac{100 \times VB}{C_2}$$

onde C_2 -porcentagem da fração argila no material ($< 2 \mu\text{m}$)

4.2.3.2 Difração de Raios X

Neste caso toma-se entre 1.5 e 2 gramas de material passante na peneira 200 e coloca-se num backer de 250 ml com 40 ml de defloculante (Hexametáfosfato de sódio 45.7 g/l) e agita-se com ultra-som durante 15 minutos. Deixa-se 24 horas em repouso, acrescenta-se até 200 ml de água destilada e agita-se novamente durante 15 minutos. Deixa-se decantar as partículas maiores e segundo pela lei de Stokes calcula-se o tempo necessário para que nos dois centímetros superiores fique só partículas de fração argila. Depois desse tempo, toma-se uma alíquota com uma pipeta nos dois centímetros de profundidade e coloca-se em um porta objetos de vidro (lâmina) para obter 3 amostras para os tratamentos normal, glicolada e aquecida a 550° C. As amostras foram analisadas usando um Equipamento Phillips 1140 com radiação de tubo de cobre. A amostra normal foi analisada com varredura de 4 a 30 °, e as amostras glicolada e aquecida com varredura 4 a 20 °. A identificação dos argilominerais foi realizada usando as Tabelas de BROWN & BRIDLEY (1980)

4.2.3.3 Ensaios de Determinação de Expansão

Os ensaios de expansão livre e pressão de expansão foram desenvolvidos seguindo as recomendações da International Society of Rocks Mechanics (ISRM) proposto por MADZEN (1999), com algumas modificações. Como a expansão livre considerou-se a expansão axial, confinando-se lateralmente a amostra impedindo a expansão lateral, no anel de consolidação. No caso do ensaio de pressão de expansão as amostras foram carregadas inicialmente com 5 kPa em vez de 25 kPa como indica por MADSEN (1999), já que o material estudado é muito deformável.

Em todas as amostras antes da execução do ensaio determinou-se a umidade, diâmetro e altura, a massa, realizando também um registro fotográfico de algumas delas com características diferenciais, por exemplo presença de carbonato, FIGURA37. Para cada ponto

analisado foram talhadas entre 3 e 4 amostras, dependendo da fraqueza do material no momento de talhado. Duas amostras foram submetidas a ensaios de expansão livre e pressão de expansão com a “umidade de equilíbrio”, enquanto as outras foram deixadas, para secar ao ar, na sombra num gabinete, por três ou 4 semanas, até obter-se peso constante. Em seguida foram submetidas a ensaio de expansão livre e de pressão de expansão.

FIGURA 37 Moldagem do corpo de prova para ensaio de expansão. Observe-se o detalhe das concreções de carbonatos, de cor branco.

FIGURA 38 Contração lateral da amostra 40-3 depois de seca ao ar

As amostras secas ao ar sofreram contração lateral e vertical (FIGURA 38); para evitar a desagregação do material quando inundadas, foi preenchido o espaço entre a amostra e a parede do anel com areia fina, FIGURAS 39 e 40.

FIGURA 39 Amostra 40-3 seca ao ar no anel de consolidação e preenchida com areia fina para completar o espaço até a parede do anel.

FIGURA 40 Amostra 45-3 seca ao ar no anel de consolidação e preenchida com areia fina para completar o espaço até a parede do anel.

Além dos ensaios com amostras indeformadas procurou-se determinar o comportamento com respeito a expansão, controlando-se os parâmetros mais influentes no fenômeno, complementando desta forma o conhecimento das características de expansibilidade da Fm. Libertad. Foram selecionadas diferentes amostras para cobrir diferentes valores de CTC do solo (28, 35, 37 e 44), compactadas de forma estática no anel de consolidação (70 mm de diâmetro e 2 cm de altura), usando uma prensa com capacidade de carregamento de 5 toneladas, preparadas para obter corpos de prova com diferentes ρ_d (1,40; 1,55 e 1,70 g/cm³) e teor de umidade constante de $\omega = 15\%$.

Colocadas nos consolidômetros e inundadas, a Pressão de Expansão foi obtida pelo método proposto por MADSEN (1999).

CAPÍTULO 5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos nos ensaios de caracterização das amostras, assim como os ensaios de medida da expansão

5.1 Ensaios de Caracterização

Na TABELA 11 apresenta-se os resultados destes ensaios de caracterização que serão discutidos a seguir.

5.1.1 Análise Granulométrica

Escolhe-se para apresentar as variações granulométricas das amostras da Fm. Libertad o diagrama ternário da FIGURA 41 por refletir de forma clara e simples as diferentes classes (ou grupos) granulométricas.

Observa-se a concentração das amostras na faixa de 0 a 20 % de tamanho material areia, 40 a 65 % no conteúdo de silte e de 30 a 57 % de argila, e pode-se identificar ou agrupar em 2 Famílias com 3 e 2 subclasses, TABELA 12:

TABELA 12 Valores limites das diferentes Famílias granulométricas

	Família 1-A	Família 1-B	Família 1-C	Família 2-A	Família 2-B
areia (%)	0 a 12	0 a 10	0 a 12	10 a 20	15-25
silte (%)	55 a 75	45 a 55	35 a 45	40 a 50	28-54
argila (%)	22 a 35	40 a 50	50 a 60	37 a 47	22-58

As Famílias F-2-A e F-1-B são as que apresentam maior número de integrantes e no segundo lugar as Famílias F-2-A e F-1-C. Exemplos das curvas granulométricas da cada família é apresentado na FIGURA 42.

TABELA 11 Análise Granulométrica, Massa Específica dos Sólidos, Umidade natural, Limites de Atterberg, Capacidade Troca de Cations

Amostra	Umidade natural (%)	ρ_s (g/cm ³)	Granulometria			Limites Atterberg			CTC (método Azul de Metileno)					
			Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)	LP (%)	LL (%)	IP (%)	CTCsolo (cmol/kg)	SEsolo m2/g	VB	Acb	CTCarg (cmol/kg)	Searg (m2/g)
9	12	2,826	76	53	23	25	44	19	19,3	151	6,2	26,8	84	656
10	14	2,835	91	58	33	18	43	25	22,4	175	7,1	21,7	68	530
12	13	2,859	94	55	39	22	52	30	20,1	157	6,4	16,5	52	403
18-2	9	2,885	100	77	23	20	43	23	26,6	208	8,5	37,0	116	905
18-3	11	2,894	83	50	33	20	38	18	25,4	198	8,1	24,5	77	601
26-1	30	2,875	89	43	46	22	59	37	37,0	289	11,8	25,6	80	627
26-2	34	2,894	90	39	51	23	58	35	42,0	328	13,4	26,3	82	642
26-3 **	25	2,908	87	43	44	23	60	37	44,0	344	14,1	31,9	100	781
26-4 **	19	2,892	84	42	42	22	63	41	43,0	336	13,7	32,7	102	799
27-1*	23	2,826	76	54	22	17	43	26	18,1	142	5,8	26,3	82	643
27-2*	24	2,805	54	31	23	15	42	27	20,3	159	6,5	28,2	88	690
33-1	20	2,910	91	50	41	23	55	32	21,0	164	6,7	16,3	51	399
34-1	18	2,895	98	67	31	21	38	17	27,7	216	8,8	28,5	89	698
35-1	19	2,856	96	50	46	26	65	39	35,3	276	11,3	24,5	77	600
35-2	19	2,871	94	54	40	23	56	33	31,8	248	10,1	25,4	79	621
35-3	18	2,892	98	53	45	24	63	39	29,4	230	9,4	20,9	65	511
35-4	20	2,903	98	52	46	24	63	39	35,4	277	11,3	24,6	77	602
35-5	21	2,890	97	43	54	28	76	48	47,3	369	15,1	28,0	88	684
35-6	20	2,915	88	35	53	22	66	44	51,4	401	16,4	31,0	97	758
36-1	11	2,833	92	58	34	21	50	29	15,7	123	5,0	14,8	46	361
36-2	11	2,845	83	27	56	21	61	40	23,7	185	7,6	13,5	42	331
36-3	15	2,829	84	45	39	22	60	38	35,7	279	11,4	29,2	92	715
37-1	10	2,859	94	55	39	23	53	30	20,3	159	6,5	16,6	52	407
37-2	12	2,873	89	54	35	19	46	27	29,9	234	9,5	27,3	85	667
37-3	13	2,865	89	55	34	21	49	28	29,7	232	9,5	27,9	87	682
37-4	13	2,825	97	56	41	22	57	35	34,1	266	10,9	26,5	83	649
38-1	10	2,834	97	72	25	20	40	20	10,4	81	3,3	13,3	42	325
38-2	15	2,856	86	48	38	21	55	34	24,4	191	7,8	20,5	64	502
38-3	14	2,835	77	42	35	19	48	29	20,4	159	6,5	18,6	58	454
38-4*	12	2,846	49	23	26	15	43	28	19,8	155	6,3	24,3	76	595
39-1**	11	2,749	87	47	40	23	66	43	27,5	215	8,8	21,9	69	536

Amostra	Umidade natural (%)	ρ_s (g/cm ³)	Granulometria			Limites Atterberg			CTC (método Azul de Metileno)					
			Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)	LP (%)	LL (%)	IP (%)	CTCsolo (cmol/kg)	SEsolo m2/g	VB	Acb	CTCarg (cmol/kg)	Searg (m2/g)
39-2	14	2,789	83	27	56	24	95	71	53,3	416	17,0	30,4	95	743
39-3	13	2,767	75	27	48	23	80	57	53,3	416	17,0	35,4	111	867
40-1	26	2,876	90	48	42	26	50	24	32,0	250	10,2	24,3	76	594
40-2	23	2,905	92	62	30	29	41	12	22,9	179	7,3	24,3	76	596
40-3 **	29	2,892	97	45	52	30	71	41	45,2	353	14,4	27,7	87	679
40-4	35	2,875	98	42	56	38	74	36	51	399	16	29	91	712
40-5	20	2,885	89	62	27	NP	41		27	212	9	32	101	785
41-1 *	20	2,798	24	8	16	17	33	16	22	175	7	29	90	699
41-2 *	13	2,813	80	51	29	19	34	15	23	178	7	32	99	775
42-1 *	18	2,856	82	51	31	19	42	23	21	166	7	23	73	573
42-2 *	28	2,873	84	55	29	20	39	19	27	208	9	27	86	671
42-3 *	28	2,865	61	38	23	15	29	14	19	145	6	20	64	500
43-1 *	23	2,789	28	7	21	20	49	29	32	248	10	48	151	1181
43-2 *	21	2,865	79	50	29	26	46	20	36	283	12	40	125	977
43-3 *	37	2,874	70	42	28	24	44	20	32	246	10	36	113	879
43-4 *	28	2,905	82	48	34	25	47	22	35	272	11	33	103	801
43-5 *	28	2,894	70	43	27	21	40	19	27	214	9	32	101	791
44-1 **	24	2,853	95	49	46	22	52	30	37	288	12	26	80	626
44-2 **	27	2,860	93	49	44	21	56	35	39	302	12	28	88	687
44-2,7	33	2,855	94	45	49	23	60	37	46	359	15	30	94	732
45-1 **	18	2,863	94	47	47	22	57	35	35	274	11	24	75	583
45-2	16	2,876	89	49	40	21	48	27	31	245	10	25	79	613
45-3 **	26	2,854	95	42	53	25	62	37	43	338	14	26	82	637
45-4	26	2,870	93	38	55	25	61	36	44	344	14	26	80	626
46-1	25	2,856	89	45	44	29	53	24	37	286	12	27	83	649
46-2	26	2,874	86	43	43	21	50	29	35	273	11	26	81	636
47-1	17	2,891	86	43	43	19	47	28	31	242	10	23	72	563
47-2	20	2,879	91	44	47	23	49	26	35	275	11	24	75	585
47-2,7	19	2,896	84	50	34	26	45	19	nd	nd	nd	nd	nd	nd
47-3 *	22	2,907	98	52	46	27	58	31	38	294	12	26	82	639
47-4	25	2,887	93	50	43	24	56	32	39	307	13	29	91	713
49-1	21	2,875	89	44	45	24	57	33	39	301	12	27	86	669

Amostra	Umidade natural (%)	ρ_s (g/cm ³)	Granulometria			Limites Atterberg			CTC (método Azul de Metileno)					
			Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)	LP (%)	LL (%)	IP (%)	CTCsolo (cmol/kg)	SEsolo m ² /g	VB	Acb	CTCarg (cmol/kg)	SEarg (m ² /g)
49-2 *	18	2,861	81	37	44	22	51	29	38	298	12	28	87	678
49-3	21	2,879	89	46	43	21	51	30	35	274	11	26	82	638
49-4	24	2,869	82	45	37	21	46	25	29	225	9	25	78	607
49-5	24	2,873	82	43	39	19	48	29	33	257	10	27	84	658
50-1	28	2,864	95	47	48	23	54	31	29	225	9	19	60	468
50-2	25	2,879	96	50	46	22	57	35	34	269	11	24	75	585
50-3	24	2,885	94	50	44	26	54	28	37	286	12	27	83	651
50-4	22	2,881	94	48	46	23	53	30	34	269	11	24	75	585

* amostras não pertencem a Fm.Libertad, ** pontos com amostragem indeformada

nd sem dados

ρ_s massa específica dos sólidos

LP Limite de Plasticidade

LL Limite de Liquidez

IP Índice Plasticidade

CTCsolo Capacidade de Troca de Cátions do solo

SEsolo Superfície Específica do solo

VB valor do azul de metileno do solo (g/ 100 g solo)

Acb valor de azul de metileno da fração argila (< 2 μ m) (g/ 100g de argila)

CTCarg Capacidade de Troca de Cátions da fração argila

SEarg Superfície Específica da fração argila

Argila < 0.002mm, 0.063 mm > Silte > 0.002 mm, 2mm > Areia > 0.063 mm

FIGURA 41 Distribuição das amostras da Fm. Libertad, segundo sua granulometria, diagrama do U.S. Engineer Department segundo Means & Parcher (1965).

FIGURA 42 Curva granulométrica típica das Famílias F-1-A, F-1-B, F-1-C, F-2-A, F-2-B dadas pelas amostras 10, 35-4, 37-1, 26-3 e 38-3, respectivamente.

A seguir serão avaliadas cada fração granulométrica mediante histogramas de frequências, para identificar os diferentes grupos. Das amostras analisadas na FIGURA 43, 95 % delas apresentam valores iguais ou maiores que 80 % passando na peneira # 200, em particular mais da metade das amostras tem 90 % de sua fração granulométrica passando nessa peneira.

Observa-se na FIGURA 44 que em 80 % das amostras analisadas a fração silte e areia muito fina concentram-se na faixa de 37 a 57 % do total da granulometria. Em particular existem duas classes dominantes de 42% a 47 % e de 47 % a 52 %. Para efeito de análises conjuntas com outros atributos serão agrupadas em 4 classes: classe A ($< 42 \%$), B (42 - 47 %), C (47 - 52%), D ($> 52 \%$).

No caso da fração argila (FIGURA 45) observa-se uma concentração da população na faixa de 41 a 46 %, e quase 80 % das amostras apresentam teores maiores que 37 % da fração argila. Para efeito de análises conjuntas com outros atributos serão agrupadas em 4 classes: classe A ($< 37\%$), B (37 -41 %), C (41 - 46%), D ($> 46 \%$).

5.1.2 Limites de Atterberg

As amostras estudadas apresentam valores de LP variando de 15 % a 40 %, acontecendo a maior concentração na faixa de 20 a 25 %, como se observa na FIGURA 46. Em segundo lugar ocorrem as classe de 15 % a 20 % e de 25 % a 30 %, abrangendo quase 100 % das amostras. Para efeito de análises conjunta com outros atributos serão agrupadas em 4 classes: classe A ($< 20 \%$), B (20 - 25 %), C (25 - 30%), D ($> 30 \%$).

No caso do limite de liquidez, FIGURA 47, mais de 65 % das amostras apresentam valores de LL superiores a 50%. O conjunto de valores de LL pode agrupar-se em 4 classes: A ($LL < 45 \%$), B ($45 \% < LL < 55\%$), C ($55 \% < LL < 65 \%$) e D ($LL > 65 \%$) para analisá-los conjuntamente com outros atributos.

O Índice de Plasticidade apresenta a classe dominante no intervalo de 29 a 40 %, com 50 % das amostras (FIGURA 48) uma classe subordinada na faixa de 21 a 29 % com 26 % das amostras e classes de frequência baixa na faixa de 12 a 20 % e de 50 a 71 %. Para efeito de análises conjunta com outros atributos serão agrupadas em 4 classes: classe A ($< 20 \%$), B (20 - 29 %), C (29 - 40 %), D ($> 40 \%$).

FIGURA 43 Frequência de distribuição da fração passando na peneira # 200

FIGURA 44 Frequência de distribuição da fração silte

FIGURA 45 Frequência de distribuição da fração argila (< 2 μm)

FIGURA 46 Frequência de distribuição do LP

FIGURA 47 Frequência de distribuição do LL

FIGURA 48 Frequência de distribuição do IP

5.1.3 Análises dos índices obtidos no ensaio de Azul de Metileno (CTCsolo, CTCargila, VB, Acb, SEsolo, SEargila)

Observa-se dois grupos de materiais com marcadas diferenças nos valores de CTCsolo (FIGURA 49), um com valores na faixa de 25 a 30 cmol/kg e outro com valores na faixa de 35 a 40 cmol/kg. Os valores de CTCsolo forem reagrupados, usando a distribuição obtida na FIGURA 49, em quatro classes:

- 1) classe A, de (10, 25] cmol/kg com 19 % das amostras,
- 2) classe B, de (25, 35] cmol/kg com 32 % das amostras,
- 3) classe C, de (35, 40] cmol/kg com 28% das amostras;
- 4) classe D, de (40 a 55] cmol/kg com 21 % das amostras.

As classes B e C são as classes dominantes contendo 60 % das amostras, mas para identificar solos com potencial expansivo a classe D é muito significativa, já que, mesmo não sendo dominantes, representa a quinta parte das amostras, tem valores altos de CTC

A maioria dos valores de VB concentra-se no intervalo 9 a 12 (FIGURA 50), com 42 % das amostras, subordinadamente estão as classes 6 a 9 e 12 a 15, representando 24 e 21 % das amostras. Nas classes com VB maior que 9 concentran-se 70 % das amostras.

Os valores de Acb apresentam dois intervalos dominantes de 23-27 e 26-30 com 68 % das amostras analisadas. As amostras com Acb > 23 representam 80 % do total (FIGURA 51).

A distribuição da CTC da fração argila, FIGURA 52, são agrupadas em quatro classes:

- 1) classe A de (40, 55] cmol/kg,
- 2) classe B de (55, 74] cmol/kg,
- 3) classe C de (74, 94] cmol/kg,
- 4) classe D de (94, 117] cmol kg.

A classe dominante é a classe C, que adicionada à classe D, representam aproximadamente o 80 % das amostras estudadas da Fm Libertad. Isto indica um amplo domínio dos argilominerais dos grupos com alta capacidade de troca de cátions (esmectita e vermiculita), portanto o potencial destes solos de apresentar características expansivas é muito alto.

FIGURA 49 Frequência de distribuição da CTC do solo

FIGURA 50 Frequência de distribuição dos valores de VB

FIGURA 51 Frequência de distribuição dos valores de Acb

Figura 52 Frequência de distribuição dos valores da CTCargila

5.1.4 Classificações Geotécnicas

Realizados as análises necessárias para uso nas classificações de solos usadas em Geotecnia, estas são apresentadas na TABELA 13. Observa-se que as amostras da Fm. Libertad são classificadas como CL (26 % das amostras), CH (72 % das amostras) e só uma amostra como ML no SUCS. No sistema AASHTO são classificadas como A7-6 mais do que 90% das amostras e o resto como A7-5 e A-6. Essas classificações de solos são indicadores de solos potencialmente expansivos, segundo NELSON & MILLER (1992)

5.1.5 Análise de Difração de Raios X

Diferentes minerais apresentam poder refletor diferentes, segundo MOORE & REYNOLDS (1997), assim a intensidade de cada pico de difração de um determinado mineral não é indicador da abundância dele em uma amostra com mistura de diferentes minerais. A análise quantitativa requer o uso de técnicas que sejam adequadas, tal que minimize ou elimine a maioria das dificuldades de identificação ou interferências entre minerais. O uso de técnicas depuradas de análise quantitativas não é a finalidade deste trabalho, assim sendo a análise apresentada na TABELA 14 é apenas semi-quantitativa.

Usando as classes de CTC da argila foram separados os difratogramas de diferentes amostras, permitindo avaliar desta forma o grau de confiabilidade dos valores obtidos na determinação da CTC.

5.1.5.1 Amostras da Classe 40-55 cmol/kg

A amostra 36-2 pertence a esta classe, apresentando picos de esmectita (ou interstratificado esmectita-illita), illita e caulinita além de quartzo e feldspato no DRX normal (FIGURA 53). Observa-se um aumento da cristalinidade e/ou conteúdo da Esmectita com o aumento da profundidade. No DRX glicolada (FIGURA 54), identifica-se claramente que o mineral dominante é do grupo da esmectita seguido da illita e caulinita, descartando-se a possível presença de interstratificados. A mineralogia determinada nos DRX é compatível com os valores de CTC da fração argila, pode-se estender esta análise às outras amostras desta classe (38-1,33-1,12-1).

TABELA 13 Classificações Geotécnicas

Amostra	CLASSIFICAÇÃO				
	SUCS	DESCRIÇÃO SUCS	AASHTO	Índice Grupo	DESCRIÇÃO AASHTO
9	CL	Argila	A-7-5	12	solo argiloso
10	CL	Argila	A-7-5	15	solo argiloso
12	CH	Argila	A-7-5	18	solo argiloso
18-2	CL	Argila c/ areia	A-7-6	14	solo argiloso
18-3	CH	Argila	A-7-6	11	solo argiloso
26-1	CH	Argila	A-7-6	20	solo argiloso
26-2	CH	Argila	A-7-6	20	solo argiloso
26-3 **	CH	Argila	A-7-6	20	solo argiloso
26-4 **	CH	Argila c/ areia	A-7-6	20	solo argiloso
27-1*	CL	Argila	A-7-6	15	solo argiloso
27-2*	CL	Argila	A-7-6	11	solo argiloso
33-1	CH	Argila	A-7-6	19	solo argiloso
34-1	CL	Argila	A-6	11	solo argiloso
35-1	CH	Argila	A-7-6	20	solo argiloso
35-2	CH	Argila	A-7-6	19	solo argiloso
35-3	CH	Argila	A-7-6	20	solo argiloso
35-4	CH	Argila	A-7-6	20	solo argiloso
35-5	CH	Argila	A-7-6	20	solo argiloso
35-6	CH	Argila	A-7-6	20	solo argiloso
36-1	CH	Argila	A-7-6	18	solo argiloso
36-2	CH	Argila	A-7-6	20	solo argiloso
36-3	CH	Argila	A-7-6	20	solo argiloso
37-1	CH	Argila	A-7-6	19	solo argiloso
37-2	CL	Argila	A-7-6	16	solo argiloso
37-3	CL	Argila	A-7-6	17	solo argiloso
37-4	CH	Argila	A-7-6	19	solo argiloso
38-1	CL	Argila	A-6	12	solo argiloso
38-2	CH	Argila	A-7-6	19	solo argiloso
38-3	CL	Argila c/ areia	A-7-6	17	solo argiloso
38-4*	SC	Areia argilosa	A-2-7	9	solo argiloso
39-1 **	CH	Argila	A-7-6	20	solo argiloso
39-2	CH	Argila c/ areia	A-7-6	20	solo argiloso
39-3	CH	Argila c/ areia	A-7-6	20	solo argiloso
40-1	CH	Argila	A-7-6	16	solo argiloso
40-2	CL	Argila	A-7-6	9	solo argiloso
40-3 **	CH	Argila	A-7-5	20	solo argiloso
40-4	CH	Argila	A-7-6	20	solo argiloso
40-5	ML	silte	A-5	8	solo siltoso
41-1*	SC	areia argilosa	A-2-6	1	areia silto-argilosa
41-2*	SC	areia argilosa	A-6	10	solo argiloso
42-1*	CL	Argila arenosa	A7-6	14	solo argiloso

Amostra	CLASSIFICAÇÃO				
	SUCS	DESCRIÇÃO SUCS	AASHTO	Índice de Grupo	DESCRIÇÃO AASHTO
42-2*	CL	Argila arenosa	A-6	12	solo argiloso
42-3*	CL	Argila arenosa	A-6	7	solo argiloso
43-1*	SC	Areia argilosa	A-2-7	2	areia silto-argilosa
43-2*	CL	Argila arenosa	A-7-6	13	solo argiloso
43-3*	CL	Argila arenosa	A-7-6	12	solo argiloso
43-4*	CL	Argila arenosa	A-7-6	14	solo argiloso
43-5*	CL	Argila arenosa	A-6	11	solo argiloso
44-1 **	CH	Argila	A-7-6	18	solo argiloso
44-2 **	CH	Argila	A-7-6	19	solo argiloso
44-2,7	CH	Argila	A-7-6	20	solo argiloso
45-1 **	CH	Argila	A-7-6	19	solo argiloso
45-2	CL	Argila	A-7-6	16	solo argiloso
45-3 **	CH	Argila	A-7-6	20	solo argiloso
45-4	CH	Argila	A-7-6	20	solo argiloso
46-1	CH	Argila	A-7-6	16	solo argiloso
46-2	CH	Argila	A-7-6	18	solo argiloso
47-1	CL	Argila	A-7-6	17	solo argiloso
47-2	CL	Argila	A-7-6	16	solo argiloso
47-2,7	CL	Argila c/ areia	A-7-6	13	solo argiloso
47-3 **	CH	Argila	A-7-6	20	solo argiloso
47-4	CH	Argila	A-7-6	19	solo argiloso
49-1	CH	Argila	A-7-6	19	solo argiloso
49-2 **	CH	Argila c/ areia	A-7-6	18	solo argiloso
49-3	CH	Argila	A-7-6	18	solo argiloso
49-4	CL	Argila c/ areia	A-7-6	15	solo argiloso
49-5	CL	Argila c/ areia	A-7-6	17	solo argiloso
50-1	CH	Argila	A-7-6	19	solo argiloso
50-2	CH	Argila	A-7-6	19	solo argiloso
50-3	CH	Argila	A-7-6	18	solo argiloso
50-4	CH	Argila	A-7-6	19	solo argiloso

*Estas amostras não pertencem a Fm. Libertad, ** pontos com amostragem indeformada

5.1.5.2 Amostras da Classe 55-74 cmol/kg

As amostras 35-3 e 39-1 pertencem a esta classe. A amostra 35-3 apresenta um pico claro de esmectita, com base muito ampla indicando provavelmente cristalinidade média, Ilita e caulinita, com picos pouco desenvolvidos, além de quartzo no DRX normal (FIGURA 55). A esmectita apresenta dois picos na parte superior, indicando provavelmente a presença de esmectita e interestratificado. O mesmo fato acontece no DRX glicolada (FIGURA 56), onde foi identificada a esmectita Ca-Mg e provavelmente interestratificado esmectita- ilita ou clorita. A amostra 39-1 apresenta mineralogia semelhante a amostra 35-3,

acrescentada pela presença de feldspato. A mineralogia determinada nos DRX é compatível com os valores de CTC da fração argila, pode-se estender esta análise as demais amostras desta classe (37-1, 38-3, 50-1, 38-2, 10-1, 47-1).

5.1.5.3 Amostras da Classe 74-94 cmol/kg

Esta classe será dividida em dois subgrupos: de 74 a 84 cmol/kg e de 84 a 94 cmol/kg. Da sub-classe 74 a 84 cmol/kg foram realizados DRX das amostras 26-1, 26-2, 45-3, 49-4, pertencentes a este grupo. As amostras 26-1 e 26-2 apresentam características semelhantes com pico claros de esmectita, com base ampla indicando provavelmente uma cristalinidade média, picos pouco nítidos de illita e talvez caulinita, além de quartzo no DRX normal (FIGURA 57). O DRX glicolado permite identificar esmectita Ca-Mg, apresentando a amostra 26-2 melhor cristalinidade que a amostra 26-1. Isto pode ser devido a uma provável coexistência de esmectita com interestratificado esmectita-illita ou esmectita-clorita (FIGURA 58). A mineralogia, determinada nos DRX, é compatível com os valores de CTC da fração argila, pode-se estender esta análise às outras amostras desta classe (45-1, 50-2, 47-2).

Na sub-classe 84-94 cmol/kg foram realizados DRX das amostras 35-5, 36-3, 37-2, 40-3, 40-4, 44-2, 44-2,7, 47-4. Com exceção da amostra 35-5, em todas as outras se identifica claramente picos dos argilominerais dos grupos com espaçamento basal de 1,4 nm (esmectitas) e de 1,0 nm (illita), além de quartzo e feldspato como acessórios. Na amostra 35-5 observa-se um pico definido de esmectita no DRX normal e um pico pouco definido de illita, além de quartzo e feldspato (FIGURA 59). No DRX glicolado (FIGURA 60) confirmasse o pico de esmectita e continua com pouca definição o pico de illita. Estas análises podem ser estendidas as demais amostras do grupo (49-1, 49-2, 37-3, 34-1).

5.1.5.4 Amostras da Classe 94-117 cmol/kg

Nesta classe de CTC foram realizados DRX das amostras 26-3, 26-4, 35-6, 39-2, 39-3. Em todas elas o argilomineral dominante é a esmectita (FIGURA 61), ocorrendo ainda picos pouco nítidos de illita, quartzo e feldspato no DRX normal. Já no DRX glicolado (FIGURA 62) observa-se que o pico da illita é mais nítido nas amostras 39-2, 39-3 e 35-6, confirmando-se que ainda o argilomineral dominante é a esmectita. A reiteração destas características nestes DRX permitem estender esta mineralogia ao resto da classe (amostras 40-5 e 18-2).

TABELA 14 Identificação de DRX semi-quantitativa de argilo-minerais (Amostra Natural)

Amostra	CTCsolo	CTCarg	Esmeclita	I (cps)	Ilita	I (cps)	Caulinita	I (cps)	Quartzo	I (cps)	Feldspato	I (cps)
26-1	37	80	XXXX	1400		550	X	230	XX	450	XX	450
26-2	42	82	XXXX	1800		700	X	220	XX	580	X	580
26-3	44	100	XXXX	1600		400			XX	400	X	380
26-4	43	102	XXXX	2500					XX	400	X	350
35-3	29	65	XXXX	1250	XX	420	X	250	XX	420	X	
35-5	47	88	XXXX	1700	X	600	X		XX	500	X	550
35-6	51	97	XXXX	1850	X	640	X		XX	550	X	640
36-1	16	46	XXX	480	XX	450	X	250	XX	400	X	380
36-2	24	42	XXXX	720	XX	420	X	220	XX	350	X	420
36-3	36	92	XXXX	1300	X	500	X		XX	350	X	350
37-2	30	85	XXX	750	XX	650	X	250	XX	530	XX	580
39-2	53	95	XXXX	2500			X		X	500	X	600
39-3	53	111	XXXX	2400	X				X	500	X	
40-3	45	87	XXX	1130	X				X	500	X	500
40-4	51	91	XXX	850	XX	450	X		X	400	XX	550
44-2	39	88	XXX	780	XX	650	X	250	XX	480	XX	500
44-2,7	46	94	XXX	930	XX	650	X	250	XX	680	XX	630
47-4	39	91	XXX	950	XX	550			X	500	XX	800
49-4	29	78	XX	600	X	350	X	200	XX		XX	

DRX das amostras dos ensaios de Expansão

Amostra	CTCsolo	CTCarg	Esmeclita	I (cps)	Ilita	I (cps)	Caulinita	I (cps)	Quartzto	I (cps)	Feldspato	I (cps)
26-3	44	100	XXXX	1270	X				X	390	X	
26-4	43	102	XXXX	1300	X				X	400	X	400
39-1	27	69	XXX	920	X	380			X	320	X	350
40-3	45	87	XX	620	XX	380			X	370	X	390
44-1	37	80	XX	400	XX	400			XX	400	XX	380
44-2	39	88	XXX	800	XX	500	X	200	XX	390	XX	380
45-3	43	82	XXX	730	XX	420	X	200	XX	330	XX	440
49-2	38	87	XXX	700	XX	450	X	200				

I- Intensidade em *Centelleo* por segundo (cps)

xxxx – alta porcentagem , xxx – média porcentagem ,xx – baixa porcentagem ,x - traço

TABELA 14 (cont) Identificação de DRX semi-quantitativa de argilo-minerais (amostra Glicolada)

Amostra	CTCsolo	CTCarg	Esmeclita	I (cps)	Ilita	I (cps)	Caulinita	I (cps)	Quartzo	I (cps)	Feldspato	I (cps)
26-1	37	80	XXXX	1600	X	450	X	250	XX	550	X	350
26-2	42	82	XXXX	2400	X	400			X	600	X	450
26-3	44	100	XXXX	2000					XX	550	X	
26-4	43	102	XXXX	3800					X	500	X	600
35-3	29	65	XXX	1750	X	400		X				
35-5	47	88	XXXX	1800	X	350	X		XX	680	XX	500
35-6	51	97	XXXX	2900	X	550	X		XX	650	XX	500
36-2	24	42	XX	900	X	380	X					
36-3	36	92	XX	1750	X	400						
37-2	30	85	XXX	850	XX	500	X	250	XX	600	XX	550
39-2	53	95	XXXX	3500	X		X		X	650	X	
39-3	53	111	XXX	2400	X	650				650		
40-3	45	87	XXX		X				X		X	
40-4	51	91	XXX	950	X	450	X		X	450	X	550
44-2	39	88	XXX	950	X	500	X		X	500	X	
44-2,7	46	94	XXX	1050	X	600			X	650	X	500
47-4	39	91	XXXX	1350	XX	450			XX	580	XXX	1000
49-4	29	78	XXX	880	X	380	X		X		X	
DRX das amostras dos ensaios de Expansão												
Amostra	CTCsolo	CTCarg	Esmeclita	I (cps)	Ilita	I (cps)	Caulinita	I (cps)	Quartzo	I (cps)	Feldspato	I (cps)
26-3	44	100	XXXX	2050								
26-4	43	102	XXXX	2300								
39-1	27	69	XXX	1300								
40-3	45	87	XXX	920	X	320						
44-1	37	80	XX	500	X	350						
44-2	39	88	XX	900	X	350						
45-3	43	82	XXX	1100	X	350						
49-2	38	87	XXX	1050	X	440						

I Intensidade em *Centelleo* por segundo (cps)

xxxx – alta porcentagem , xxx – média porcentagem ,xx – baixa porcentagem ,x - traço

FIGURA 53 Difractograma amostra normal 36-2

FIGURA 54 Difractograma amostra glicolada 36-2

FIGURA 55 Difractograma amostra normal 39-1 e 35-3

FIGURA 56 Difractograma amostra glicolada 39-1 e 35-3

FIGURA 57 Difractograma amostra normal 26-1 e 26-2

FIGURA 58 Difractograma amostra glicolada 26-1 e 26-2

FIGURA 59 Difractograma amostra normal 35-5 e 47-4

FIGURA 60 Difractograma amostra glicolada 35-5 e 47-4

FIGURA 61 Difractograma amostras normal 26-4 e 39-2

FIGURA 62 Difractograma amostra glicolada 26-4 e 39-2

E - Esmectita

I - Ilita

C - Caulinita

Q - Quartzo

F - Feldspato

Mostra-se um alto grau de concordância entre os valores de CTC obtidos pelo método de Azul de Metileno e a análise dos DRX das amostras estudadas, incluídas as amostras que apresentavam misturas de argilo-minerais. O método de determinar CTC usando Azul de Metileno mostra-se eficaz para determinar a mineralogia da fração argila de solos finos quando associados a DRX de algumas amostras das diferentes classes de CTC para verificar os principais argilo-minerais presentes.

5.2 Ensaio de Expansão

Os ensaios de expansão realizados com as amostras indeformadas foram tanto a expansão livre como a pressão de expansão em condições de umidade "natural" como secas ao ar. Realizou-se ainda com algumas amostras, ensaios para determinação de pressão de expansão em corpos de prova compactados.

5.2.1 Amostras Indeformadas

5.2.1.1 Umidade "Natural"

Observa-se na TABELA 15 que as amostras apresentam uma alta variabilidade em algumas das propriedades índices como no p_d de 1,12 a 1,71 g/cm³, valores de 15 a 20 % na umidade iniciais (ou naturais) e o grau de saturação S_r de 50 a 68 %. Em particular as amostras com maior CTC_{solo} apresentam os maiores graus de saturação (S_r) e os menores p_d . Enquanto as amostras com menores valores de CTC_{solo} apresentam as maiores p_d e os menores graus de saturação.

Os resultados obtidos das dez amostras submetidas ao ensaio de expansão livre podem ser agrupados em três classes: < 1 %, 2 - 5 % e 15 - 16 % de expansão livre (FIGURA 63). As amostras com valores de CTC_{solo} maiores que 43 cmol/kg, $1,1 < p_d < 1,4$ g/cm³ e grau de saturação > 60 % (26-3, 26-4, 40-3), geraram os menores valores de expansão livre, em torno de 1%. Enquanto as amostras com valores de CTC_{solo} de 27 a 35 cmol/kg, $1,45 < p_d < 1,65$ g/cm³ e grau de saturação $57 < S_r < 67$ % (45-1, 39-1), geraram os maiores valores de expansão livre (15 e 16%). As amostras com valores de CTC_{solo} de 35 a 39 cmol/kg, $1,45 < p_d < 1,65$ g/cm³ e grau de saturação $50 < S_r < 60$ % (49-2, 45-3, 44-1, 44-2, 47-2), geraram os valores de expansão livre intermediários, 2 a 5 %.

A variabilidade nas propriedades índices das diferentes amostras repete-se nas amostras submetidas a ensaios de pressão de expansão (TABELA 16). A maioria das

amostras, ver FIGURA 64, geraram uma pressão próxima a 4 kPa, igual ao carregamento inicial, necessário para manter a altura original do corpo de prova, só 3 amostras (39-1, 45-1 e 45-3) geraram pressões de expansão de 9, 25 e 32 kPa respectivamente. Observa-se que a maioria das amostras com grau e saturação $> 60\%$ apresentam pressão de expansão de 4 kPa e a maioria das amostras com $p_d > 1,4 \text{ g/cm}^3$ e grau de saturação $< 60\%$ geraram pressões de expansão de 9 a 35 kPa.

TABELA 15 Propriedades Índices das amostras submetidas a Expansão Livre (umidade natural)

Amostra	CTCsolo (cmol/kg)	ρ_s (g/cm ³)	W ini. (%)	ρ_d (g/cm ³)	n (%)	e	Sr ini (%)	Expansão Livre (%)	W fin (%)	Sr fin (%)
47-3	38	2,91	20	1,25	57	1,31	54	4,3	38	94
26-4	43	2,89	26	1,39	52	1,07	68	0,8	31	80
26-3	44	2,91	25	1,47	49	0,98	64	1,0	36	91
44-2	39	2,86	21	1,60	44	0,79	60	4,9	36	93
39-1	28	2,75	25	1,46	47	0,88	67	14,5	48	98
40-3	45	2,89	29	1,11	61	1,59	60	0,3	46	95
45-3	43	2,85	23	1,40	51	1,03	57	2,5	40	95
44-1	37	2,85	18	1,60	44	0,77	53	2,2	33	92
49-2	38	2,86	21	1,38	52	1,07	51	3,2	41	93
45-1	35	2,86	15	1,70	40	0,68	50	16,0	39	93

CTCsolo Capacidade de Troca de Cátions do solo, ρ_s massa específica dos sólidos, W ini umidade inicial, ρ_d massa específica seca, n porosidade, e índice de vazios, Sr ini grau saturação inicial, W fin umidade final, Sr ini grau saturação final

TABELA 16 Propriedades Índices das amostras submetidas a Pressão de Expansão (umidade natural)

Amostra	CTCsolo (cmol/kg)	ρ_s (g/cm ³)	W ini. (%)	ρ_d (g/cm ³)	n (%)	e	Sr ini (%)	Pressão Expansão (kPa)	W fin (%)	Sr fin (%)
47-3	38	2,91	20	1,23	58	1,36	46	4,1	41	95
26-4	43	2,90	26	1,48	49	0,96	67	4,1	36	93
26-3	44	2,91	25	1,47	50	0,98	64	4	36	92
44-2	39	2,86	21	1,73	39	0,65	67	4,1	27	91
39-1	28	2,75	25	1,43	48	0,93	66	9	37	98
40-3	45	2,89	29	1,17	60	1,47	62	4,2	44	95
45-3	43	2,85	23	1,41	51	1,02	57	31,6	38	95
44-1	37	2,85	18	1,74	39	0,64	58	4	29	92
49-2	38	2,86	21	1,35	53	1,12	50	4,1	39	95
45-1	35	2,86	15	1,76	39	0,63	51	25,2	23	78

CTCsolo Capacidade de Troca de Cátions do solo ρ_s massa específica dos sólidos, W ini umidade inicial, ρ_d massa específica seca, n porosidade, e índice de vazios, Sr ini grau saturação inicial, W fin umidade final, Sr ini grau saturação final

Não encontra-se uma correlação muito clara entre os valores obtidos nas amostras em ambos os ensaios, provavelmente a causa disto esteja no fato de, no caso do ensaio de pressão de expansão, o carregamento provocar alguma mudança na estrutura do solo que afete seu potencial de expansão, o que no acontece na expansão livre.

Comparando-se os dois ensaios observa-se que as amostras que geraram expansões livres maiores que 14 % apresentam valores de pressão de expansão baixas nas condições de umidade de campo, mas o número de amostras ensaiadas não é suficiente para confirmar essa observação com uma conclusão para as amostras da Fm. Libertad. O mesmo fato foi verificado por PEREIRA (1999) para as amostras da Fm. Guabirota (Terciário), não achando relação direta entre Expansão Livre e Pressão de Expansão.

5.2.1.2 Secas ao ar

As amostras secas ao ar apresentam uma alta variabilidade de p_d com valores de 1,3 a 1,85 g/cm³ e graus de saturação de 18 a 36 % (TABELA 17 e FIGURA 65). O número de amostras não permite relacionar os diferentes índices das amostras com os valores de expansão observados. Algumas observações encontradas são: a amostra 39-1 gera as maiores deformações; as amostras 26-4 e 26-3 com valores de CTCsolo semelhantes, p_d 26-4 > p_d 26-3 e S_r 26-4 > S_r 26-3 geraram deformações semelhantes. A amostra 45-3 com o maior valor de p_d e o maior S_r gerou as maiores deformações.

TABELA 17 Propriedades Índices das amostras submetidas a Expansão Livre

Amostra	CTCsolo (cmol/kg)	ρ_s (g/cm ³)	W ini. (%)	p_d (g/cm ³)	n (%)	e	S_r ini (%)	Expansão Livre (%)	W fin (%)	S_r fin (%)
26-4	43	2,89	8	1,75	39,60	0,66	32	27,9	42	93
26-3	44	2,91	8	1,55	46,64	0,87	26	30,3	49	95
39-1	28	2,75	7	1,61	41,45	0,71	24	47,9	63	100
40-3	45	2,89	9	1,32	54,30	1,19	24	31	58	96
45-3	43	2,85	8	1,84	35,47	0,55	35	43,77	50	95
45-1	35	2,86	7	1,59	44,39	0,80	18	29,8	57	95

CTCsolo Capacidade de Troca de Cátions do solo ρ_s massa específica dos sólidos, W ini umidade inicial, p_d massa específica seca, n porosidade, e índice de vazios, S_r ini grau saturação inicial, W fin umidade final, S_r ini grau saturação final

FIGURA 63 Expansão livre amostras com umidade natural

FIGURA 64 Pressão de Expansão amostras com umidade natural

Em função disto observa-se que existem faixas de valores dos parâmetros avaliados em que um deles comanda o processo de expansão preponderando sobre os demais, enquanto que em outros intervalos de valores não se percebe o domínio de um parâmetro, mais o efeito

combinado, ora potenciando o fenômeno de expansão ora diminuindo-o. Isto pode ser um indicador da importância das interações entre os diferentes componentes do sistema solo na hora de avaliar o fenômeno de expansão. Os valores obtidos no ensaio de expansão livre quando secas ao ar apresentam duas famílias de comportamento. Uma família de 4 amostras com valores de expansão de 27 a 32 % e outra família com valores de 45 a 48 % de expansão livre (FIGURA 65)

Os valores de Pressão de Expansão das amostras Secas ao ar, TABELA 18 e FIGURA 66, agrupam-se em quatro classes: uma classe com pressões muito baixas <20 kPa representado pelas amostras 47-3 e 44-1; um segundo grupo com pressões baixas 99 a 140 kPa representado pelas amostras 39-1, 26-4, 44-2, e 40-3, a amostra 26-3 gerou uma pressão de expansão médio de 250 kPa e a amostra 45-3 gero 480 kPa de pressão de expansão, considerada alta.

TABELA 18 Propriedades Índices das amostras submetidas ao ensaio de Pressão de Expansão

Amostra	CTCsolo (cmol/kg)	ρ_s (g/cm ³)	W ini. (%)	ρ_d (g/cm ³)	n (%)	e	Sr ini (%)	Pressão Expansã o (kPa)	W fin (%)	Sr fin (%)
26-4	43	2,892	9	1,62	44,02	0,79	30	139,6	27	97
26-3	44	2,908	8	1,82	37,39	0,60	33	248,9	21	88
44-2	39	2,86	4	1,65	42,29	0,73	13	114,2	28	93
39-1	28	2,749	6	1,67	39,23	0,65	22	133,2	27	96
40-3	45	2,892	7	1,42	50,76	1,03	19	99,3	32	92
45-3	43	2,854	10	1,70	40,45	0,68	35	476,9	26	91
44-1	37	2,853	16	1,76	38,41	0,62	56	18,7	25	91
47-3	38	2,907	8	1,24	57,41	1,35	19	18,3	37	94

CTCsolo Capacidade de Troca de Cátions do solo ρ_s massa específica dos sólidos, W ini umidade inicial, ρ_d massa específica seca, n porosidade, e índice de vazios, Sr ini grau saturação inicial, W fin umidade final, Sr ini grau saturação final

Nas amostras com pressões de expansão muito baixas observa-se em uma delas (44-1) concreções de CaCO_3 (FIGURA 67) que poderá estar cimentando as partículas de argila e interferindo na expansão dado pelo efeito de dupla camada, enquanto a outra amostra apresenta o menor valor de massa específica seca ($\rho_d = 1,24 \text{ g/cm}^3$)

FIGURA 65 Expansão livre amostras secas ao ar

FIGURA 66 Pressão de Expansão secas ao ar

5.2.2 Amostras Compactadas

Nas amostras compactadas, com os mesmos valores de p_d e ω e variando-se o CTCsolo obtive-se para os menores valores de CTCsolo as menores Pressões de Expansão e para os maiores valores de CTCsolo as maiores Pressões de Expansão. Para as amostras com

$\rho_d = 1,4 \text{ g/m}^3$ e $\omega = 15 \%$ obtive-se valores de pressão de expansão variando de 20 a 50 kPa para todos os valores de CTCsolo analisadas (TABELA 19 e FIGURA 68).

Nas amostras 44-1 a presença de CaCO_3 provocou uma queda nos valores de Pressão de Expansão, por isto foram ensaiadas as amostras 45-1 (com valores semelhantes de CTCsolo e CTCargila), tendo-se obtido valores de Pressão de Expansão maiores que na amostra 44-1. A presença de carbonato reduziu de forma substancial a pressão de expansão, portanto este fato corroborado também com amostras naturais, é um indicador de um possível método para controlar o fenômeno de expansão de forma simples, ou seja a adição de CaCO_3 em solos expansivos

TABELA 19 Propriedades índices das amostras compactadas submetidas a ensaios de Pressão de Expansão

Amostra	CTCsolo (cmol/kg)	CTCarg (cmol/kg)	ρ_d (g/cm ³)	W ini (%)	e	Sr ini (%)	Pressão de Expansão (kPa)
26-1	44	100	1,40	14,6	1,00	32	54,7
26-1	44	100	1,55	14,6	0,80	36	201,2
26-1	44	100	1,70	14,6	0,64	41	358,8
39-1	27,5	69	1,40	14,5	1,00	32	24,4
39-1	27,5	69	1,56	13	0,79	32	75,1
39-1	27,5	69	1,7	14,6	0,64	41	218,1
44-1	37	80	1,41	13,5	0,99	30	31,9
44-1	37	80	1,53	16	0,83	39	43,7
44-1	37	80	1,72	13,5	0,63	38	129,9
45-1	35	75	1,50	15	0,81	37	118,8
45-1	35	75	1,68	15	0,66	41	269,9

CTCsolo Capacidade de Troca de Cátions do solo, CTCarg Capacidade de Troca Catiônica do argilo-mineral, W ini umidade inicial, ρ_d massa específica seca, n porosidade, e índice de vazios, Sr ini grau saturação inicial

FIGURA 67 Concreções de CaCO_3 na amostra 44-1

FIGURA 68 Pressão de expansão das amostras compactadas estaticamente e $W = 15\%$.

5.3 Correlações entre índices

Com o objetivo de reconhecer quais são as propriedades avaliadas que podem ser correlacionadas, se realizou no programa Statistica 5.5 da Statsoft Inc. uma análise de matriz de correlações entre os valores dos ensaios de caracterização e entre os valores dos ensaios de caracterização e os valores de Pressão de Expansão das amostras compactadas. A seguir são apresentadas as correlações com $r^2 > 0,5$ consideradas com alguma significação.

5.3.1 Correlações entre índices de caracterização

As correlações entre os valores obtidos nos ensaios de caracterização apresentam valores de coeficiente de correlação r^2 de 0.58 a 0.53 e valores de r de 0.76 a 0.73, com níveis de confiança próximo a do 100 % ($p = 10^{-9}$). As melhores correlações foram entre fração argila e LL, fração argila e SEsolo, LL e SEsolo.

Não houve correlações significativas ($r^2 > 0,5$) entre as propriedades índices e a pressão de expansão e expansão livre das amostras secas ao ar e com umidade natural

5.3.2 Correlações entre índices de caracterização e Pressão de Expansão das amostras compactadas

As melhores correlações dos índices com a Pressão de Expansão são com p_d ($r^2 = 0,81$), S_r ($r^2 = 0,84$), TABELA 20, sendo que estes parâmetros refletem indiretamente informação sobre a estrutura e a sucção do solo. A correlação de Pressão de Expansão com a CTCsolo e a CTCarg tem valores de r^2 de 0,11 e 0,15 respectivamente, ainda que nos ensaios com p_d e W constante ao aumentar a CTCsolo aumentava a Pressão de Expansão. Uma possível explicação para valores tão baixos de correlação é que a estrutura do solo em alguns casos pode ser o fator preponderante a ditar o comportamento do solo em detrimento da composição mineralógica.

Para visualizar o comportamento da pressão de expansão em função daqueles parâmetros considerados mais importantes no fenômeno de expansão, estrutura do solo (p_d), mineralogia da fração argila (CTCsolo) e sucção (W), utilizou-se os valores obtidos nas amostras compactadas e com as amostras indeformadas secas ao ar. Os dados foram avaliados no programa Statistica 5.5 do Statsoft Inc., considerando p_d e CTCsolo, como variáveis independentes e Pressão Expansão como variável dependente.

TABELA 20 Correlações entre índices de caracterização

	Média	Desviação Standard	r(X,Y)	r ²	P	N
ARGILA (%)	43	8				
LL (%)	56	10	0,7578	0,5742	1,37027E-11	56
ARGILA (%)	43	8				
IP (%)	33	9	0,6924	0,4794	3,393E-09	56
ARGILA (%)	43	8				
CTCsolo (cmol/kg)	34	10	0,7575	0,5738	1,40528E-11	56
ARGILA (%)	43	8				
VB	11	3	0,7575	0,5738	1,40581E-11	56
ARGILA (%)	43	8				
SEsolo (m2/g)	262	76	0,7625	0,5815	8,55873E-12	56
LL(%)	56	10				
CTCsolo (cmol/kg)	34	10	0,7300	0,5329	1,7306E-10	56
LL (%)	56	10				
VB	11	3	0,7300	0,5329	1,72871E-10	56
LL (%)	56	10				
Sesolo	262	76	0,7380	0,5447	8,58844E-11	56
IP (%)	33	9				
CTCsolo (cmol/kg)	34	10	0,6620	0,4383	2,75839E-08	56
IP (%)	33	9				
VB	11	3	0,6620	0,4383	2,75618E-08	56
IP (%)	33	9				
CTCsolo (cmol/kg)	262	76	0,6711	0,4504	1,51062E-08	56

Em todos os gráficos tridimensionais, a superfície interpolada representa o valor da Pressão de Expansão para um par de valores de p_d e CTCsolo. Optou-se por analisar quatro casos:

- 1) as amostras compactadas,
- 2) as amostras compactadas sem carbonato,
- 3) todas as amostras (compactadas e secas ao ar)
- 4) e por ultimo só as amostras secas ao ar, gerando-se um gráfico de pontos de e um de superfície.

Na FIGURA 69 (amostras compactadas) a tendência é clara da influência do p_d e da CTCsolo na Pressão de expansão, sendo maior a influência do primeiro parâmetro. Já quando se analisa todas as amostras compactadas, a presença de CaCO_3 nas amostras com CTCsolo de 36 cmol/kg produz uma mitigação nos valores de pressão de expansão nessa faixa de CTC, mantendo-se o aumento do pressão de expansão com o aumento dos outros dois parâmetros considerados.

TABELA 21 Correlações entre índices indiretos e com a pressão de expansão das amostras compactadas sem CaCO_3

	Média	Desviação standar	r(X,Y)	r ²	p	N
CTCsolo (cmol/kg)	35,7	7,2				
CTCarg (cmol/kg)	81,9	14,1	0,9617	0,9248	3,497E-05	9
CTCsolo (cmol/kg)	35,7	7,2				
Pressão Expansão (kPa)	150,3	117,6	0,3316	0,1100	0,3833308	9
CTCarg (cmol/kg)	81,9	14,1				
Pressão Expansão (kPa)	150,3	117,6	0,3251	0,1057	0,3932474	9
ρ_d (g/cm ³)	1,5	0,1				
e	0,8	0,2	-0,9897	0,9794	3,663E-07	9
ρ_d (g/cm ³)	1,5	0,1				
Sr (%)	35,7	4,5	0,9165	0,8400	0,0005092	9
ρ_d (g/cm ³)	1,5	0,1				
Pressão Expansão (kPa)	150,3	117,6	0,9019	0,8135	0,000882	9
e	0,8	0,2				
Sr (%)	35,7	4,5	-0,9202	0,8469	0,000436	9
E	0,8	0,2				
Pressão Expansão (kPa)	150,3	117,6	-0,8862	0,7854	0,0014611	9
Sr (%)	35,7	4,5				
Pressão Expansão (kPa)	150,3	117,6	0,9182	0,8432	0,0004745	9

Na FIGURA 70 (amostras compactadas sem CaCO_3) é clara do influência do p_d e da CTCsolo na Pressão de Expansão, sendo maior a influencia do primeiro parâmetro como é mostrado na superfície gerada.

Na FIGURA 71 analisados todos os valores, tanto das amostras indeformadas secas ao ar como das compactadas, identifica-se que a Pressão de Expansão aumenta tanto quando aumenta o p_d como quando aumenta a CTCsolo. O maior acréscimo da Pressão de Expansão acontece com o aumento do primeiro parâmetro.

Nas FIGURAS 72 e 73 plotados só os valores das amostras secas ao ar também identifica-se um comportamento similar ao das amostras compactadas, ainda que com valores menores na superfície de Pressão de Expansão

Em todos os gráficos gerados ocorre um acréscimo na Pressão de Expansão tanto quando aumenta p_d , como quando aumenta a CTCsolo. O maior acréscimo na Pressão de Expansão acontece com o aumento do p_d .

Figura 69 Superfície de Pressão de Expansão das amostras compactadas

Figura 70 Superfície de Pressão de Expansão das amostras compactadas sem CaCO₃

Amostras Compactadas e Secas ao Ar

Figura 71 Superfície de Pressão de Expansão das amostras compactadas e secas ao ar.

Amostras Secas ao Ar

FIGURA 72 Plotagem dos valores de Pressão de Expansão das amostras secas ao ar

Amostras Secas ao Ar

FIGURA 73 Superfície de Pressão de Expansão das amostras secas ao ar

Com uma maior quantidade de ensaios com diferentes p_d , CTCsolo e W poderia ser obtido um diagrama tridimensional que abrange-se os parâmetros de maior incidência no fenômeno de expansão: Mineralogia da fração argila e sua percentagem (CTCsolo ou VB), estrutura do solo (p_d ou índice de vazios) e sucção (grau de saturação ou umidade). Poderia então prever-se a partir desses gráfico com os valores de p_d , CTCsolo, e W o comportamento à expansão de solos argilosos.

5.4 Cartas de Previsão de Expansão

No item 2.4.2.2 Uso de Cartas e Tabelas para Prever Expansão do Capítulo 2 Revisão Bibliográfica foram apresentadas diferentes cartas para predição do potencial de expansão dos solos finos. As cartas mais utilizadas são as de SEED et al (1962) e de VAN der MERWE (1964) modificada por WILLIAMS & DONALSON (1980), porém serão avaliadas as amostras em estas duas e na carta de PEREIRA & PEJON (1999) por ser a única que avalia a expansão em função dos parâmetros obtidos mediante a técnica de Azul de Metileno

5.4.1 Carta de VAN der MERWE (1964) modificada por WILLIAMS & DONALSON (1980)

Nesta carta (FIGURA 74) observa-se que a grande maioria das amostras apresenta potencial de expansão alto e muito alto e poucas amostras apresentam potencial médio e baixo. Portanto todas as regiões onde se retiraram as amostras se encontram em zona da alta susceptibilidade a acontecer problemas com solos expansivos.

FIGURA 74 Carta de Previsão de Expansão VAN der MERWE (1964) modificada por WILLIAMS & DONALSON (1980)

5.4.2 Carta de SEED et al. (1962)

Na carta de SEED et al. (1962) (FIGURA 75) a maioria das amostras apresentam potencial de expansão alto e poucas amostras potencial baixo, médio e muito alto. Porém as regiões destes solos seriam classificadas de alta susceptibilidade a acontecer problemas de expansão.

Nestas duas cartas, usando os mesmos parâmetros, a classificação obtida é mais conservadora no caso de VAN der MERWE (1964) em comparação respeito dos valores obtidos com a carta de SEED et al. (1962)

FIGURA 75 Carta de Previsão de Expansão SEED et al. (1962)

5.4.3 Carta de PEREIRA & PEJON (1999)

Na carta de PEREIRA & PEJON (1999) (FIGURA 76) observa-se que a maioria das amostras apresentam potencial de expansão médio e poucas amostras apresentam potencial de expansão baixo, alto ou muito alto.

As três cartas analisadas classificam os solos com diferentes potenciais de expansão. Isto marca a grande variabilidade de classificação ao usar cartas que foram desenvolvidas com solos de diferentes regiões, com climas, gênesis, idades e história geológica diferentes. Além disso, as cartas estão usando só algumas das variáveis que influenciam no fenômeno de expansão como é a porcentagem da fração argila e mineralogia da fração argila (de forma direta com o valor de VB o com ou indireta valor do IP). Os autores dessas cartas não consideram outros dois fatores muito importantes: a estrutura do solo e a sucção de solo. Provavelmente algumas das formas mais simples de medir ou estimar estes parâmetros seja

através do p_d e do grau de saturação, ensaios estes que poderiam facilmente ser executados em trabalhos de mapeamento de solos expansivos.

FIGURA 76 Carta de Previsão de Expansão PEREIRA & PEJON (1999)

CAPÍTULO 6 DOCUMENTOS CARTOGRÁFICOS

Os Mapas e Cartas Básicas foram elaborados a partir da informação existentes da área como foi explicado no CAPÍTULO 4, complementados e/ou ajustados com os trabalhos de campo. A carta analítica foi realizada com base na informação dos ensaios de caracterização e de expansão e o no cruzamento dos mapas e cartas básicas.

6.1 Mapas e Cartas Básicas

6.1.1 Mapa de Documentação

Este mapa reúne simultaneamente:

- 1) as informações dos pontos de observação e amostragem de trabalhos existentes na área,
- 2) os pontos de observação, amostragem deformada e indeformada desenvolvidos neste trabalho
- 3) a rede de drenagem, vias de acesso e ferrovias.

6.1.2 Mapa Topográfico

Foi elaborado a partir das folhas topográficas escala 1:10.000 15, 16, 17, 24,25, 26 do “Servicio de Información Geográfico” SIG da Intendencia Municipal de Montevideu e do Serviço Geográfico Militar SGM, apresentando curvas de nível de 2 em 2 metros.

6.1.3 Mapa das Unidades Geológicas Superficiais

As unidades geológicas identificadas na área durante os trabalho de campo e gabinete são coincidentes, de maneira geral, com os antecedentes da região de GOSO et al (1989a, b). Foram identificados algumas regiões onde pela escala utilizada neste

trabalho e pelo trabalhos desenvolvidos na década do 90 pelo Departamento de Geotecnia da Faculdade de Engenharia da Universidade da República e os trabalhos de laboratório, foi possível detalhar melhor as unidades geológicas, ainda que não sendo o objetivo do trabalho significa um aporte ao conhecimento da geologia da área.

6.1.3.1 Embasamento Pré-cambriano

Foram identificados anfíbolitos, gnaisses e granitos deformados pertencentes a Fm. Montevideo, muito fraturados e com nível de alteração médio (rocha alterada a rocha fraturada) com espessura de 3 a 6 m até a rocha pouco alterada e fresca. Os melhores pontos de observação foram as pedreiras e alguns cortes de taludes. Em uma ampla região o embasamento não aflora e está recoberto por materiais associados a Fm. Libertad com espessuras de 1 a 2 m. Para efeito cartográfico e finalidade deste trabalho foram associados em uma única unidade aquelas regiões onde esse fato foi identificado.

6.1.3.2 Fm. Fray Bentos

Esta unidade está localizada na região sudeste da área, constituída por areia siltosa e silte argiloso de cor rosada, como litologia principal, tanto em cortes de taludes como nos furos de sondagens. No ponto 1 observa-se uma escarpa de um conglomerado com matriz suporte de cor rosa, com silte e argila na matriz, apresentando as características das litologias da Fm. Fray Bentos quando associados a regiões com o embasamento cristalino próximo a superfície. Foram identificados espessuras de até 4 m nos taludes observados e nos furos de para amostragem executados.

6.1.3.3 Fm. Raigón

Apresenta-se composta por areia, areia argilosa e areia com pedregulho, ocorrendo principalmente na região sudeste da área. Apoia-se sobre o embasamento e sobre a Fm Fray Bentos identificando-se tanto nas pedreiras como nos furos de sondagens realizadas espessuras de 0.5 a 2 metros. Não foi possível identificar, nas regiões de espessuras menores que 1 m, características fotogeológicas que contribui-se a sua separação de outras unidades de mapeamento.

6.1.3.4 Fm. Libertad

Esta unidade geológica, objeto principal deste trabalho é composta por sedimentos finos silto-argilosos e argilo-siltosos, de cor marron a pardo na superfície e cores cinza esverdeados em profundidades maiores que 4 metros. Os lugares onde aflora são relativamente escassos e localiza-se em pedreiras abandonadas e ativas, e em cortes de taludes de estradas. Quando exposta a ciclos de secagem e umedecimento apresenta estrutura de tipo “pop-corn” (empastilhamento), segundo NOE (1995) indicadora de solos potencialmente expansivo (FIGURA 77 b).

Foram identificados níveis loéssicos com estruturas em blocos nos pontos 40 e 69 intercalado com solos argilosos (FIGURA 78) e a presença de carbonato de cálcio foi constatada de forma quase constante, tanto nos cortes de taludes e pedreiras como nas amostras retiradas dos furos de sondagens. Ele se apresenta em forma pulverulenta ou em concreções de vários centímetros de diâmetro e formas alargadas, denominados na região como “muñeca de carbonato”(boneca de carbonato), (FIGURA 77 a) e 78). Identificou-se a presença de pequenos nódulos de manganês em profundidade associados as cores cinzas esverdeados, indicando condições redutoras.

A posição topográfica desta unidade abrange tanto os topo como as vertentes, sendo os landforms associados diferentes em função da espessura da unidade e da profundidade do embasamento , como será descrito no item Mapa de Landforms. Em principio pode-se dizer que regiões com maiores espessuras geram relevos de colinas suaves com topo planos amplos e vertentes extensas. Enquanto as regiões com materiais pouco espessos e com o embasamento próximo geram colinas com maior declividade, topos arredondados e vertentes curtas.

Os solos da Fm. Libertad normalmente não se encontram saturados e apresentam teores de umidade natural (ou de equilíbrio) de 10 a 20 % nos primeiros 2 a 3 metros, enquanto em profundidades maiores a umidade varia de 15 a 28 %, geralmente com valores ao redor de 20 %. Estes fatos foram identificados durante o presente trabalho, é necessário aclarar que as umidades foram determinadas em amostras obtidas em 6 campanhas de amostragem durante 5 meses, portanto alguns valores podem estar influenciado por períodos de seca ou chuva prévios aos trabalhos de campo.

As melhores exposições e observação de contato com as unidades subjacentes estão localizadas nos pontos 25, 26, 33, 40, 52, 53, 69, 70.

FIGURA 77 a) Concreções de carbonato de cálcio, de cor branco, ao longo do perfil do ponto 49. b) Estrutura de “pop-corn” (empastilhamento), típica em taludes submetidos a secagem e umedecimento.

FIGURA 78 Detalhe do nível de Loess no ponto 40 e as concreções de carbonato de cálcio de cor branco.

6.1.3.4 Aluviões

São compostos, basicamente, por sedimentos arenosos com pedregulho, argilo-arenosos e argilo-siltosos associados aos vales e planícies de inundação dos cursos fluviais da região de estudo com espessuras medidas de até 3 m nos furos executados durante os trabalhos de campo.

Na planície do arroio Manga, GOSO, C et. al. (1989, a) cartografaram as litologias como Fm. Dolores, mas corrobora-se que tanto as características granulométricas como a mineralogia da fração argila e sua cota topográfica não corresponderiam àquela formação. Considera-se que as litologias dessa região são mais novas que às da Fm. Dolores, provavelmente estejam associadas a algumas das ingressões marinhas do Holoceno.

Estes sedimentos apoiam-se sobre as unidades do embasamento precambriano ou sobre a Fm. Fray Bentos.

6.1.4 Carta de Declividade

Foi gerada, usando como base o Mapa Topográfico digitalizado em Autocad 13, no SIG-Idrisi com as recomendações descritas por LOPES (2000). Basicamente consiste em utilizar o arquivo vetorial (.DXF) contendo as curvas de nível em um arquivo no formato ASCII (.TXT). Este arquivo foi interpolado, usando o método de Mínima Curvatura (o que melhor representa o relevo da zona de estudo) e pixel de 5 x 5 m, usando o Software SURFER[®] 7.0 gerando um arquivo com extensão (.GRD). Este arquivo foi importado no SIG-IDRISI, convertido em um arquivo do sistema (.IMG) e a análise foi feita no módulo ANALYSIS gerando a Carta de Declividade generalizada. Esta carta foi reclassificada em percentagens em função das características da área de estudo. Maiores detalhes do procedimento acha-se em LOPES (2000) e LIMA (2000).

Na região de estudo dominam amplamente as declividades menores que 6 % , dentro desta classe as principais declividades são de 0 a 1,5 % e de 3 a 6 % , associadas a topos amplos e planos e vales amplos. Na classe de declividades maiores que 6 % , amplamente dominada pelo grupo de declividades de 6 a 10 % , associado ao embasamento Precambiano ou a Fm. Fray Bentos aflorando ou próximo a superfície.

6.1.5 Mapa de Landform

Foi elaborado a partir da fotointerpretação das fotos aéreas escala 1:10.000, aplicando a técnica de LOLLO & ZUQUETTE (1997). Procede-se inicialmente com a análise de unidades de terrenos delimitados por drenagens de 1ª ordem, avaliando em cada um dessas unidades o tipo de topo, de vertente, a declividade e amplitude das vertentes e topos e sua associação com as unidades geológicas, realizando-se a verificação durante os trabalhos de campo.

Durante o processo de fotointerpretação foram separadas diferentes unidades em função das formas do terreno ou Landform, combinações de topo e vertente, usando no segundo caso as 9 formas possíveis geradas da combinação de formas planas, convexas e côncavas, (FIGURA 79). Essas formas foram associadas a declividades, amplitudes das encostas, substrato rochoso e material inconsolidado.

FIGURA 79 Formas das vertentes (S plana, V convexa, C côncava), RUHE* apud MITCHELL (1991).

* RUHE (1975) *Geomorphology*, Houghtin, Mifflin, Boston apud MITCHELL, C. W. (1991) *Terrain evaluation. An introductory handbook to the history, principles and methods fo practical terrain assessment*. Londres, Long Man Scientifican & Technical.

As diferentes unidades foram agrupadas em 3 sistemas A, B, C caracterizados primeiro pela declividade e depois pelas formas e amplitudes dos topos e as vertentes. Assim obteve-se 8 unidades, sendo 3 pertencentes ao sistema A, 4 ao sistema B e 1 ao sistema C. Esta separação permitiu orientar os trabalhos de retirada de amostras deformadas para analisar as relações entre as propriedades geotécnicas das unidades geológicas e os Landforms. Em seguida aos ensaios de caracterização, os diferentes landforms permitiram direcionar a amostragem indeformada, visando reduzir o número de amostras a coletar.

6.1.5.1 Sistema A

Dominam as declividades de 6 a 10 % associadas a regiões com embasamento cristalino aflorante e depósitos dos materiais da Fm Libertad com espessuras medidas de até 6 m.

6.1.5.1.1 Unidade 1

Subordinadamente ocorrem declividades de 3-6% e 10 a 20% e 60 % da área apresenta declividades maiores que 6 %. As litologias associadas as declividades maiores são o embasamento cristalino (granitos, gnaisses e anfibolitos) e a Fm Fray Bentos. As outras declividades estão associadas a Fm Libertad sobre embasamento cristalino ou Fm. Fray Bentos.

Nos topos dominam as formas Plana Ondulada e Plana. As vertentes são curtas dominado as formas Convexa-Convexa (5) e Convexa-Plana(7)

6.1.5.1.2 Unidade 2

Existem zonas com matacões de granito (FIGURA 80) na região com declividade subordinadas de 10 a 20%, sendo que na região de 0 a 3 % de declividade verificou-se espessura de até 3 m da Fm Libertad sobre embasamento cristalino no ponto 39, com formas alargadas no topo e de comprimento inferior a 100 m. Os vales associados aos cursos fluviais são encaixados em forma de V.

Os topos apresentam formas Plana-ondulada, Plana-ondulada a Arredondada, Arredondada e Sela. As vertentes são de comprimento médio e curto, com formas Convexa-Convexa (5), Côncava-Plana (7), Côncava-Convexa (8) e Convexa-Plana (4).

FIGURA 80 Relevo típico da Unidade A-2, com presença de matações

6.1.5.1.3 Unidade 3

As declividades subordinadas são de 0-3 % e 3 a 6% e ocupam áreas semelhantes desta unidade. Os topos são mas amplos e extensos quando comparados aos da Unidade 2 e identificaram-se espessuras de 3 a 6 metros na Fm. Libertad nos pontos 26, 35 e 36. Os vales associados aos cursos fluviais são amplos na região dos pontos 35 e 27 e encaixados em forma de V na região dos pontos 36 e 21.

Os Topos são Plano-Ondulado, Arredondado e Plano. Existem vertentes amplas e curtas associados a formas: Convexa-Convexa (5), Convexa-Plana (4), Côncava -Convexa (8) no caso das amplas; e Côncava - Côncava (9), Côncava -Plana (7), Convexa- Côncava (6) no caso das curtas. Uma vista geral da região apresenta-se na FIGURA 81.

FIGURA 81 Visão desde o ponto 26 em direção aos pontos 35 e 57. Colinas suaves com topo planos e ondulados. Unidade A-3.

6.1.5.2 Sistema B

Dominam as declividades de 0-3 % e subordinadamente as de 3 –6% e 6-10 %. As litologias associadas são argilas siltosas e silto argilosas da Fm. Libertad com espessuras medidas de até 4 metros, o embasamento Precambriano na borda das unidades produz um aumento na declividade.

6.1.5.2.1 Unidade 4

As declividades de 0-3 % e 3 a 6% se apresentam em proporções semelhantes, com leve domínio da declividade de 3 –6%. Associado a áreas com declividades de 3 a 6 % se associa a Fm. Libertad sobre embasamento cristalino e/ou sedimentos arenosos da Fm Raigón, detectados no ponto 38, e o retransporte de sedimentos da Fm. Libertad na metade da vertente. GOSO (1965) denomina este tipo de unidade Libertad (II).

Os topos são alargados com formas Plana-Ondulada / Arredondados. As vertentes são amplas e médias com formas Convexa-Plana (4), Côncava -Plana (7), Convexa-Convexa (5) e Convexa- Côncava (6).

6.1.5.2.1 Unidade 5

Declividades de 0-3 % são as dominantes, associadas a espessuras de 5m ou mais de Fm. Libertad. Subordinadas se acham as declividades de 3-6%, associadas ao retrabalhamento da fm Libertad (Libertad II), enquanto as declividade de 6-10% acham-se associadas a Fm. Raigón e embasamento a pouca profundidade (menor que 3 metros) nas proximidades dos cursos fluviais. Nestas regiões se identificaram dois níveis loéssicos de 0,25 a 0,40 m de espessura no ponto 40, e um nível loéssico identificado nos pontos 69 e 47 (FIGURA 82).

Os topos são amplos com forma Plana a Plana-ondulada e Arredondado. Existem vertentes amplas, médias e curtas, com formas Convexa-Convex a (5), Côncava-Plana (7), Convexa-Plana (4) e Plana-Plana (1). Uma visão do relevo é apresentada na FIGURA 83.

FIGURA 82 Identificação de dois níveis de loess no ponto 40, Unidade B-5

FIGURA 83 Relevo de colinas suave na região do ponto 40, unidade B-5

6.1.5.2.2 Unidade 6

As declividades de 0-3 % são dominantes, associadas a espessuras de 4 m ou mais de Fm. Libertad, ocupando 70 a 80% da área, num plano alto, e a região divisória dos cursos de água da região. Subordinadas se acham as declividades de 3-6 %, associadas ao retrabalhamento da Fm. Libertad (Libertad II) depositada sobre o embasamento.

Os topos são amplos, Planos, Plano-Ondulado e Arredondados. As vertentes são curtas a médias associadas a formas Convexa-Plana (4), Côncava-Plana (7), Convexa-Convexa (5), Plana-Plana (1).

6.1.5.2.1 Unidade 7

Declividades de 0-3 % são as dominantes, associadas a espessuras de até 5 m ou mais de Fm. Libertad, ocupando a maior parte da área em um plano baixo. Subordinadas se acham declividades de 3-6%, associadas ao retrabalhamento da Fm Libertad, (Libertad II).

Os topos amplos apresentam formas Planas, e os curtos têm formas Plano Ondulada/Arredondada. As vertentes são curtas associadas a formas Plana-Plana (1), Côncava-Convexa (8), Côncava -Plana (7), Plana-Convexa (2) e as vertentes médias estão associadas a formas Convexa-Convexa (5), Plana-Convexa (2), Côncava-Côncava (9). Uma visão geral do relevo é apresentada nas FIGURA 84 e 85.

FIGURA 84 Topo plano no ponto 44, unidade B-7

FIGURA 85 Relevo de colinas suaves da unidade B-7

6.1.5.3 Sistema C

6.1.5.3.1 Unidade 8

A declividade dominante na área é de 0 a 1,5 % abrangendo 80 a 90%, as demais declividades estão associadas aos limites da planície, sendo influenciadas pelas litologias das unidades vizinhas (embasamento cristalino e Fm Fray Bentos). Na FIGURA 86 apresenta-se uma visão geral da unidade.

FIGURA 86 Planície associada ao A. Manga, Unidade C-8

6.2 Documentos Cartográficos Interpretativos

6.2.1 Carta de Potencial de Expansão da Fm. Libertad

A Carta de Potencial de Expansão foi elaborada usando os Mapas de Unidades Geológicas Superficiais, o Mapa de Landforms e os dados obtidos nos ensaios de caracterização e expansão. Na determinação dos critérios a utilizar para representar cartograficamente os diferentes materiais com diferentes características considerou-se:

- 1) em alguns dos ensaios de expansão das amostras secas ao ar, obteve-se valores de pressão muito baixos em comparação com amostras compactadas nos quais obteve-se valores mais altos de Pressão de Expansão,
- 2) a importância do ρ_d no fenômeno de expansão, reflexo da estrutura do solo, verificado nos ensaios das amostras compactadas,
- 3) a previsão de comportamento das amostras segundo a Carta de PEREIRA & PEJON (1999) e os resultados obtidos nos ensaios de expansão (seca ao ar e compactada) mostrou-se satisfatória.

Assim sendo optou-se por usar a qualificação do potencial de expansão obtida na Carta de PEREIRA & PEJON (1999) para todas as amostras de Fm Libertad, gerando classes de materiais com comportamento potencial equivalente e separados em faixas de 2 em 2 m de espessura, representando o potencial com a profundidade. Os valores de Pressão de Expansão limites do potencial de expansão são apresentados na TABELA 22.

TABELA 22 Pressão de Expansão e intervalos de Potenciais de Expansão associados

PRESSÃO EXPANSÃO (kPa)	POTENCIAL EXPANSÃO
< 75	Baixo
75 - 200	Médio
200 - 500	Alto
> 500	Muito Alto

6.2.2 Avaliação de terreno

Foram utilizadas os sistemas de landforms para mapear as diferentes unidades de Solos com Potencial de Expansão. O sistema A apresenta, nos primeiros dois metros da Fm. Libertad, Potencial de Expansão muito heterogêneo variando de Baixo a Muito Alto, predominando o Potencial de Expansão Médio; com aumento da profundidade os materiais passam a ser mais homogêneos, com Potencial Médio a Alto e Muito Alto.

A Unidade 1 apresenta duas unidades geológicas, Fm Fray Bentos e Libertad, com potencial de expansão médio nos perfis avaliados

A Unidade 2 foi dividida em duas subunidades:

A-2-1 com potencial de expansão baixo a médio nos primeiros dois metros,

A-2-2 com potencial de expansão Médio a Muito Alto nos primeiros dois metros e Potencial de Expansão Muito Alto de 2 a 4 m de espessura

A Unidade 3 foi dividida em 3 subunidades:

A-3-1 apresentando Potencial Baixo a Médio, nos primeiros dois metros e Potencial Médio de 2 a 4 metros,

A-3-2 apresentando Potencial Médio nos primeiros 4 metros de espessura e Potencial Alto a Muito Alto de 4 a 6 metros,

A-3-3 apresentando Potencial Médio a Alto nos primeiros dois metros e Potencial Médio de 2 a 4

O sistema B apresenta nos primeiros dois metros da Fm. Libertad Potencial de Expansão de Baixo a Médio sendo homogêneo, predominando o potencial Médio, enquanto com o aumento da profundidade o potencial varia de Baixo a Muito Alto.

A unidade B-4-1 apresenta Potencial Baixo a Médio em quatro metros de espessura.

A unidade 5 foi dividida em 2 subunidades:

B-5-1 com potencial Médio a Baixo nos dois primeiros metros, potencial Alto e Muito Alto de 2 a 4 m e potencial Médio aos 5 m

B-5-2 com Potencial Médio a Baixo nos dois primeiros metros e potencial Médio de 2 a 4 metros.

A unidade B-6 apresenta Potencial Médio nos dois primeiros metros e Potencial Alto de 2 a 4 metros.

A unidade B-7 apresenta Potencial Médio nos 4 metros de perfil analisados.

6.2.2.1 Evidências de problemas causados por solos expansivos

A seguir são apresentadas algumas evidências de problemas ocasionados, provavelmente, por solos expansivos em ruas e casas localizadas em algumas das unidades avaliadas.

Observa-se na FIGURA 87 o pavimento de concreto com rachaduras e os postes de telefone inclinados, indicadores da provável existência de solos expansivos, localizada na unidade A-3, qualificadas como de Potencial de Expansão Médio a Alto-Muito Alto, portanto as rachaduras poderiam estar vinculadas a processos de expansão.

Observa-se nas FIGURAS 88, 89 e 90 casas que apresentam rachaduras localizadas em regiões qualificadas como de Potencial de Expansão média e alta/ muito alta (unidade B-5). Estas rachaduras poderiam estar vinculadas a processos de expansão.

FIGURA 87 Pavimento com rachaduras e postes de luz inclinados, na região da Unidade A-3 (ponto 57)

FIGURA 88 Casa com rachaduras na região da Unidade B-5 (ponto 40)

FIGURA 89 Casa com rachaduras na região da Unidade B-5 (ponto 132)

Observa-se na FIGURA 91 que as casas que apresentam rachaduras estão localizadas em regiões qualificadas como de Potencial de Expansão Médio a Alto (Unidade B-6), sendo os danos observados resultado de processos de expansão do solo.

Observa-se na FIGURA 92 casas que apresentam rachaduras localizadas em regiões qualificadas como de Potencial de Expansão Médio (Unidade B-6).

FIGURA 90 Casa com rachaduras na região da Unidade B-5 (ponto 47)

FIGURA 91 Casa com rachaduras na região de unidade B-6

FIGURA 92 Casa com rachaduras na região da Unidade B-6 (ponto 44)

6.3 Proposta Metodológica de Mapeamento de Solos Expansivos

Uma das maiores dificuldades enfrentadas no desenvolvimento da pesquisa, foi a falta de uma metodologia de mapeamento específico de solos expansivos em escala de semi-detallhe e detalhe. As metodologias existentes, citadas no item 2.5.2 da REVISÃO BIBLIOGRÁFICA, foram desenvolvidas para escalas 1:1.000.000 ou menores, utilizando informações geológico-geotécnicas existentes (mineralogia da fração argila, valores de Pressão de Expansão, evidências de campo de problemas, com o ocorrência de rachaduras em construções civis, Limites de Liquidez e Índice Plasticidade altos, entre outras) das unidades que continham teores significativos de argila. Com essas informações atribuí-se um determinado potencial de expansão a uma unidade geológica e classificava-se o potencial dessa unidade. Porém não existe nenhum procedimento ou roteiro a seguir quando si se quer mapear solos expansivos em uma escala de semi-detallhe, de maneira a orientar a planificação do uso e da ocupação de uma determinada região. Considera-se de grande importância a elaboração de uma proposta que permita a identificação dos materiais expansivos por meio de ensaios simples e propriedades índices, tais como:

- a) CTC- determinada pela técnica de absorção de azul de metileno
- b) Estrutura e sucção considerados em função da determinação da massa específica aparente seca (ρ_d) e do grau de saturação (S_r)
- c) Ensaios de expansão livre e de pressão de expansão

Os trabalhos de Mapeamento Geotécnico têm como objetivo fundamental fornecer informação sobre as características do meio físico (potencialidade e limitações) que sejam úteis para o uso e ocupação de forma racional.

Considerando estes aspectos elaborou-se o roteiro apresentado na FIGURA 93, que fornece as diferentes etapas para caracterizar a expansibilidade dos solos argilosos e obter a sua representação cartográfica.

Definida a região de estudo e a escala de trabalho, realiza-se a revisão das informações precedentes das unidades geológicas, dos solos e das características geotécnicas desses materiais. Coleta-se os documentos cartográficos (mapas topográficos, geológicos, pedológicos, geotécnicos, etc.) e os produtos de sensoramento remoto (fotos aéreas, imagens de satélites, etc.). Elabora-se a carta básica e procede-se a fotointerpretação para identificar texturas típicas de solos expansivos (Giligai, Tacuruses) e separar as unidades de landforms. Em seguida Logo realiza-se os trabalhos de campo, visando reconhecer as feições típicas de

FIGURA 93 Fluxograma Guia para Identificação e Mapeamento de Solos Expansivos.

(2)* O potencial de Expansão deve ser determinado em amostras Indeformadas com umidade natural e secas ao ar.
 (3)* Os valores de pd e w podem adaptar-se em função dos materiais estudados.

FIGURA 93 (cont) Fluxograma Guia para Identificação e Mapeamento de Solos Expansivos

regiões com solos argilosos expansivos, casas e pavimentos com rachaduras, taludes descobertos com estrutura de empastilhamento (aspecto de “pop-corn”), rachaduras nos solos, entre outras, e para checagem das unidades de landforms. Realiza-se a identificação tátil visual e a determinação expedita da CTC usando azul de metileno.

Procede-se a retirada de amostras deformadas (2 a 4 kg de amostra) para determinações a realizar no laboratório. Determina-se a CTC, segundo a proposta de PEJON (1992). Para valores de CTC maiores que 10 cmol/kg realiza-se a análise granulométrica completa. Calcula-se a CTC da fração argila usando-se a fórmula :

$$CTC_{arg} = \frac{CTC_{solo}}{\% < 2\mu m} * 100$$

Logo de determina-se o potencial de expansibilidade do solo, usando a CTC_{solo} e a CTC_{argila}. Com base nessa classificação realiza-se ensaio de expansão em um número apropriado de amostras, considerando as diferentes classes de solos com diferentes valores de CTC_{solo}.

As amostras com valores de CTC_{argila} > 80 cmol/kg são qualificadas como SOLO EXPANSIVO, deve-se realizar a coleta de amostras indeformada para execução de ensaio de pressão de expansão com “umidade natural” e secas ao ar. Com as amostras restantes (CTC_{arg} < 80 cmol/kg), fazer ensaio de pressão expansão em amostras compactadas. Se nos ensaios determina-se que a amostras com maior pd geram pressões de expansão maior que 75 kPa, deve-se coletar-se amostras indeformadas e realizar ensaio de Pressão de Expansão com umidade natural e secas ao ar. Se a pressão gerada é menor a 75 kPa qualifica-se o solo como de expansibilidade baixa. Os limites dos valores de pd podem adequar-se ao tipo de material argiloso estudado.

O potencial de expansão é avaliado usando: os valores dos ensaios de pressão de expansão das amostras indeformadas, a profundidade e associa-se aos landforms identificados. Procede-se a verificação das unidades fazendo a coleta de amostras indeformadas em anéis (de tamanho do anel de consolidação) para determinação de CTC_{solo}, ρ_d , umidade, grau de saturação e verificação, em algumas amostras, do valor da Pressão de Expansão.

Reavaliados os dados com a checagem realizada no passo anterior, procede-se a elaboração da carta de potencial de expansão mediante o cruzamento dos mapas de landforms, de unidades geológicas e de materiais inconsolidados com as espessuras e os potenciais de cada intervalo de espessura considerado cada unidade de Landform.

CAPÍTULO 7 CONCLUSÕES

7.1 Gerais

A proposta metodológica elaborada para mapeamento de solos expansivos veio preencher uma lacuna referente a metodologias de mapeamento voltadas a caracterização deste materiais em escalas de semi-detulhe. Considera-se como uma proposta preliminar que deverá ser melhorada e detalhada a partir da contribuição de outros pesquisadores.

Verificou-se a complexidade do fenômeno de expansão e a relevância dos estudos com enfoque sistêmico em sua análise, sendo constatada a influência e inter-relações entre p_d , CTC e grau de saturação, principais fatores que afetam o comportamento expansivo do sistema solo.

A técnica de identificação de Landforms mostrou-se muito útil como ferramenta para delimitar unidades semelhantes, permitindo direcionar o trabalho de campo e diminuir o número amostras a coletar. O Mapa de Landforms associado aos Mapas de Unidades Geológicas Superficiais e a Carta de Declividade, auxiliou na delimitação de unidades homogêneas quanto ao Potencial de Expansão.

As classificações geotécnicas de solos (SUCS, AASHTO) mostraram-se orientativas com relação a identificação de solos expansivos, no entanto não permitem classificar o potencial expansivo do solo. Por outro lado, as cartas de previsão geralmente sobrestimam o potencial de expansão do solo; a carta de PEREIRA & PEJON (1999) foi a que mostrou-se mais satisfatória com relação a comparação entre os valores previstos e os obtidos nos ensaios de expansão.

Os valores obtidos nos ensaios de Expansão Livre e Pressão de Expansão não permitiram estabelecer correlações entre eles, fato que foi também constatado por PEREIRA (1999) em amostras da Fm. Guabirota.

Os valores de pressão de expansão obtidos nas amostras compactadas, mostraram a influência, no fenômeno de expansão, dos parâmetros relativos a mineralogia e a porcentagem da fração argila, a estrutura e a saturação do solo. O aumento dos valores de p_d e da CTC do solo e a diminuição do grau de saturação geraram um acréscimo nos valores da Pressão de Expansão.

7.2 Sobre a área mapeada

A Fm. Libertad apresenta características homogêneas com relação a granulometria da fração silte e argila, mas mostra-se heterogênea com respeito a mineralogia da fração argila. Na maioria das amostras os minerais dominantes na fração argila pertencem aos grupo das esmectita, seguida pela illita e por caulinita.

As intercalações de níveis de Loess e níveis silto-argilosos, indicador de gêneses diferentes para os materiais cartografados como Fm. Libertad, e as diferentes proporções dos argilo-minerais, mostram a inadequação do uso da definição lito-estratigráfica formal na avaliação do comportamento expansivo desta unidade geológica.

Os diferentes valores de p_d e grau de saturação, para amostras com mineralogia semelhante, geraram pressões de expansão diferentes. Isto revela a importância, no fenômeno de expansão, da história de tensões a qual foi submetido o solo.

A Carta de Previsão de Potencial de Expansão de PEREIRA & PEJON (1999) mostrou-se satisfatória na avaliação dos solos com baixo a nulo conteúdo de carbonato de cálcio.

A determinação da CTC usando o Azul de Metileno mostrou-se, para a região, como uma técnica rápida e eficaz para identificar e caracterizar os solos expansivos e associada a outros índices (massa específica seca e grau de saturação) poderá permitir a previsão do Potencial de Expansão com maior precisão.

A técnica de delimitação de Landforms permitiu identificar que as unidades com topos extensos e declividades baixas, associadas a presença da Fm Libertad, são as que apresentam os potenciais de expansão maiores. Foi possível identificar e mapear várias unidades dentro da Fm. Libertad com diferentes potenciais de expansão, produto da combinação de atributos obtidos durante os trabalhos de fotointerpretação, campo e laboratório.

A região estudada apresenta, em termos gerais, Potencial de Expansão Médio com locais com Potencial Alto e Muito Alto. A Carta de Potencial de Expansão gerada é um documento para orientar Engenheiros e Arquitetos no uso e a ocupação do território levando em conta as limitações pela presença de solos expansivos.

7.3 Sugestões para trabalhos futuros

A técnica de azul de metileno para determinar a CTC foi útil para a região estudada, porém deve verificar-se sua validade quando aplicada a outros solos argilosos para determinar suas características expansivas

A presença de carbonato de cálcio produziu uma redução nos valores da pressão de expansão, porém pesquisas para identificar como ele se encontra e como interage com os argilominerais devem ser realizadas para se conhecer melhor sua influência no fenômeno de Expansão

A Proposta de Mapeamento de Solos Expansivos deve ser aplicada em outras regiões de solos argilosos para verificar, corrigir e melhorá-la. Isto permitirá desenvolver mais rapidamente Cartas de Potencial de Expansão em regiões onde ocorrem danos e perdas econômicas nas obras civis por não ter uma ferramenta eficaz de mapeamento.

CAPÍTULO 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUILAR GOSO, C (1999) *Análise estratigráfica do Grupo Paysandú (Cretáceo) na bacia do litoral, Uruguai*. Rio Claro. 1 v. 184p. Tese (Doutorado). Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista (Unesp).
- AL-RAWAS, A. & QAMARUFFIN, M. (1998) Construction Problems of Engineering Structures Founded on Expansive Soils and Rocks in Northern Oman. *Building and Environment* v. 33, N2-3, p.159-171
- AL-RAWAS, A. A.(1999) The factors controlling the expansive nature of the soils and rocks of northern Oman. *Engineering Geology* v. 53, p.327-350.
- AL-SHAMRANI, M. A. & AL-MHAIDIB, A. (1999) Prediction of potential vertical swell of expansive soils using a triaxial stress path cell. *Quarterly Journal of Engineering Geology* v. 32, p.45-54.
- ANTON, D. & GOSO, H. (1974) Estado Actual de los Conocimientos sobre el Cuaternario en el Uruguay. Dirección de Suelos y Fertilizantes. Ministerio de Agricultura y Pesca. 12pp Inédito
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1984) *NBR 6459 Solo - Determinação do Limite de Liquidez*. Rio de Janeiro
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1984) *NBR 6508 Grãos do solo que passam na peneira de 4.8 mm- Determinação da massa específica*. Rio de Janeiro
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1984) *NBR 7180 Solo - Determinação do Limite de Plasticidade*. Rio de Janeiro
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1984) *NBR 7181 Solo - Análise Granulométrica*. Rio de Janeiro.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1986) *NBR 6457 Amostras de solo- Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização*. Rio de Janeiro
- AYALA, F. J.; GIJON, M. F. OTEO MAZO, C. O. (1986) *Mapa Previsor de Riesgos de Expansividad de Arcillas en Espanha a escala 1:1.000.000*. Centro de Estudios Experimentales (CEDEX) & Instituto Geologico y Minero de Espana.
- BASMA, A. A; AL-HOMOUD A S.; HUSEIN, A (1995) Laboratory assessment of swelling pressure of expansive soils. *Applied Clay Science* V. 9, p.355-368.
- BASTOS, C. A B. & ALVEZ, A M. L.(1996) Unidades geotecnicas de solos da planicie costeira sul do Rio Grande do Sul. 8 Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia. 227-238 pp. Rio de Janeiro.
- BERTALANFFY, L. V. (1977) *Teoria geral dos sistemas* 3ra ed. Petropolis, Ed. Vozes Ltda
- BISHOP, A. W. & WESLEY, L.D. (1975) A hydraulic triaxial apparatus for controlled stress path testing. *Géotechnique*, V. 25, p. 657-670.
- BOSSI, J. & NAVARRO, R (1988) *Geología del Uruguay*. Depto. De Publicaciones Universidad de la Republica, Montevideo.
- BOSSI, J, PRECIOZZI, F. & CAMPAL, N. (1993) Predevoniano en el Uruguay. Tomo I- Terreno Piedra Alta. DINAMIGE. Ministerio de Industria Energia y Minería, Montevideu.
- BANLEY, S. W. (1980) Structure of layer silicates. In. BRINDLEY, G. W. & BROWN, G. eds.(1980) *Cristal structures of clay minerals and their X-ray identification*. Mineralogical Society Monograph Nº 5. London.
- BROWN, G. & BRIDLEY, G. W. (1980) X-ray Diffraction procedures for clay mineral Identification In. BRINDLEY, G. W. & BROWN, G. eds.(1980) *Cristal structures of clay minerals and their X-ray identification*. Mineralogical Society Monograph Nº 5. London.
- CARRILLO, A. (1975). Suelos Expansivos. Vº CONGRESO PANAMERICANO DE MECÂNICA DE SOLOS E ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES. v. IV, p.75-105.
- CHEN, F. H. (1975) *FOUNDATIONS ON EXPANSIVE SOILS*. Amsterdã, ELSEVIER .
- COCKA, E. & BIRAND, A. (1993) Determination of cation exchange capacity of clayey soils by the methylene blue test. *ASTM Geotechnical Testing Journal*. v. 16, Nº 4 518-524.
- DAVISON DIAS & MITLITITSKY (1994) Metodología de classificação de unidades e perfis geotécnicos desenvolvida na UFRGS. *Revista Solos e Rochas* v. 17, p.81-91.

- DE SOUZA, S; GOSO AGUILAR, C.; HAZARD, D. & NAHOUM, B. (1998) *Carta Geotécnica del Sector Centro de la Zona Suburbana Montevideo, a Escala 1:20.000*. XI Congreso Brasileiro de Mecânica de Solos e Engenharia Geotécnica, Brasília. P.537 – 545.
- DINAMIGE (2000) MAPA GEOLOGICO DEL URUGUAY. <http://www.dinamige.gub.uy> (14/9/2000).
- EROL, A O & DHOWIAN, A (1990) Swell behaviour of arid climate shales from Saudi Arabia. *Quarterly Journal of Engineering Geology* v. 23, p.243-254.
- FABBRI, A. J. & PERINI, T. F. (1982) Suelos expansivos de la provincia de Santa Fe. CONGRESO ARGENTINO DE GEOTECNIA, p.199-214.
- FENG, M.; GAN, J. K. M. and FREDLUND, D. G. (1998) A laboratory study of swelling pressure using various test methods. Proceedings of the Second International Conference on Unsaturated Soil, p. 350-355. Beijing, China.
- FRAZÃO, E. B. & GOULART, E. P. (1976) *Aspectos as Expansibilidade de Argilo-minerais – Algumas implicações em obras civis*. 1 Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia. v. 2, Rio de Janeiro
- GONZALES BERNALDES (1981) *Ecología y Paisaje*. Madrid, H.BLUME EDICIONES.
- GOSO, H (1965) El Cenozoico en el Uruguay. Instituto Geológico del Uruguay. Inédito 34 pp.
- GOSO, H. (1986) Jornada de Geología y Estratigrafía del Cuaternario. *Revista da Sociedad Uruguaya de Geologia* v. 2, n. p. 3 12-17.
- GOSO, H.; NAHOUM, B.; BEHAK, L.; DE SOUZA, S. (1993). *Cartografia a partir de informacion geotecnica obtenida al efecto: un ejemplo de aplicación. Carta Geotécnica de la Zona Suburbana de Montevideo. Area piloto de Carrasco-Punta Gorda (Montevideo)*. 7 Congreso Brasileiro de Geologia de Engenharia. p. 201 - 221. Poços das Caldas.
- GOSO, C; OYHANTÇABAL, P.; MUZIO, R.; VEROSLAVSKY, G (1989, a) Memoria Explicativa y Carta Geológica de fotoplano “La Unión”. a escala 1:100.000. Facultad de Ciencias –DINAMGE. Montevideo. /no prelo/
- GOSO, C; OYHANTÇABAL, P.; MUZIO, R.; VEROSLAVSKY, G (1989, b) Memoria Explicativa y Carta Geológica de fotoplano “La Barra” a escala 1:100.000. Facultad de Ciencias –DINAMGE. Montevideo. /no prelo/
- GRANT, K (1972) Terrain evaluation. A logical extension of engineering geology. Proceedings of the 1th IAEG Congress, Paris, v2: p. 971-980.
- GRIM, R. E. (1953) *Clay Mineralogy*. McGraw-Hill Book Company, INC. USA

- HOLTZ, W. G & GIBBS, H. G. (1956) Engineering properties of expansive clays. *TRANSACTIONS, ASCE* v 121, p.641-663.
- IAGE (1976) *Engineering Geological Maps: A guide to their preparation*. Paris: Unesco Press. 79p.
- INTENDENCIA MUNICIPAL DE MONTEVIDEO (IMM) (1999) Plan de Ordenamiento Territorial de Montevideo.
- INSTITUTO DE PESQUISA TECNOLÓGICA do ESTADO DE SÃO PAULO (IPT) (1981) Mapa Geológico do Estado de São Paulo.
- IYER, B. (1987) Influence of procedural Factors on the swelling Behaviour of Soils. 6th. International Conference on Expansive Soils, New Delhi, India, p.149-154.
- JIMENEZ SALAS, J. A & ROY, M. (1987) Preliminary Evaluation of the Swelling Danger- Overview on the Spanish Practice. 6th. International Conference on Expansive Soils, New Delhi, India. 217-224 pp.
- JHONES, D. E. & HOLTZ, W. G. (1973) Expansive soils- the hidden disaster. *Civil Engineering, ASCE* v. 43, n. 8, p. 49
- JOST, H. (1975) Cenozoic stratigraphic of the Rio Grande do Sul Coastal Province, SE Brazil. *Boletim Paranaense de Geociências*. V. 3, p. 54-55
- JUCÁ, J. F. T.; FERREIRA, R. N. and BASTOS, E. G. (1998) Volume change and shear strength of an unsaturated expansive clay. *Proceedings of the Second International Conference on Unsaturated Soil*, 72-77pp. Beijing China.
- JUSTO, J.L.; DELGADO, A. and RUIZ, J. (1984) The influence of Stress-path in the Collapse-Swelling of Soils at Laboratory. 5th International Conference Expansive Soils, Adelaide.
- KIEFER, R. W. (1967) Terrain analysis for metropolitan fringe area planning. *Journal of the URBAN PLANNING AND DEVELOPMENT DIVISION*, v. 93 n. Up4, 119-139.
- KOMORNIK & DAVID (1969) Prediction of swelling pressure of clays. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division ASCE*, v. 95, n. SM1, p.209-25.
- LAMBE, T. W. (1958) The engineering behaviour of compacted clay. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division ASCE*, v. , n. SM5,
- LAMBE, T. W. (1960) The character and identification of Expansive Soils, Soil PVC meter. Federal Housing Administration, Technical Studies Program. FHA 701.
- LAN, T. N (1977) Un nouvel essai d'identification des sols. le essai au bleu de méthylène. *Bulletin of Liaison Laboratories des Ponts et Chousses*. N° 88, 136-137.
- LANG, H. J. (1989) The Importance of Clay Mineralogical Investigations for the Engineer. *Applied Clay Science* N 4, 97-103.

- LAUTRIN, D. (1989) Utilisation pratique des paramètres dérivés de l'essai au bleu de méthylène dans les projets de génie civil. *Bulletin of Liaison Laboratories des Ponts et Chousses*. n. 160, p.53-68.
- LEITE, A. L. (1998) *Avaliação da variabilidade da difusão molecular em solos naturais compactados uma perspectiva para uso em liners*. REVISION BIBLIOGRAFICA (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo.
- LIMA, A. M. M. (2000) Mapeamento geotécnico da porção média da bacia do rio Capivari/sp, escala 1:50.000: estudo e caracterização dos aspectos físicos de bacias hidrográficas. São Carlos, 2 v. 136p. Dissertação (Mestrado) Escola de Engenharia de São Carlos- Universidade de São Paulo.
- LOLLO, J. A & ZUQUETTE, V (1997) AVALIAÇÃO DO TERRENO APLICADA A ELABORAÇÃO DO PROCESSO DE MAPEAMENTO GEOTÉCNICO. Apostila SGS – 820 – Aerofotointerpretação e Processos de Elaboração de Mapeamento Geotécnico
- LOPES, P. M. S (2000) *Estudo dos atributos do meio físico como base para o zoneamento geoambiental das bacias do rio passa cinca e rio da cabeça: ESCALA 1:50.000*. São Carlos, 2v. Dissertação (Mestrado) Escola de Engenharia de São Carlos- Universidade de São Paulo.
- LOPEZ, T; ZEPEDA, J. A; CASTANO, V.; PENA, C.;SALCEDO, C.; CARRETO, E. (1999) Aplicación de Técnicas Alternativas de Identificación Mineralógica en la Caracterización de un suelo Arcilloso Expansivo. XI CONGRESO PANAMERICANO DE MECÁNICA DE SUELOS E INGENIERIA GEOTECNICA, 885-891 pp. FOZ DE IGUAZU, BRASIL.
- MADSEN, F. T. (co-ordinator) (1999) SUGGESTED METHODS FOR LABORATORY TESTING OF SWELLING ROCKS. INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCKS MECHANICS COMMISSION ON SWELLING ROCKS AND COMMISSION ON TESTING METHODS. *International Journal of Rocks Mechanics and Mining Science* V 36, p.291-306.
- MADSEN, F. T. & MULLER-VONMOOS, M. (1989) The Swelling Behaviour of Clays. *Applied Clay Science* N 4, p.143-156.
- MAGNAN, J. P. & YOUSSEFIAN, G. (1989) Essai au bleu de méthylène et classification géotechnique des sols. *Bulletin of Liaison Laboratories des Ponts et Chousses*. N° 159, p.93-104
- MARTIN, R. T. (1991) Report of the clay minerals society nomenclature committee: Revised classification of clay materials. *Clays and Clay Minerals*, V. 39 No. 3, p.333-335.

- MEANS, R. E. & PARCHER, J.V. (1965) *PHYSICAL PROPERTIES of SOILS*. PRENTICE-HALL OF INDIA(PRIVATE) LTD., Nova Delhi.
- MEISINA, C. (2000) Prediction swelling/shrinkage potential using the blue methylene method: some examples in italian clayey soils.(CD-ROM) GEOENG2000 AN INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOTECHNICAL & GEOLOGICAL ENGINEERING. Melbourne, 2000. *Resumo* v. 1 p.598.
- MILNE, G.(1935) Some suggested units of classification and mapping, particularly for East African soil. *Soil Research*, v. 4, n. 3, p. 183-198
- MINISTERIO DE AGRICULTURA Y PESCA (1975) *Carta de Suelos del Uruguay escala 1:1.000.000*. Montevideo.
- MINISTERIO DE AGRICULTURA Y PESCA (1982) *Carta de Reconocimiento de Suelos de la República Oriental del Uruguay a escala 1:100.0000*. Departamentos de Canelones y Montevideo. Montevideo, DS. MAP. 12 mapas.
- MITCHEL, C. W. (1991) *Terrain evaluation. An introductory handbook to the history, principles and methods for practical terrain assessment*. Londres, LONG MAN SCIENTIFIC & TECHNICAL.
- MITCHELL, J. K. (1993) *Fundamentals of Soil Behavior*. Second Edition New York, John Wiley & Sons, Inc.
- NAHOUM, B.; PREFUMO, J. E.; GOSO, C.; CHAPUIS, D.; PEYRONEL, S. (1996) *La problemática de los materiales expansivos como fundación de construcciones livianas. estudio de caso: formaciones Libertad-Dolores*. 8 Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia.p. 215-226. Rio de Janeiro.
- NELSON, J.D. & MILLER, . (1992). *Expansive Soils: problems in practice in foundation and pavement engineering*. New York, John Wiley & Sons, Inc.
- NOE, D. C. & DODSON, M. D. (1995). The Dipping Bedrock Overlay District: An area of potential heaving bedrock hazards associated with expansive, steeply dipping bedrock in Douglas County, Colorado. *Colorado Geological Survey Open-File Report OF-95-5*. http://www.surevoid.com/surevoi_web/soil_map/co.html (06/10/99).
- OLIVE, W.W.; CHLEBORAD, A F.; FRAHME, C. W.; SCHLOKER, J.; SCHNEIDER, R. R. and SHUSTER, R. L. (1989). *Swelling Clays Maps Of The Conterminous United States*. U. S. Geological Survey Publication. http://www.surevoid.com/surevoi_web/soil_map/co.html (06/10/99)

- OLOO, S.; SCHREINER, H. D. and BURLAND, J. B. (1987) *Identification And Classification of Expansive Soils*. 6th. International Conference on Expansive Soils, New Delhi, India. p.23-29.
- OSIPOV, V. I. & SERGEEV, E. M. (1972) Crystallochemistry of Clay Minerals and their Properties. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology* n. 5, p.9-16.
- OTEO, C. , SALINAS, J.L. & FERRER, M. (1987) Metodología del mapa previsor de riesgos por expansividad de arcillas en Espanha a escala 1:1.000.000. *Boletín de la Sociedad Espanola de Mecanica de los Suelos y Cimentaciones* n. 85, p.11-17, Ene/Feb/Mar.
- PANARIO, D. (1988) Geomorfología del Uruguay. Depto. De Publicaciones Facultad de Humanidades y Ciencias. Universidad de la República. 32 pp.
- PEJON, O J. (1992) *Mapeamento geotecnico regional da folha de Piracicaba-SP (escala 1.100.000) estudo de aspectos metodologicos, de caracterização e de apresentação de atributos*. São Carlos. 2 v. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo
- PEREIRA, E. M. (1999) *Estudo do potencial expansivo dos materiais argilosos da Formação Guabirotuba na região do Alto Iguaçu-Pr. ...p.* São Carlos, v. Dissertação (Mestrado).Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo
- PEREIRA, E. M. & PEJON, O J. (1999) Evaluación de la Susceptibilidad a la Expansión en la Región de Alto Iguaçu-PR-Brasil. XI CONGRESO PANAMERICANO DE MECANICA DE SUELOS E INGENIERIA GEOTECNICA, FOZ DE IGUAZU, BRASIL, 1999. *Anais*. p.255-261.
- PRECIOZZI, F. ; SPOTURNO, J.; HEINZEN, W.; ROSSI, P. (1988) Carta Geológica del Uruguay a escala 1:500.000. Dirección Nacional de Minería y Geología. Ministerio de Industria y Energía.
- PRESA, E. P. (1984). *Deformabilidad de las arcillas expansivas bajo succión controlada*. Madrid, Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. Espanha.
- QUINTANA CRESPO, E. (1998) *Análisis estadístico del valor soporte de los suelos loessicos de Córdoba*. ENCUENTRO DE GEOTECNICOS ARGENTINOS GT'98. Córdoba, Argentina. Sesión II.6, p.1-10.
- RAGOZIN, A L. (1994) *Basic principles of natural hazard risk assessment and management*. 7th International IAEG Congress. p.1277-1286.

- SALINAS RODRIGUEZ, J.L. & OTEO MAZO, C. (1989) INVESTIGACIÓN FR PARÁMETROS GEOTÉCNICOS EN RELACIÓN CON LA EXPANSIVIDAD DE LOS SUELOS ARCILLOSOS ESPAÑOLES. *Boletín de la Sociedad Española de Mecánica de los Suelos y Cimentaciones* n. 96, p.10-26, Oct/Nov/Dic.
- SAUJENOUD (1972) La cartographie géotechnique en France. Paris. *Bulletin of Liaison Laboratories des Ponts et Chausse*.
- SCHAEFFNER, M.(1989) Introduction de la valeur de blue méthyleène d'un sol dans la classification des sols de la Recommandation pour les terrassements routiers. *Bulletin of Liaison Laboratories des Ponts et Chaussées*. n. 161, p 9-16.
- SCHREINER, H. D. & BURLAND, J. B. (1991) A comparison of the three swell test procedures. in *Geotechnics in the African Environment*, BLIGHT et al (eds.) Balkema, Rotterdam. p. 259-266.
- SEED, H. B.; WOORDWARD, R. J. and LUNDGREN, R. (1962) prediction of swelling potential for compacted clays. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division ASCE*, v 88. n. 88 SB 3, p.53-87.
- SETEMBRINO, P & FÚLFARO, V.J. (1983) *Geologia do Brasil*. T A QUEIROZ, EDITOR, LTDA.
- SEVEROVA, V (1997) CLASIFICACIÓN CLIMÁTICA. Unidad de Meteorología, Facultad de Ciencias, Universidad de la República. <http://www.rau.edu.uy/uruguay/geografia/uy-c-info.htm>.
- SILVA FILHO (1976) Comportamento expansivo de algumas Formações Sedimentares no Rio Grande do Sul e em Santa Catarina. Separata Revista Estudos Tecnológicos Nº 1. Acta Geológica Leopoldensia – Universidade do vale do Rio dos Sinos. v. 1, n. 1.
- SIVAPULLAIAH, P. V. (1987) Inter Layer Swelling of Na, Ca-Montmorillonite Clays. 6th. International Conference on Expansive Soils, New Delhi, India. p. 423-426.
- SKEMPTON (1953) The Colloidal "Activity" of Clays. Proceedings of the International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. V. I, p57-61.
- SRIDHARAN & PRAKASH (1998) Mechanism Controlling the Shrinkage Limit of Soils. . *Geotechnical Testing. Journal, GTJODJ*, V 21, Nº 3, September, p. 240-250.
- SRIDHARAN & PRAKASH (2000) Shrinkage Limit of Soil Mixtures. *Geotechnical Testing. Journal, GTJODJ*, V 23, Nº 1, March, p. 3-8.
- TOURENQ, C & LAN, T. N (1989) Mise en évidence des argiles par l'essai au blue de méthylène. Application aux sols, roches et granulats. *Bulletin of Liaison Laboratories des Ponts et Chaussées*. n. 159, p.79-92.

- TREVISAN, S. J. (1987) *Suggestions for a Site investigation Manual in Active Clays*. 6th. International Conference on Expansive Solis, New Delhi, India, p.337-342.
- UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA ORIENTAL DEL URUGUAY ,Facultad de Ingenieria, Departamento de Geotecnia. (1997) *Carta Geotécnica Región Metropolitana de Montevideo, escala 1:100.000*. Montevideo.
- UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA ORIENTAL DEL URUGUAY ,Facultad de Ingenieria, Departamento de Geotecnia. (1998) *Carta Geotécnica de Región Urbana y suburbana de Montevideo, escala 1:20.000, Hoja 3*. Montevideo
- UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. Escola de Engenharia de São Carlos. Serviço de Biblioteca (1996). *Diretrizes para elaboração de dissertações e teses na EESC-USP*. São Carlos.
- WILLIAMS, A A B. & DONALDSON,G. W. (1980) *Building on expansive soils in South Africa : 1973 – 1980*. Fouth International Conference of Expansive Soils. Denver, Colorado.
- ZUQUETTE, L. V. (1987) *Análise Crítica da Cartografia Geotécnica e Proposta Metodológica para as Condições Brasileiras*. São Carlos.3 v. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo.
- ZUQUETTE, L. V. (1993) *Importância do Mapeamento Geotécnico no Uso e Ocupação do Meio Físico: Fundamentos e Guia para Elaboração*. São Carlos. 2 v. Tese (Livre-Docencia). Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo.
- ZUQUETTE, L. V.; PEJON, O. J.; GANDOLFI N. and RODRIGUES, J. E. (1997) MAPEAMENTO GEOTÉCNICO :PARTE 1- ATRIBUTOS E PROCEDIMENTOS BÁSICOS PARA ELABORAÇÃO DE MAPAS E CARTAS. *GEOCIÊNCIAS* v. 16 n. 2, p.491-524.
- ZUQUETTE, L. V. & KATAZAWA, V. A (1997) Carta de Geologia de Engenharia. In: OLIVERA, A M. S. & BRITO, S. N. Ed. *Geologia de Engenharia*, ABGE, São Paulo. Cap. 17, p. 283-300

ANEXO I

Mapa de Documentação

Mapa de Documentação

38° 65'

6151.000

Legenda

Estradas e ruas

Drenagens

26

Ponto de observação

43

Ponto de Coleta de Amostra Deformada

41

Ponto de Coleta de Amostra Deformada e Indeformada

CGH3-5

Ponto de Amostragem da Carta Geotécnica de Montevideu- Folha 3- Depto. Geotecnia -FI-UDELAR

A-765

Poço DINAMIGE

6149.000

38° 68'

ANEXO I

Localização da região estudada nas folhas topográficas escala 1:10.000
Fonte: Serviço Informação Geográfica -IMM, Serviço Geográfico Militar

Valores para o ponto (483.700,6143.000) em 1998
Variação anual 0° 20' W

471.000
62° 30'

Elipsoide HAYFORD (1924)
Quadrícula Plana, origem X_o- 500 km ao oeste do Meridiano 62°, Y_o- Pólo Sul
Projeção Gauss - (Meridiano de Contato 62°)
Datum Vertical Nível médio das águas do porto de Montevideu (Decreto lei 20/05/1949)
Datum Horizontal I - Yacaré

Fonte: Serviço Geográfico Militar, Montevideu- Uruguai

EESC - USP
Dep. de Geotecnia

Universidade de São Paulo
Escola de Engenharia de São Carlos
Departamento de Geotecnia

Estudo do Fenômeno de Expansão dos Sedimentos da Formação Libertad (Quaternário): Metodologia de Avaliação e Mapeamento na Região de Montevideu-Uruguai

Autor: Marcos Andrés Musso Laespiga
Orientador: Prof. Dr. Osni José Pejon

ANEXO II

Mapa Topográfico

Mapa Topográfico

38° 65'

6151.000

Legenda

Curvas de nível cada 2 m

Drenagens

Estradas e Ruas

6149.000

38° 68'

ANEXO II

Localização da região estudada nas folhas topográficas escala 1:10.000
Fonte: Serviço Informação Geográfica -IMM, Serviço Geográfico Militar

Valores para o ponto (483.700,6143.000) em 1998
Variação anual 0° 20' W

467.000 469.000 471.000 473.000

62° 30'

Elipsoide HAYFORD (1924)
Quadrícula Plana, origem X₀ 500 km ao oeste do Meridiano 62°, Y₀ Pólo Sul
Projeção Gauss - (Meridiano de Contato 62°)
Datum Vertical Nível médio das águas do porto de Montevideú (Decreto lei 20/05/1949)
Datum Horizontal I - Yacaré

Fonte: Serviço Geográfico Militar, Montevideú- Uruguai

Escala 1:10.000

EESC - USP
Dep. de Geotecnia

Universidade de São Paulo
Escola de Engenharia de São Carlos
Departamento de Geotecnia

Estudo do Fenômeno de Expansão dos Sedimentos da
Formação Libertad (Quaternário): Metodologia de
Avaliação e Mapeamento na Região de
Montevideú-Uruguai

Autor: Marcos Andrés Musso Laespiga
Orientador: Prof. Dr. Osni José Pejon

ANEXO III

Carta de Declividade

Carta de Declividade

38. 65'

6151.000

Legenda

Declividade

6149.000

38. 68'

ANEXO III

Localização da região estudada nas folhas topográficas escala 1:10.000
Fonte: Serviço Informação Geográfica -IMM, Serviço Geográfico Militar

Valores para o ponto (483.700,6143.000) em 1998
Variação anual 0° 20' W

Elipsoide HAYFORD (1924)
Quadrícula Plana, origem X- 500 km ao oeste do Meridiano 62., Y- Pólo Sul
Projeção Gauss - (Meridiano de Contato 62.)
Datum Vertical Nível médio das águas do porto de Montevidéu (Decreto lei 20/05/1949)
Datum Horizontal I - Yacaré

Fonte: Serviço Geográfico Militar, Montevidéu- Uruguai

Escala 1:10.000

EESC - USP
Dep. de Geotecnia

Universidade de São Paulo
Escola de Engenharia de São Carlos
Departamento de Geotecnia

Estudo do Fenômeno de Expansão dos Sedimentos da
Formação Libertad (Quaternário): Metodologia de
Avaliação e Mapeamento na Região de
Montevidéu-Uruguai

Autor: Marcos Andrés Musso Laespiga
Orientador: Prof. Dr. Osni José Pejon

ANEXO VI

Carta de Potencial de Expansão dos Sedimentos da Fm. Libertad

Mapa de Landforms

Legenda

SISTEMA A Dominam as declividades de 3 a 10 %, associado ao embasamento Pré-cambriano à pequena profundidade e espessuras da Fm. Libertad maiores que 4 m.

6151.000

UNIDADE 1-Declividades de 3 a 6 % e 10 a 20 % subordinadas. Topos de formas plana ondulada e plana, vertentes curtas dominando as formas Convexa-Convexa e Convexa-Plana.

UNIDADE 2 -Declividades 10 a 20 % subordinadas, com presença de matações. Topos de formas alongadas e vales encaixados em forma de V. Topos de formas Plano-Ondulada, Arredondada e Sela. Vertentes curtas e médias Convexa-Convexa, Côncava-Plana, Côncava -Convexa, Convexa-Plana. Associada a Fm. Montevideo aflorante e Fm. Libertad pouco espessa.

UNIDADE 3 -Declividades de 0 a 3% e 3 a 6 %, em proporções semelhantes. Topos mais amplos em relação a UNIDADE 2 com espessuras de 3 a 6 m de Fm. Libertad. Vales amplos e encaixados. Topos Plano, Ondulado e Arredondado. Vertentes amplas Convexa-Convexa, Convexa Plana e Côncava-Convexa e curtas Côncava-Côncava, Côncava-Plana, Convexa-Côncava.

SISTEMA B Dominam as declividades de 0 a 3 % associadas a Fm Libertad, com espessuras maiores que 4m.

UNIDADE 4-Declividades de 0 a 3 % e de 3 a 6% abrangem áreas semelhantes. Os topos estão associados ao primeiro intervalo de declividades apresentando formas Plana-Ondulada e Arredondada das unidades da Fm. Libertad (1) e (2) respectivamente. Na segunda faixa de declividades associam-se as unidades Libertad (2), Libertad sobre embasamento, e embasamento da Fm. Montevideo na porção média das vertentes amplas e médias Convexas-Plana, Côncava-Plana, Convexa -Convexa e Convexa- Côncava.

UNIDADE 5 Declividades de 0 a 3 % dominantes associadas a topos Planos e Plano-Ondulados associados a 5 m ou mas da Fm Libertad (1) e presença de níveis de Loess, e vertentes amplas Convexa-Convexa e Plano-Convexa . As declividades de 3 a 6 % estão associadas a Fm. Libertad (2) nas zonas médias das vertentes médias e curtas Convexa-Plana, Côncava-Plana. As maiores declividades estão associadas a proximidade da superfície das formações Montevideo e Raigón.

UNIDADE 6 -As declividades dominantes estão associadas a topos amplos Planos e Plano-Ondulados associados a Fm. Libertad (1). As declividades maiores que 3 % estão associadas aos materiais da Fm. Libertad (2) nas porções médias das vertentes curtas e médias com formas Convexa-Plana, Côncava-Plana, Convexa-Convexa e Plana -Plana.

6149.000

UNIDADE 7 -Ocupa principalmente um plano com declividade na direção norte. As declividades dominantes estão associadas a Fm. Libertad (2) com topos amplos Planos e Plano-Ondulado, com 5 m ou mais de espessura. As maiores declividades estão associadas as vertentes curtas Plana-Plana, Côncava-Convexa, Côncava-Plana, Plana-Convexa.

SISTEMA C

38, 68'

UNIDADE 8 -Sistema com declividades de 0 a 1,5 %, associadas a planície do arroio Manga. As litologias associadas são aluviões areno silto argiloso. As declividades maiores estão nas bordas da unidade, associadas as litologias das formações Montevideo e Fray Bentos principalmente.

ANEXO IV

EESC – USP
Dep. de Geotecnia

Universidade de São Paulo
Escola de Engenharia de São Carlos
Departamento de Geotecnia

Estudo do Fenômeno de Expansão dos Sedimentos da Formação Libertad (Quaternário): Metodologia de Avaliação e Mapeamento na Região de Montevideu-Uruguai

Autor: Marcos Andrés Musso Laespiga
Orientador: Prof. Dr. Osni José Pejon

Localização da região estudada nas folhas topográficas escala 1:10.000
Fonte: Serviço Informação Geográfica -IMM, Serviço Geográfico Militar

Valores para o ponto (483.700,6143.000) em 1998
Variação anual 0° 20' W

467.000

62, 40'

469.000

62, 30'

471.000

62, 30'

473.000

62, 30'

62, 30'

62, 30'

62, 30'

62, 30'

62, 30'

62, 30'

62, 30'

62, 30'

ANEXO V

Mapa de Unidades Geológicas Superficiais

Mapa de Unidades Geológicas Superficiais

38. 65'

6151.000

Legenda

- Aluviões
- Fm. Libertad
- Unidade associada a Fm. Libertad apoiada sobre a Fm. Montevidéo (espessura de 1 a 2 m)
- Unidade Libertad (II) apoiada sobre a Fm. Montevidéo, Fm. Raigón e Libertad (I) (espessura de maior a 2 m)
- Unidade Libertad (I) apoiada sobre a Fm. Montevidéo, Fm. Fray Bentos, Fm. Raigón, (espessura de maior a 4 m)
- Fm. Raigón apoiada sobre Fm. Montevidéo, Fm. Fray Bentos
- Fm. Fray Bentos apoiada sobre Fm. Montevidéo
- Fm. Montevidéo - Granitos, Granitos deformados, Gnaisses, Gnaisses Anfíbolíticos
- Fm. Montevidéo - Anfíbolito

6149.000

38. 68'

ANEXO V

Localização da região estudada nas folhas topográficas escala 1:10.000
Fonte: Serviço Informação Geográfica -IMM, Serviço Geográfico Militar

Valores para o ponto (483.700,6143.000) em 1998
Variação anual 0° 20' W

EESC – USP
Dep. de Geotecnia

Universidade de São Paulo
Escola de Engenharia de São Carlos
Departamento de Geotecnia

Estudo do Fenômeno de Expansão dos Sedimentos da
Formação Libertad (Quaternário): Metodologia de
Avaliação e Mapeamento na Região de
Montevidéu-Uruguai

Autor: Marcos Andrés Musso Laespiga
Orientador: Prof. Dr. Osni José Pejon

ANEXO VI

Carta de Potencial de Expansão dos Sedimentos da Fm. Libertad

Carta do Potencial de Expansão dos Sedimentos da Fm. Libertad

Legenda

SISTEMA UNIDADE SUB-UNIDADE

A - 3 - 1
ND - MATERIAIS NÃO AVALIADOS, PERTENCENTES A OUTRAS UNIDADES GEOLÓGICAS

ANEXO VI

Localização da região estudada nas folhas topográficas escala 1:10.000
Fonte: Serviço Informação Geográfica -IMM, Serviço Geográfico Militar

Valores para o ponto (483.700,6143.000) em 1998
Variação anual 0° 20' W

Elipsoide HAYFORD (1924)
Quadrícula Plana, origem X₀- 500 km ao oeste do Meridiano 62°, Y₀- Pólo Sul
Projeção Gauss - (Meridiano de Contato 62°)
Datum Vertical Nível médio das águas do porto de Montevidéu (Decreto lei 20/05/1949)
Datum Horizontal I - Yacaré

Fonte: Serviço Geográfico Militar, Montevidéu- Uruguai

EESC - USP
Dep. de Geotecnia

Universidade de São Paulo
Escola de Engenharia de São Carlos
Departamento de Geotecnia

Estudo do Fenômeno de Expansão dos Sedimentos da Formação Libertad (Quaternário): Metodologia de Avaliação e Mapeamento na Região de Montevidéu-Uruguai

Autor: Marcos Andrés Musso Laespiga
Orientador: Prof. Dr. Osni José Pejon