



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TEGNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

STIVE OSCA FALCÃO DE ATAIDE

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE VARIAÇÃO DE VOLUME DEVIDO À
INUNDAÇÃO DE UM SOLO EXPANSIVO QUANDO MISTURADO COM
AREIA**

RECIFE

2017

STIVE OSCA FALCÃO DE ATAIDE

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE VARIAÇÃO DE VOLUME DEVIDO À
INUNDAÇÃO DE UM SOLO EXPANSIVO QUANDO MISTURADO COM
AREIA**

Dissertação submetida ao Corpo Docente da
Coordenação do Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil da Universidade Federal de
Pernambuco como parte dos requisitos necessários para
a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil.

Linha de pesquisa: Geotecnia.

Orientador: Silvio Romero de Melo Ferreira.

RECIFE

2017

Catálogo na fonte
Bibliotecária Valdicéa Alves, CRB-4 / 1260

A862a	<p>Ataíde, Stive Osca Falcão de Análise o comportamento de variação de volume devido à inundação de um solo expansivo quando misturado com areia/ Stive Osca Falcão de Ataíde. – 2017. 117 folhas, il., tabs., quad.</p> <p>Orientador(a): Prof. Dr. Silvio Romero de Melo Ferreira</p> <p>Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2017. Inclui Referências e Apêndices.</p> <p>1. Solo expansivo. 2. Estabilização dos solos. 3. Solo-Areia. I. Ferreira, Silvio Romero de Melo (Orientador). II. Título.</p>
-------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

624 CDD (22. ed.)

UFPE
BCTG/2018-120

STIVE OSCA FALCÃO DE ATAIDE

*ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE VARIAÇÃO DE VOLUME DEVIDO À
INUNDAÇÃO DE UM SOLO EXPANSIVO QUANDO MISTURADO COM AREIA*

Dissertação submetida ao corpo docente da coordenação do programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de mestre em engenharia civil.

Aprovada em 06/12/2017

BANCA EXAMINADORA:

Silvio Romero de Melo Ferreira, D. Sc.
(Orientador)

Joaquim Teodoro Romão de Oliveira, D. Sc.
(Examinador Externo)

Sergio Carvalho de Paiva, D. Sc.
(Examinador Externo)

RECIFE

2017

Dedico este trabalho ao meu filho Tales

AGRADECIMENTOS

A Deus por estar presente na minha vida.

Ao Professor, Dr. Silvio Romero de Melo Ferreira pela confiança, amizade, orientação, paciência, incentivo e disponibilidade durante todos os anos de estudo desde minha graduação.

Os meus Professores Dilson Teixeira, José Maria Justino e Washington Amorim pelo tanto que me incentivaram a produção desta Dissertação.

Ao Professor Sergio Paiva (UNICAP) pelos ensaios químicos e a todos os Professores da pós-graduação, UFPE e UNICAP, que contribuíram para meu enriquecimento profissional.

Aos Professores da área de Geotecnia (UFPE) pelos esforços contínuos e que tanto contribuíram para esta dissertação, em especial os Professores Roberto C. Coutinho e Leonardo Guimarães.

À equipe do Laboratório de Solos e Instrumentação da UFPE, Antônio Brito, Professor Joaquim Oliveira, Francisco e Gutemberg.

À Companhia Pernambucana de Saneamento (COMPESA) por permitir disponibilidade de tempo para realização deste trabalho.

Aos Engenheiros Rubenei Novais Souza (PETROBRAS), Bruno Florêncio (COMPESA), Nancy Lins (COMPESA), Sérgio Abreu (COMPESA), Armando (TECHIDRO), Gustavo Leite (MPOG) e Moaby Massena (COMPESA) pela amizade e por terem contribuído para este trabalho.

Aos meus Pais Izaias Falcão de Ataíde e Sonia Maria Falcão de Ataíde que sempre acreditaram no meu potencial.

Aos meus amigos do Moe's que sempre me apoiaram, Daniel Melo, Marco Aurélio, Luiz Carlos, Givaldo, Anito e Thiago Falcão (irmão).

À minha companheira Janne Eyre que achou pouco toda ajuda que me deu, resolveu gerar meu filho.

Por fim, a todos que contribuíram direta ou indiretamente para esta dissertação.

"Sobrevive aquele que está melhor capacitado"

(Tales de Mileto, 600 a.C.)

RESUMO

A instabilidade volumétrica que o solo expansivo pode causar vários danos as obras de engenharia. São solos não saturados que ao variarem sua umidade aumentam de volume. O município de Ipojuca, em Pernambuco, está recebendo grandes indústrias e, para a construção de edificações, estão sendo executadas grandes plataformas de aterro compactadas. A presença de solo expansivo ocorre em grandes quantidades e seu descarte é quase inapropriado. Foram coletadas amostras deformadas para caracterização física pelas normas da ABNT e foram feitos ensaios edométricos que avaliam a tensão de expansão e expansão livre em solo natural e com misturas de 10%, 20%, 30%, 40%, 50% e 75% de areia em volume, comparadas com solo tratado com cal de outros estudos. A mistura fornece estabilização mecânica do solo expansivo, sendo a areia um solo inerte, reduzindo a expansividade do solo, através da redução a concentração de argilominerais expansivos. Os resultados obtidos da caracterização mecânica moldados na umidade ótima na Expansão “livre” foi 20,5% e na Tensão de expansão foi em média 105,9 kPa. Elaboração de gráfico comparativo mostrando os percentuais equivalentes para o tratamento com areia e com cal hidratada para a redução da expansibilidade desejada. No Apêndice, os custos financeiros de um aterro compactado com uso de solo expansivo sem tratamento e comparando com dois tipos de tratamentos: um com areia e outro com cal.

PALAVRAS-CHAVE: Solo expansivo. Estabilização dos solos. Solo-Areia.

ABSTRACT

The volumetric instability that the expansive soil can cause various damages to the engineering works. They are unsaturated soils that, when they vary their moisture, increase in volume. The municipality of Ipojuca, in Pernambuco, is receiving large industries and, for the construction of buildings, large compacted landfill platforms are being built. The presence of expansive soil occurs in large quantities and its disposal is almost inappropriate. Deformed samples were collected for physical characterization by ABNT standards and edometrical assays were carried out evaluating the expansion and free expansion tensions in natural soil and with mixtures of 10%, 20%, 30%, 40%, 50% and 75% of sand by volume, compared with treated lime soil from other studies. The mixture provides mechanical stabilization of the expansive soil, the sand being an inert soil, reducing soil expansivity by reducing the concentration of expansive clay minerals. The results obtained from the mechanical characterization molded at the optimum moisture in the "free" Expansion were 20.5% and in the Expansion Voltage was on average 105.9 kPa. Elaboration of comparative graph showing the equivalent percentages for the treatment with sand and hydrated lime for the reduction of the desired expansibility. In the Appendix, the financial costs of a compacted landfill with expansive untreated soil use and comparing with two types of treatments: one with sand and the other with lime.

KEYWORDS: Expansive soils. Stabilization of soils. Soil-Send.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 -	Absorção de água por argilominerais: a) adsorção intercrystalina de água num argilomineral do tipo 2:1 pouco expansivo (ilita); b) absorção intracrystalina de água num argilomineral do tipo 2:1 expansivo (motmorilonita).....	24
FIGURA 2 -	Exemplo de Difratoograma de Raio X para argila.....	32
FIGURA 3 -	Variação da consistência do solo com a umidade.....	34
FIGURA 4 -	Carta de Atividade e Plasticidade.....	35
FIGURA 5 -	Critérios de expansão quanto ao índice de atividade.....	35
FIGURA 6 -	Cartas de Plasticidade-Atividade para argilas expansivas de Pernambuco.....	37
FIGURA 7 -	Carta de suscetibilidade à expansão dos solos no Estado de Pernambuco destacando o Município de Ipojuca.....	37
FIGURA 8 -	Unidades estruturais dos argilominerais: a: grupo tetraédrico; b: lâmina tetraédrica; c: grupo octaédrico; d: lâmina octaédrica.....	39
FIGURA 9 -	Modelo esquemático da camada estrutural básica de uma argila: (a)1:1 e (b) 2:1.....	40
FIGURA 10 -	Aplicação de cal com espalhamento mecanizado.....	42
FIGURA 11 -	Aplicação de materiais de diversas jazidas alterando sua granulometria.....	44
FIGURA 12 -	Espessura mínima de cobertura de solo de baixo potencial expansivo (Ipojuca, PE).....	45
FIGURA 13 -	Lavra por dragagem em leito de rio ou cava submersa.....	48
FIGURA 14 -	Mapa de localização da área.....	50
FIGURA 15 -	Zoneamento de solos da Microrregião de Suape.....	52
FIGURA 16 -	a) Rolo compactador, b) Motoniveladora misturando e c) Pipa umedecendo o solo misturado ao lado de uma camada pronta para aferição.....	56
FIGURA 17 -	a) Coleta da amostra deformada, b) Transporte da amostra deformada.....	57
FIGURA 18 -	Amostra deformada de solo expansivo seca ao ar.....	58
FIGURA 19 -	Amostra deformada de areia seca ao ar.....	58

FIGURA 20 - Métodos para determinação da Tensão de Expansão.....	62
FIGURA 21 - Curvas granulométricas do solo expansivo de Ipojuca - PE.....	63
FIGURA 22 - Carta de Atividade e Plasticidade em solo natural e misturas.....	65
FIGURA 23 - Critério de classificação de Seed et al., (1962).....	65
FIGURA 24 - Variação de Expansão “Livre” (4.4 a) e Tensão de Expansão (4.4 b) com acréscimo do teor de areia.....	67
FIGURA 25 - Curva granulométrica solo, areia e solo-areia.....	68
FIGURA 26 - Carta de Plasticidade e Atividade em solo natural e misturas solo-areia.....	69
FIGURA 27 - Critérios de Seed (1962) para o solo de Ipojuca-PE.....	70
FIGURA 28 - Influência da adição de areia na granulometria do solo expansivo de Ipojuca, a) no percentual das partículas e b) nos limites de consistência.....	71
FIGURA 29 - Peso Específico Real dos Grãos.....	72
FIGURA 30 - Curva de compactação do solo de Ipojuca-PE.....	72
FIGURA 31 - Curva de compactação dos solos e das misturas solo expansivo-areia.	74
FIGURA 32 - a) Comportamento da umidade ótima com a variação do teor de areia no solo e b) Comportamento do peso específico seco máximo com a variação do teor de areia no solo.....	74
FIGURA 33 - Capacidade de troca catiônicas.....	77
FIGURA 34 - Variação de expansão “livre” (sobrecarga equivalente a 7 kPa).....	79
FIGURA 35 - Métodos de tensão de expansão aplicados ao solo de Ipojuca- PE moldado a 50% umidade da ótima: a) Expansão sob tensão, b) Método 1 – Carregamento após expansão com diferentes tensões verticais de consolidação, c) Método 2 – Expansão e colapso sob tensão.....	81
FIGURA 36 - Métodos de tensão de expansão aplicados ao solo de Ipojuca- PE moldado a umidade da ótima: a) Expansão sob tensão, b) Método 1 – Carregamento após expansão com diferentes tensões verticais de consolidação, c) Método 2 – Expansão e colapso sob tensão.....	82
FIGURA 37 - Variação de tensão de expansão com o teor de areia.....	84

FIGURA 38 - Gráficos: a) curvas granulométricas, b) expansão “Livre” e c) tensão de expansão no solo expansivos de Paulista-PE e das misturas com areia.....	85
FIGURA 39 - Efeito da adição de areia e da cal hidratada ao solo expansivo de Ipojuca-PE: a) Granulometria do solo expansivo e das misturas com areia (aterro experimental - 2ª etapa da pesquisa), b) Variação da Tensão de Expansão com o acréscimo de areia, c) Granulometria do solo expansivo e das misturas com areia (3ª etapa da pesquisa), d) Variação da Tensão de Expansão com o acréscimo de areia (3ª etapa da pesquisa), e) Granulometria do solo expansivo e das misturas com cal hidratada (Lima, 2014), f) Variação da Tensão de Expansão com a adição cal hidratada ao solo expansivo de Ipojuca-PE (Lima, 2014).....	87
FIGURA 40 - Redução Tensão de Expansão com adição de areia e cal hidratada ao solo expansivo de Ipojuca-PE.....	89
FIGURA 41 - Redução Tensão de Expansão com adição de areia ao solo expansivo de Ipojuca-PE e o acréscimo financeiro gerado por esta adição.....	91
FIGURA 42 - Redução Tensão de Expansão com adição de cal hidratada ao solo expansivo de Ipojuca-PE e o acréscimo financeiro gerado por esta adição.....	91
FIGURA 43 - Redução Tensão de Expansão com adição de cal hidratada ao solo expansivo de Ipojuca-PE e o Acréscimo Financeiro (AF) gerado por esta adição.....	92

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 -	Fatores que influenciam na expansão dos solos.....	26
TABELA 2 -	Métodos de Identificação de Solos Expansivos.....	27
TABELA 3 -	Critérios de Lambe.....	28
TABELA 4 -	Capacidade de troca catiônica dos argilominerais (CTC).....	41
TABELA 5 -	Categorias de expansibilidade em função da expansão do CBR.....	45
TABELA 6 -	Caracterização do solo expansivo de Ipojuca – PE correspondente a primeira etapa da pesquisa.....	64
TABELA 7 -	Caracterização de aterro experimental com uso de solo-areia.....	66
TABELA 8 -	Caracterização química do solo e misturas solo-areia de Ipojuca-PE.....	76
TABELA 9 -	Valores do pH.....	76
TABELA 10 -	Valores das porcentagens de óxidos e perda ao fogo no solo e misturas solo-areia.....	78
TABELA 11 -	Tensão de Expansão dos solos de Ipojuca.....	83
TABELA 12 -	Redução da Tensão de Expansão para solo expansivo de Ipojuca-PE, com o acréscimo do teor de areia ou de cal hidratada.....	89

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 -	Forma de ocorrências e métodos de exploração.....	47
QUADRO 2 -	Atividades de campo e laboratório realizados.....	54
QUADRO 3 -	Frações utilizadas nas amostras de solo e areia.....	59
QUADRO 4 -	Ensaio de caracterização física.....	69
QUADRO 5 -	Picos de compactação de três estudos do solo de Ipojuca - PE.....	73
QUADRO 6 -	Expansão “Livre” a 7 kPa no solo expansivo e das misturas solo- areia em amostras compactadas.....	80

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	17
1.1	JUSTIFICATIVA.....	20
1.2	OBJETIVOS.....	20
1.3	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	21
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	22
2.1	SOLOS EXPANSIVOS.....	22
2.1.1	Mecanismo de expansão.....	23
2.1.2	Fatores que influenciam na expansão.....	24
2.1.3	Técnicas de ensaios dos solos expansivos.....	26
2.1.3.1	Métodos Diretos.....	28
2.1.3.2	Métodos Indiretos.....	31
2.1.4	Locais de ocorrência de solos expansivos.....	36
2.2	FRAÇÃO DE ARGILA NOS SOLOS.....	38
2.2.1	Estrutura dos argilominerais.....	38
2.2.2	Capacidade de troca catiônica.....	40
2.3	ESTABILIZAÇÃO DOS SOLOS.....	41
2.3.1	Estabilização química.....	42
2.3.2	Estabilização física.....	43
2.3.3	Estabilização mecânica.....	43
2.3.4	Plataformas industriais sobre solos expansivos.....	44
2.4	USO DE AREIA COMO AGENTE ESTABILIZANTE.....	46
2.4.1	Definição.....	46
2.4.2	Ocorrência.....	46
2.4.3	Tecnologias de mineração e beneficiamento.....	46
2.4.4	Uso de areia em aterros compactados.....	48
2.5	CARACTERÍSTICAS DA ÁREA DE ESTUDO.....	49
2.5.1	Localização.....	49
2.5.2	Clima.....	50
2.5.3	Geologia e geomorfologia.....	50
2.5.4	Estudos anteriores em Ipojuca – PE.....	52
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	53

3.1	COLETA DE DADOS DOS ENSAIOS PREVIAMENTE REALIZADOS E EXECUÇÃO DO ATERRO EXPERIMENTAL CORRESPONDENDO A PRIMEIRA E SEGUNDA ETAPA DA PESQUISA.....	54
3.2	COLETAS E PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS DEFORMADAS PARA A TERCEIRA ETAPA.....	56
3.3	ENSAIOS DE LABORATÓRIO REALIZADOS NA TERCEIRA ETAPA DA PESQUISA.....	59
3.3.1	Ensaio de caracterização física.....	59
3.3.2	Ensaio de caracterização química.....	60
3.3.3	Ensaio de caracterização mecânica (expansividade).....	60
3.3.3.1	Expansão “Livre”.....	61
3.3.3.2	Tensão de Expansão.....	61
4	RESULTADOS E ANÁLISES.....	63
4.1	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA, AVALIAÇÃO DA EXPANSIVIDADE DA ARGILA EXPANSIVA DE IPOJUCA-PE E DA CAMADA DO ATERRO EXPERIMENTAL.....	63
4.2	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA, QUÍMICA E DA EXPANSIVIDADE DA ARGILA DE IPOJUCA-PE E DAS MISTURAS COM AREIA – TERCEIRA ETAPA.....	67
4.2.1	Granulometria e limites de Atterberg.....	68
4.2.2	Peso específico real dos grãos.....	71
4.2.3	Compactação.....	72
4.2.4	Caracterização química.....	75
4.2.5	Caracterização mecânica – expansividade.....	78
4.2.5.1	Expansão “Livre”.....	79
4.2.5.2	Tensão de expansão.....	80
4.3	COMPARAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DE EXPANSIVIDADE DA ARGILA DE IPOJUCA-PE MISTURAS COM AREIA E COM CAL HIDRATADA – QUARTA ETAPA.....	86
4.4	SIMULAÇÃO DE ESTIMATIVA DE CUSTO DE ATERRO SEM E COM USO DE ESTABILIZANTE EM SOLO EXPANSIVO.....	90
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	94

REFERÊNCIAS.....	96
APÊNDICES.....	109
APÊNDICE A – EXEMPLO COMPARATIVO SIMPLIFICADO DO PERCENTUAL FINANCEIRO PARA UM ATERRO COMPACTADO COM IDENTIFICAÇÃO DE 50% DE SOLO EXPANSIVO COM E SEM UTILIZAÇÃO DE ESTABILIZANTES.....	109

1 INTRODUÇÃO

Inerentes aos solos não saturados, alguns sofrem ou experimentam variação de volume de acordo com a perda ou o ganho de umidade. Com estas características, são dados os nomes solos expansivos ou calapsíveis. Expansivo quando este aumenta de volume e colapsível quando reduz o volume com a variação do teor de umidade.

O termo “solo expansivo”, no entanto, é reservado, na prática geotécnica, para situações em que os solos de uma determinada obra podem gerar problemas causados por sua expansão (SANDRONI e CONSOLI, 2010). Solo potencialmente expansivo é aquele que apresenta aumento ou redução de volume quando sofre variação na umidade ou na sucção, por ser constituído na fração argila, especialmente na dispersão coloidal, por minerais expansivos (JUSTINO DA SILVA, 2005).

Antes de 1930, os danos produzidos por estes solos eram atribuídos a possíveis erros construtivos da engenharia ou a recalques diferenciais das estruturas. A partir desta data iniciou-se a melhor compreensão e interpretação através de estudos do comportamento das argilas expansivas (JUSTINO DA SILVA, 2005).

A construção de obras de Engenharia Civil em solos que apresentam instabilidade volumétrica, quando umedecidos, pode causar sérios problemas. Em solos expansivos, em campo, observam-se fissuras ou fendas características, nas estações secas. Já nas edificações, fissuras diagonais embaixo das janelas e acima das portas ondulações e rupturas nos pavimentos, fissuras generalizadas longitudinais e transversais junto a bueiros, etc. (FERREIRA et al., 2015).

Solos expansivos têm sido identificados em todos os continentes, com maiores aparições em regiões áridas e semiáridas. No Brasil, os solos expansivos são encontrados em várias regiões, em especial, no Nordeste, onde aparecem em formação cretácea, aproximadamente, ao longo do meridiano da Bahia para o norte, até atravessar Pernambuco e Ceará (FERREIRA et al, 2015).

É importante diferenciar algumas terminologias e definições associadas à expansividade do solo. A expansividade intrínseca é considerada como a capacidade do argilomineral de absorver água. É uma propriedade resultante de sua composição mineralógica e da quantidade de argila, que interagem com a água. Expansão de um solo expansivo intrinsecamente pode ser definida como a mudança de volume resultante da mudança de umidade ou sucção. Para um solo ter caráter expansivo, primariamente depende do argilomineral existente, uma vez que nem todos os minerais argilosos

experimentam modificações volumétricas. Esta instabilidade pode ser especialmente importante nas argilas esmectitas, em especial, a montmorilonita e a vermiculita. Também se produz nos interestratificados de montmorilonita com clorita, illita e vermiculita. Dois requisitos básicos são necessários para um solo exibir expansividade:

- i) Intrínsecos – devem existir e entrar em funcionamento mecanismos, em nível microescalar, que produzam a instabilidade volumétrica do solo (composição mineralógica, textura e estrutura);
- ii) Extrínsecos – devem estar presentes, forças capazes de transferir a umidade de um ponto a outro do solo (climatologia, hidrogeologia, vegetação, ocupação antrópica) (AYALA et al., 1986).

Segundo a New York State Division of Homeland Security and Emergency Services (NYS DHSES, 2014) estima que os EUA tenham custo de aproximadamente US\$ 300 milhões/ano devido a danos causados pela expansão dos solos. A Sociedade Americana de Engenheiros Civil estima que uma em cada quatro casas tem algum dano causado por solos expansivos. Em um ano típico, solos expansivos podem causar maior perda financeira para os proprietários do que danos causados por tremores de terra, inundações, tornados e furações combinados, NELSON e MILLER, (1992). A Associação de Seguradoras Britânicas estimou que o custo médio com solo expansivo para a indústria de seguros está em mais de 400 milhões de libras por ano DRISCOLL e CRILLY, (2000). Na Espanha o custo mínimo com a recuperação dos danos causados por solos expansivos é cerca de 1 bilhão de pesetas/ano AYALA et al., (1986). No Brasil não se têm dados específicos dos custos com danos causados por esses solos, quando inundados.

Segundo o Tribunal de Contas da União (TCU, 2015) a Refinaria do Nordeste (Rnest), em Suape, constatou-se que as investigações geotécnicas (estudos preliminares) realizadas para subsidiar o projeto adotado na licitação das obras de terraplenagem da Rnest foram deficientes, visto não terem detectado satisfatoriamente a existência de solos expansivos na área de implantação da Refinaria. Apurou-se, ainda, que o projeto adotado na licitação das Tubovias não considerou dados resultantes da execução das obras de terraplenagem (anterior à licitação das Tubovias), em especial quanto à existência de grande quantidade de solos com alto potencial de expansão. Como consequência, as falhas no projeto das Tubovias implicaram a necessidade de aditivos contratuais da ordem de R\$ 689,8 milhões, além de terem provocado atrasos na conclusão das obras.

O desenvolvimento econômico em conjunto com políticas ambientais do país vem cada vez mais ampliando os estudos sobre solos expansivos. Em Pernambuco, na Região Metropolitana de Recife, o município de Ipojuca, distando 45 Km da capital do estado contempla um grande complexo industrial, de Recife, havendo necessidade de grandes plataformas planas para suas edificações.

É tema deste trabalho, a estabilização e o uso de solos expansivos em obras de engenharia para formação de grandes platôes formados por aterros para construção de plataformas industriais no Distrito Industrial de Suape, no município de Ipojuca-PE.

O relevo do complexo é constituído por morros, havendo necessidade de grandes movimentos de terra para as plataformas industriais. Esses movimentos propõem o nivelamento do terreno para a construção civil das indústrias. Desta forma, procura-se na terraplenagem fazer com que os volumes de cortes e aterros sejam próximos para que não necessitem de empréstimos ou bota-foras.

É grande o número de execução dessas plataformas em que foram encontrados solos expansivos. A solução mais simples para resolver o problema seria o descarte desse material. Os volumes dessas plataformas chegam a grandezas na ordem de milhões de metros cúbicos de movimento de solo, além de algumas estimativas ultrapassam 70% com solos expansivos. Descartar esse material significa criar outros dois problemas: 1) necessidade de grande área para o bota-fora gerando danos ao meio ambiente e 2) necessidade de jazidas de empréstimos com solos inertes gerando altos custos com deslocamento de transporte.

Vários estudos já foram realizados com o propósito de qualificar e/ou propor soluções de estabilização do solo expansivo de Ipojuca – PE. Estudos realizados:

- Dissertação de Mestrado, autor Miguel Júnior. (2013) - Propriedades geotécnicas de expansão de um solo argiloso compactado com e sem adição de cal;
- Dissertação de Mestrado, autora Lima (2014) – Estudo do comportamento geotécnico de um solo argiloso de Suape, potencialmente expansivo, estabilizado com cal;
- Tese de Doutorado, autor Paiva (2016) - Estudo do comportamento geomecânico dos solos expansivos dos municípios de Cabrobó, Paulista e Ipojuca - PE e de suas misturas com cal.

1.1 JUSTIFICATIVA

Devido aos grandes movimentos de solo na terraplenagem, o custo financeiro para o descarte adequado deste material faz com que as alternativas para seu uso de forma segura seja a melhor alternativa. Desta forma o aprofundamento de estudos para a estabilização de solo expansivo na região estudada é cada vez mais frequente.

Alternativas para a estabilização são sempre importantes, visto que nem sempre uma boa solução teórica reúne condições para sua execução em campo. Devem ser considerados que na execução de grandes aterros, são utilizados equipamentos de grande porte como escavadeiras hidráulicas, motoniveladoras, tratores de esteiras, caminhões fora-de-estrada, etc. A aplicação de um determinado procedimento para a estabilização possa gerar elevados custos na velocidade do processo. Assim apresentaremos três alternativas de estabilização: mecânica, física e química, com suas eficiências de laboratório e campo.

1.2 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo caracterizar e analisar o solo expansivo de Ipojuca-PE utilizado nos aterros compactados em plataformas industriais, estabilização mecânica do solo com mistura solo-areia nas proporções de 10%, 20%, 30%, 40%, 50% e 75%, apresentar um aterro experimental e comparar com os resultados da estabilização química realizado na mesma região com mistura solo-cal nas proporções em peso com 3%, 5%, 7%, 9% e 11% por Lima (2014).

O objetivo geral da pesquisa é caracterizar e analisar a expansão de um solo do município de Ipojuca-PE avaliando o potencial de expansividade e a utilização de um solo inerte (areia) na estabilização da mistura com solo expansivo e comparar com resultados obtidos de outro estudo (Lima, 2014) na qual a estabilização foi com mistura solo-cal. Serão considerados os seguintes objetivos específicos:

- Obter a caracterização física, química e físico-mecânica.
- Caracterizar a mistura de solo com adição de acréscimos do percentual de areia.
- Avaliar a tensão de expansão e a expansão livre no solo natural e nas misturas.
- Analisar a condição e equivalência com o uso de areia ou cal na expansão livre e na tensão de expansão.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Os capítulos deste trabalho estão estruturados da seguinte forma:

Capítulo 1 apresenta a introdução relatando justificativa, objetivo e estrutura da pesquisa.

Capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica com ênfase na caracterização dos solos potencialmente expansivos estabilizados com areia, índices geotécnicos, propriedades do solo e normas de referências aplicadas para aterros compactados.

Capítulo 3 mostra os materiais e métodos utilizados para obtenção dos ensaios.

Capítulo 4 apresenta os resultados e as análises realizadas na pesquisa envolvendo ensaios de laboratórios do solo de Ipojuca – PE.

Capítulo 5 apresenta as conclusões e recomendações para pesquisas futuras.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 SOLOS EXPANSIVOS

Alguns solos não saturados, ao aumentar o teor de água em seus vazios ou ao serem solicitados por carga e posteriormente umedecidos, experimentam uma variação de volume. Estes solos têm seu comportamento relacionado à instabilidade volumétrica, quando a umidade é alterada.

Um solo expansivo deve ter algumas características mineralógicas como os argilominerais de estrutura laminar do tipo 2:1, ter uma combinação de duas folhas tetraédricas (Te) e uma folha octaédrica (Oc). Principalmente do grupo esmectitas, montmorilonita e vermiculita verifica-se uma maior instabilidade volumétrica, além dos interstratificados de montmorilonita como a clorita, ilita e vermiculita ou até mesmo de outros minerais (FERREIRA, 1995).

Alguns argilominerais quando em contato com a água se expandem, devido a combinações e condições que envolvem seu processo de formação. Classificam-se em rochas ígneas básicas e rochas sedimentares contendo montmorilonita, os materiais parentais que podem ser associadas com solos expansivos (CHEN, 1988).

Os argilominerais são formados pela união de camadas tetraédricas e octaédricas dispostos em camadas alternadas. As espécies mais comuns são: Ilita, Caulinita e Montmorilonita. Caulinita: constituinte de rochas sedimentares detríticas e das argilas dos solos, originária dos aluminossilicatos é refratária e não expansiva. Montmorilonita: constituinte das rochas sedimentares detríticas e das argilas dos solos originária da alteração dos aluminossilicatos e minerais ferromagnesianos. Em meio aquoso expande-se por efeito da adsorção das moléculas de água entre as cadeias tetraédrica. Ilita, também chamada de hidromica é do grupo de argilominerais com composição e estrutura intermediária entre a muscovita e montmorilonita são comuns em folhetos de origem marinha.

A tarefa de identificação e classificação de um solo expansivo pode ser dividida em duas partes: a primeira consiste na obtenção de informações prévias mediante fissuras nas edificações e informações junto aos moradores da região; a segunda na interpretação de ensaios de laboratório e no uso de métodos de identificação (PAIVA, 2009).

Os solos expansivos podem causar sérios danos às obras de engenharia principalmente quando esses materiais não são tratados de forma adequada nas etapas de projeto e execução da construção (CAMPOS & BURGOS, 2004).

2.1.1 Mecanismo de expansão

A expansibilidade é a variação volumétrica dos minerais argilosos devido à variação do teor em água. Os mecanismos de expansão podem ser mecânicos ou físico-químicos. A combinação desses mecanismos interfere diretamente na mudança de volume dos solos potencialmente expansivos. A capacidade de expansão depende de condições ambientais, rocha de origem, clima, vegetação, lençol freático, natureza mineralógica, tamanho dos grãos, formação estrutural, permeabilidade, condições de tensões locais e cargas externas aplicadas (FERREIRA, 1995).

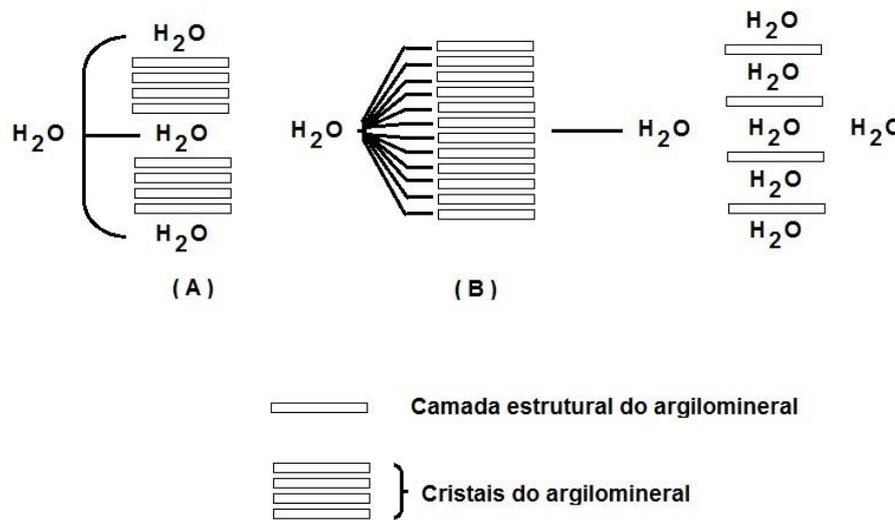
Segundo Taylor e Smith (1986), a expansão mecânica do solo ocorre devido às forças de descompressão elásticas aplicadas que podem ser ocasionadas por escavações feitas pelos homens, à ação dos movimentos tectônicos e a erosão, juntamente relacionadas ao fator tempo.

A atração superficial das partículas, a hidratação de cátions e a repulsão osmótica, são os mecanismos físico-químicos que determinam o potencial expansivo de um argilomineral (SNETHEN et al., 1977). Os mecanismos de expansibilidade físico-químicos podem ser intracristalinos (montmorilonita e vermiculita), intercristalinos (ilita) e osmóticos.

A expansibilidade intracristalina resulta na adsorção de duas ou mais camadas moleculares de água nas superfícies internas dos minerais argilosos. Para Gillott (1987), é o desequilíbrio entre as forças atrativas que ligam as camadas estruturais (inferiores) e as forças atrativas responsáveis pela absorção de água e depende da natureza cristalográfica do argilomineral, assim a água absorvida sobre as superfícies dos argilominerais, separa suas partículas (Figura 1).

A expansibilidade intercristalina acontece quando é possível a absorção de água no interior dos cristais, ou entre as camadas estruturais, ou seja, entre as superfícies externas dos cristais dos minerais argilosos, e dos vazios entre esses cristais (BARBOSA, 2013). Segundo Neves (1993), a absorção da água sobre as partículas dos minerais argilosos, afasta as unidades estruturais e as próprias partículas.

FIGURA 1 - Absorção de água por argilominerais: a) adsorção intercrystalina de água num argilomineral do tipo 2:1 pouco expansivo (ilita); b) absorção intracrystalina de água num argilomineral do tipo 2:1 expansivo (motmorilonita)



FONTE: Gillott (1987).

A expansibilidade osmótica é admitida em um processo de duas fases (na primeira, as moléculas de água penetram entre as camadas estruturais das argilas, tendendo a separá-las; na segunda fase, as superfícies das partículas estão já separadas por distâncias superiores a quatro camadas monomoleculares de água, sendo por isso a energia de adsorção já relativamente reduzida, o que permite que a energia de repulsão da dupla camada elétrica se sobreponha), essa expansibilidade é responsável por variações volumétricas observadas que a depender da condição pode levar a grande pressão osmótica (OLPHEN, 1963).

2.1.2 Fatores que influenciam na expansão

Para avaliar os fatores que influenciam na expansão de um solo é necessário que seja feita a distinção entre expansividade intrínseca do solo, potencial de expansão para o teor de umidade do campo e potencial de levantamento da superfície (BARBOSA, 2013).

Segundo Schreiner (1987), a expansividade intrínseca é a capacidade do argilomineral em absorver e interagir com a água, a expansão de um solo é a mudança de volume associada à variação no estado das tensões (tensão vertical, estrutura e sucção) e

o inchamento é o deslocamento vertical resultante de um solo expansivo, parâmetro usualmente medido em campo.

Diversos fatores influenciam no processo de expansão sendo divididos em fatores internos e externos. Os fatores que influenciam internamente são: tipos, quantidades e estruturas dos minerais argilosos presentes na formação, tipo de cátions dominante nestes minerais argilosos, concentração iônica na formação argilosa, tamanho das partículas constituintes dos minerais argilosos, quantidade de água antes do processo de expansão e densidade a seco da argila antes do início do processo de expansão. Os fatores externos são: acessibilidade de água, concentração de íons na água, possibilidade de aumento de volume durante o processo de expansão e contrapressão eventual.

Para que o solo seja expansivo é preciso que exista entre em funcionamento mecanismos que produzam a instabilidade volumétrica do solo e forças capazes de transferir a umidade de um ponto a outro, estes requisitos são classificados em intrínsecos, próprios dos solos com a composição mineralógica, textura, capacidade de troca catiônica, cátions trocáveis, estrutura do solo que estabelecem a capacidade expansiva teórica, e extrínsecos que são impostos por fatores externos, como a climatologia, hidrogeologia, vegetação e até mesmo a atuação antrópica, que determinam se o potencial expansivo pode ou não se desenvolver (AYALA et al., 1986).

Segundo Nelson e Miller (1992), os fatores que influenciam na expansão dos solos, são apresentados na Tabela 1.

Os fatores que influenciam no potencial de expansão e contração de um solo podem ser enquadrados em três grupos, são eles, natureza básica do campo de força influenciada pelas características do solo, as mudanças no sistema de forças internas influenciando os fatores ambientais e o estado de tensões dos solos, são muitos os fatores que influenciam no mecanismo de expansão de um solo, afetando ou sendo afetados pelas propriedades físicas do solo, tais como plasticidade ou densidade (JUSTINO, 2001).

Fatores ligados ao solo, como a distribuição das partículas de argila, porosidade, orientação mineralógica, cimentação, ligados a estrutura como o perfil estratigráfico, a espessura do solo, a descontinuidade, também são de grande importância, a capacidade de expansão do solo não depende somente do tipo de argila existente, mas, também, da natureza da fração argilosa e de sua formação (FERREIRA, 1995).

TABELA 1 - Fatores que influenciam na expansão dos solos.

FATOR	DESCRIÇÃO	REFERÊNCIAS
Mineralogia da Argila	Os argilominerais que tipicamente causam variações de volume no solo são: montmorilonitas, vermiculitas e algumas camadas mistas de minerais. Ilitas e caulinitas não são frequentemente expansivas, mas podem causar variações de volume quando o tamanho das partículas é extremamente pequeno.	GRIM,(1968); MITCHELL,(1973,1976); SNETHEN et al., (1977)
Química da água no solo	A expansão é reduzida pelo aumento da concentração e valência de cátion. Por exemplo, cátions de Mg ²⁺ na água do solo resulta em menor expansão do que os cátions de Na ⁺ .	MITCHELL (1976)
Sucção do solo	A sucção do solo é uma variável independente da tensão efetiva, representada pela pressão negativa em solos não saturados. A sucção do solo está relacionada com o grau de saturação, gravidade, tamanho e forma de poros, tensão superficial, características químicas e elétricas das partículas do solo e da água.	SNETHEN(1980); FREDLUND E MORGENSTERN (1977); JOHNSON (1973); OLSEN E LANGFELDER (1965); AITCHISON, (1965).
Plasticidade	Em geral, solos que exibem comportamento plástico sobre larga variação de umidade e que tem alto limite de liquidez possuem maior potencial de expansão e de contração. Plasticidade é um indicador do potencial de expansão.	NELSON E MILLER (1992)
Estrutura e Textura do solo	Argilas flocculadas tendem a ser mais expansivas do que as argilas dispersas. Partículas cimentadas reduzem a expansão. A textura e estrutura são alteradas pela compactação, maior teor de umidade ou remoldagem.	JOHNSON E SNETHEN(1978); SEED et al., (1962A)
Densidade Seca	Elevada densidade usualmente indica espaçamento menores entre partículas, o que pode significar grandes forças repulsivas entre elas e elevado potencial de expansão.	CHEN (1963); KOMORNIK E DAVID (1969); UPPAL (1965).

FONTE: NELSON E MILLER (1992).

2.1.3 Técnicas de ensaios dos solos expansivos

Para se determinar o teor de expansão dos solos, é necessário se basear no teor da fração de argila, na composição mineralógica, no seu limite de consistência e realizar ensaios de expansão. A identificação dos solos expansivos é necessária para se determinar qualitativa o potencial expansivo do solo. Vários são os critérios adotados para determinação da expansão dos solos, esses critérios se baseiam na: composição mineralógica dos solos, no teor da fração de argila, nos limites de consistência, nos ensaios de expansão e na pressão de expansão (HORTA DA SILVA, 1975).

São vários os métodos utilizados na identificação dos solos expansivos, das mais simples as mais complexas, esses métodos podem ser classificados em duas categorias: métodos diretos e métodos indiretos, Tabela 2 (SCHREINER,1987 e FERREIRA, 1995).

TABELA 2 - Métodos de Identificação de Solos Expansivos.

MÉTODOS	SUB-DIVISÃO	CRITÉRIO	REFERÊNCIAS
INDIRETOS	Identificativos	Difração e raio X, Microscopia eletrônica de varredura, Análise termodiferencial Adsorção de etilenoglicol e glicerina	AYALA <i>et al.</i> , (1986)
		Físico-químico	FINK <i>et al.</i> (1971)
	Qualitativos	Granulometria, Consistência e Índices físicos e Classificação Geotécnica	PRIKLONSKIJ (1952), SKEMPTOM (1953), SEED <i>et al.</i> (1962), VAN DER MERWE(1964) CHEN (1965), VIJAYVERVIA e GHAZZALY (1973), RODRIGUEZ ORTIZ(1975), CUELLAR (1978). DAKSANAMURTHY e RAMAN(1973).
	Orientativos	Geologia, Geomorfologia, Pedologia e Identificação visual.	PRIKLONSKIJ (1952), SKEMPOM(1953), SEED <i>et al.</i> , (1962), VAN DER MERWE(1964) CHEN (1965) VIJAYVERVIYA e GHAZZALY (1973), RODRIGUEZ ORTIZ (1975), CUELLAR (1978)
	Avaliativos	Ensaio de Expansão de Lambe	LAMBE (1960).
	DIRETOS	Quantitativos	Expansão Livre e Tensão de Expansão, Ensaio Edométricos Duplos e Simples.
Ensaio Edométricos de Sucção controlada			ESCARIO (1967 e 1969), AITCHISON <i>et al.</i> (1973), JOHNSON (1978), McKEEN(1980).

FONTE: SCHREINER (1987) e FERREIRA (1995).

2.1.3.1 Métodos Diretos

São aqueles realizados em laboratório ou campo e que fazem a avaliação da expansão induzida ou o reconhecimento da tensão necessária para impedir a expansibilidade do solo, esses métodos se baseiam em dois parâmetros: a expansão livre e a tensão de expansão (PAIVA, 2016).

Os métodos diretos quantitativos se baseiam nos parâmetros de expansão livre e de tensão de expansão, que envolvem as seguintes determinações: ensaio edométrico simples e duplo, determinação da pressão Tensão de Expansão, a volume constante, carregamento após expansão com diferença de sobrecarga, expansão e colapso sobre carregamento (RAO, 1988).

Os métodos diretos determinam quantitativamente as características de mudança de volume dos solos expansivos. Os ensaios realizados nesse método são do tipo mecânicos. Nesses ensaios são medidas as variações de volume de material, sujeitos ou não a sobrecargas. Ensaio do tipo edométrico são realizados, onde procuram reproduzir em laboratório as condições de campo sendo por carregamento, por inundação ou percolante. (PAIVA, 2016)

Para Frazão e Goulart (1976), um parâmetro de grande importância e decisivo na avaliação da expansibilidade do solo são as pressões de expansão.

a) Ensaio de Expansão de Lambe

No ensaio de expansão de Lambe a amostra de solo é remoldada e colocada no anel e carregada com uma tensão nominal de 10 t/m², depois de pronta a amostra é inundada e no final de duas horas, mede-se a pressão alcançada em kPa, a pressão medida é o índice de expansividade ou índice de Lambe, ao associar este índice com o potencial expansivo do solo temos os critérios de Lambe, ver Tabela 3.

TABELA 3 - Critérios de Lambe.

Índice de Lambe (kPa)	Potencial Expansivo
< 80	Não crítico
80 - 150	Marginal
150 - 230	Crítico
>230	Muito crítico

FONTE: LAMBER (1960).

b) Expansão Livre

O ensaio de expansão livre acondiciona os corpos de prova cilíndricos em células do tipo edométrico convencional, essas amostras são pesados antes e após o ensaio e suas altura inicial e final também é anotada, no topo dos corpos de prova coloca-se um relógio comparador (micrômetro), sustentado por um braço mecânico, esses relógios permitem leitura direta de até 0,01 mm, com capacidade para até 10 mm, após os corpos de prova estarem acondicionados na célula, ajusta-se o relógio comparador e adiciona-se água. As deformações observadas no relógio são anotadas em intervalos de tempo, que obedecem a uma progressão geométrica de razão dois (CAMPOS, 1989).

A expansão “livre” é determinada em percentual após a sua estabilização. As metodologias aplicadas para são 1kPa, 7 kPa e 10 kPa, e a metodologia que utiliza a tensão de 50 kPa em amostras deformadas (CHEN, 1965). Este ensaio segue as recomendações da International Society for Rock Mechanics - I.S.R.M. (1972, 1989).

A expansão livre é calculada pela seguinte equação (1):

$$E (\%) = (\Delta H/H)*100 \quad (1)$$

Onde, E = expansão livre uniaxial (%); ΔH = Máximo acréscimo de altura; H = altura do corpo de prova antes da inundação.

Os resultados dos ensaios são retratados na forma de gráficos, obtidos através dos valores de deformação (%) versus tempo (h).

c) Tensão de Expansão

As pressões de expansão desenvolvem-se, quando a expansão devido a umidificação das rochas está total ou parcialmente impedida, porque senão aumentariam livremente de volume sem gerar tensões (JEREMIAS, 1991).

Segundo Frazão (1981), existem vários métodos para a determinação da pressão de expansão sendo que os ensaios edométricos estão entre os mais utilizados para estudar a variação volumétrica dos materiais expansivos.

d) Método da amostra a volume constante

É medido no odômetro a tensão necessária para impedir a mudança de volume da amostra de solo depois de inundá-lo, ou seja, o corpo de prova é submetido a uma pressão vertical pré-estabelecida e em seguida é inundado. O teste mede a pressão axial necessária para forçar uma amostra de rocha indeformada a manter uma altura constante quando confinada e imersa em água.

e) Ensaio Edométricos Duplos

Neste ensaio são utilizadas duas amostras indeformadas que recebem cargas em dois edômetros distintos, em uma amostra o ensaio é realizado com excesso de água, a outra é ensaiado com o teor de umidade natural. Neste ensaio se obtém curvas que determinam a tensão de expansão, a tensão de expansão será a tensão que corresponde, no corpo de prova inundado, ao mesmo índice de vazios inicial do corpo de prova na umidade natural.

f) Ensaio Edométricos Múltiplos

Neste ensaio são utilizadas diversas amostras com sua umidade natural, as amostras são montadas no edômetro convencional com diferentes sobrecargas, depois essas amostras são inundadas e depois de estabilizadas suas expansões são medidas (PRESA, 1984). Os resultados são apresentados em duas curvas, uma que corresponde à variação dos índices de vazios das amostras com conteúdo de umidade natural e a outra a variação dos índices de vazios para as amostras inundadas.

g) Ensaio Edométrico Simples

Nesse ensaio coloca-se no edômetro apenas uma amostra no teor de umidade natural, para a determinação do índice de vazios inicial, sob a tensão vertical, na profundidade de retirada da amostra, depois se descarrega até a pressão inicial, em seguida se adiciona água à amostra, que vai se expandir até a estabilização.

Esse método apresenta duas importantes vantagens: eliminação do erro de ajuste das curvas (teor natural e saturada) e a possibilidade de duplicar o número de amostras por local de estudo (HORTA DA SILVA, 1975).

2.1.3.2 Métodos Indiretos

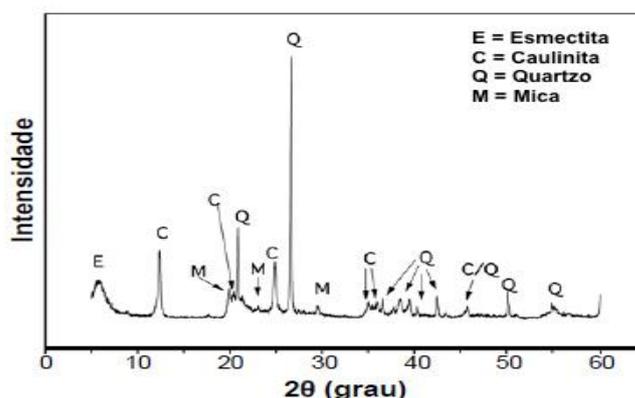
Os métodos indiretos consistem na realização de ensaios de composição granulométrica, índices físicos, limites de consistência, identificação mineralógica e parâmetros ligados à textura, composição e comportamento dos solos (FERREIRA, 1995). Os métodos indiretos também podem ser subdivididos em identificativos, orientativos e qualitativos.

São realizados ensaios em laboratório para a determinação da composição mineralógica dos solos, entre os métodos indiretos mais utilizados temos, Difração de Raio-X, Análise Térmica Diferencial (ATD), Adsorção de Azul de Metileno, Análise Térmica Gravimétrica (ATG), Capacidade de Troca de Cátions (CTC), Microscopia Eletrônica, entre outras.

a) Método de Difração de Raio-X

No método de Difração de Raio-X, a identificação dos grupos de argilominerais é realizada a partir do valor medido para a distância interplanar basal do argilomineral, que foi separado em suspensão aquosa como a “fração argila”, e depositada em lâminas de vidro, a utilização da difração de raios-x com registro gráfico, em conjunto com as propriedades específicas de expansão da distância interplanar basal, induzida pela adição de substâncias como etilenoglicol, potássio e de transformações térmicas a 550°C de cada argilomineral, permite uma diferenciação dos grupos com mesma distância interplanar ou dentro de um mesmo grupo, permitindo assim estudos detalhados da estrutura cristalina de materiais. O padrão de difração de uma substância desconhecida com a de substâncias puras padrão pode ser realizado de forma mais rápida (PEREIRA, 2004). Na Figura 2 apresenta um Difratoograma de Raio X em argilas.

FIGURA 2 - Exemplo de Difratoograma de Raio X para argila



FONTE: Chaves et al., (2013).

b) Método da Análise Térmica Diferencial

Segundo Santos (1989), no método de Análise Térmica Diferencial ocorre o aquecimento em velocidade constante de uma argila junto com uma substância termicamente inerte, o padrão e a argila são colocados em blocos ou recipientes que podem ser de níquel, para temperaturas de até 1100 °C, ou de óxido de alumínio ou platina, para temperaturas de até 1600 °C, desta forma registrando as diferenças de temperaturas entre o padrão inerte e a argila em estudo, ao ocorrer às transformações endotérmicas ou exotérmicas, estas aparecem como deflexões em sentidos opostos na curva termodiferencial ou termograma. Santos (1989), ainda falam que a Análise Térmica Gravimétrica é o aquecimento da argila a uma velocidade constante, onde o aparelho encontra-se conectado a uma balança, registrando assim as variações de massa em função da temperatura.

c) Adsorção de Azul de Metileno

O ensaio de Adsorção de Azul de Metileno caracteriza qualitativamente e em alguns casos quantitativamente os argilominerais presentes nas rochas. Por não ser adsorvido pelos minerais inertes o azul de metileno permite determinar a atividade dos argilominerais nos solos e rochas, sem ter que separá-los do material restante, este ensaio serve para avaliar o potencial de expansibilidade e o tipo e teor dos argilominerais presentes dos solos e das rochas (PEJON, 1995; PEREIRA E PEJON, 1999).

d) Microscopia Eletrônica

Na Microscopia Eletrônica, se faz necessário o uso do microscópio eletrônico, pois, a mesma tem resoluções para distâncias menores que 0,01 nm, podendo, assim, ser realizado o estudo das pequenas partículas de argila, no Microscópio Eletrônico de Varredura – MEV, são emitidos elétrons secundários que dão a forma superficial da amostra, produzindo uma imagem tridimensional (MITCHELL, 1993).

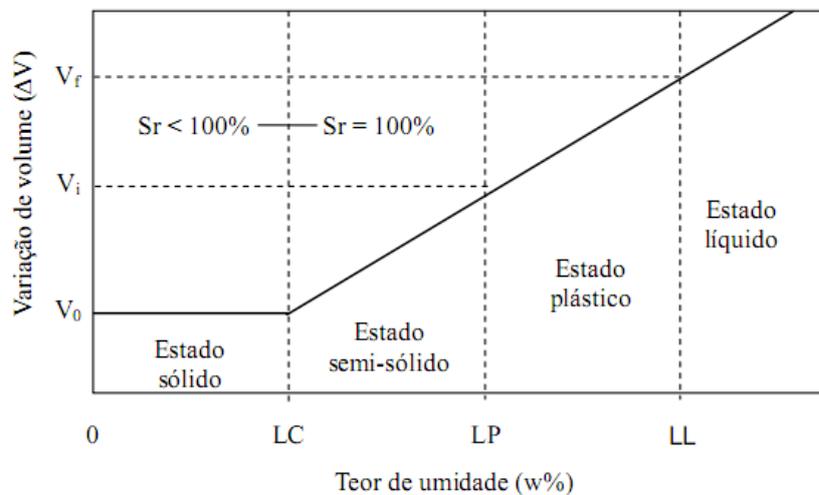
Para Santos (1989), ao se estudar um solo argiloso através de um microscópio eletrônico algumas informações podem ser obtidas, são elas:

- Determinação da morfologia das partículas constituintes;
- Identificação dos argilominerais presentes;
- Possibilidade de medida das dimensões das partículas para a distribuição da curva de distribuição granulométrica das mesmas;
- Detectar a presença de pequenos teores de argilominerais não detectáveis por difração de raios-x;
- Presença de materiais ou minerais amorfos, como alofanos;
- Disposição e orientação das partículas na rocha, no estado em que se encontram na natureza;
- Determinação do sinal e da distribuição das cargas elétricas na superfície da partícula.

e) Limites de Atterberg

Os minerais que compõem os solos finos interagem com a água, alterando seu comportamento, apresentando variações em seu estado de consistência em função do teor de umidade.

Solos finos possuem plasticidade que define sua capacidade de expansão, contração e compressibilidade. Sua consistência varia com o teor de umidade, podendo estar em estado sólido (volume não varia com a secagem), semi-sólido (o volume varia de acordo com a secagem), plástico (o solo é moldável) ou líquido (o solo é fluido e denso), ver figura 3.

FIGURA 3 - Variação da consistência do solo com a umidade

FONTE: Autor

A classificação dos solos finos é realizada a partir da curva granulométrica e através de uma série de ensaios, descritos em normas técnicas onde é possível definir o Limite de liquidez, o Limite de plasticidade e o Limite de contração de um solo. Esses teores de umidade são definidos como limites de consistência ou limites de Atterberg.

Os valores resultantes dos ensaios permitem uma avaliação quantitativa da potencialidade de expansão do solo, assim, a expansibilidade pode ser analisada baseando-se nos limites de consistência, a partir dos valores dos limites de liquidez, plasticidade e o índice de plasticidade (FRAZÃO, 1981).

f) Atividade

A atividade do solo é uma característica dos finos argilosos que os compõem e influenciam os Limites de Atterberg. A atividade da argila está ligada diretamente o argilomineral que a originou.

A avaliação da expansão dos solos argilosos é medida pelo índice de Atividade (IA), conforme formula (2) abaixo:

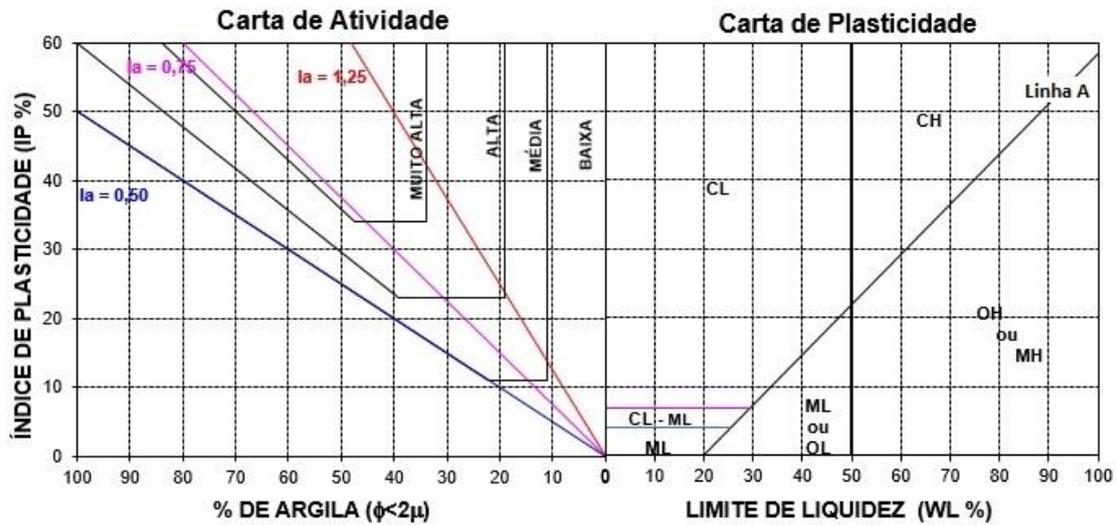
$$\text{Índice de Atividade} = \frac{\text{índice de plasticidade}}{\text{fração argila}}$$

(2)

O índice de atividade corresponde à razão entre índice de plasticidade de Atterberg / % da fração inferior a 2 μm. Para resultados de índice entre 0,75 e 1,25 a argila é considerada normalmente ativa. Para índices menores que 0,75 é considerada inativa e

índices acima de 1,25 a argila é ativa. Na Figura 4 estabelece a classificação dos solos quanto a sua expansividade com os índices de Skempton (1953) e Van Der Merwe (1964) apenas de posse da granulometria e dos limites.

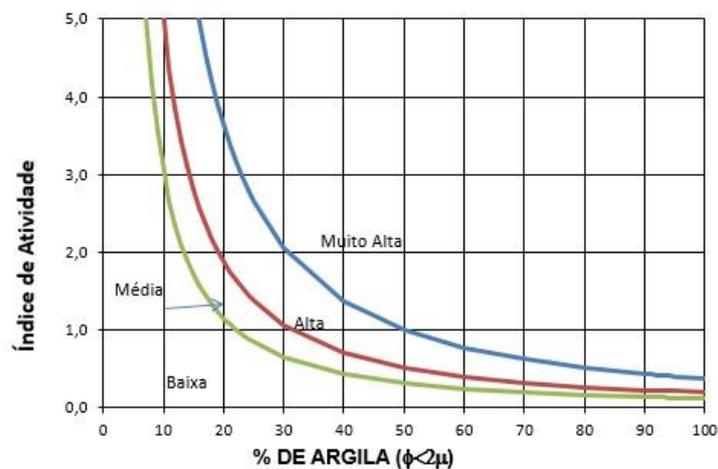
FIGURA 4 - Carta de Atividade e Plasticidade.



FONTE: Skempton (1953) e Van Der Merwe (1964).

Na Figura 2.5, Seed et al., (1962), elaborou critérios para classificação dos solos expansíveis através do índice de atividade e da fração de argila de um solo.

FIGURA 5 - Critérios de expansão quanto ao índice de atividade.



FONTE: Seed et al., (1962).

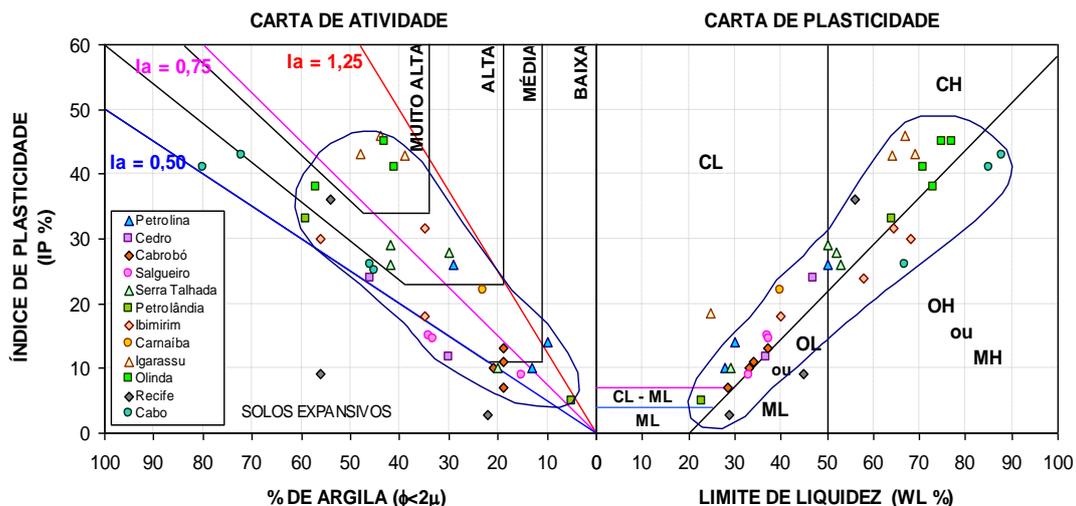
2.1.4 Locais de ocorrência de solos expansivos

Há ocorrência de solos expansivos nos seguintes países: Argentina, Irã, Austrália, México, Marrocos, Canadá, Cuba, África do Sul, Etiópia, Espanha, Gana, Turquia, Índia, EUA, Israel e Venezuela (CHEN, 1975). Segundo Ferreira et al., (2012), solos expansivos ocorrem no Brasil no Centro Sul, nos Estados do Paraná, São Paulo e Santa Catarina; no Nordeste, no norte da Bahia passando por Pernambuco até atingir o Ceará. Segundo Vargas et al., (1981) apud Silva (1993), existem quatro principais áreas de solos expansivos no Brasil, são elas:

- Litoral do Nordeste: nesta área predomina o clima quente e úmido, os solos expansivos são solos residuais de argilitos, siltitos, e arenitos, incluindo os solos massapê do Recôncavo Baiano, nos arredores de Salvador e a Formação Marinha na redondeza da cidade do Recife.
- Sertão Nordestino: região de clima predominantemente quente e seco, presença de solos expansivos nas proximidades da barragem de Itaparica, no Rio São Francisco.
- Estados de São Paulo e Paraná: os solos expansivos encontrados nesses estados são coluviais ou residuais, formados pelo intemperismo de rochas de argila e silte na formação carbonífera de Tubarão, o clima predominante nessa região é subtropical, caracterizados por verões quentes e úmidos e invernos frios e secos.
- Estado do Rio Grande do Sul: os solos expansivos são oriundos de arenitos e siltitos na Formação do Rosário do Sul, também há ocorrência ao norte da cidade de Porto Alegre. Foram encontrados solos expansivos também nas cidades de Encantado, São Jerônimo, Santa Maria, Rosário do Sul, Santa Cruz do Sul e Cachoeirinha.

Segundo Ferreira (2010), a carta de plasticidade-atividade apresentada na Figura 6 que acusa o aparecimento de solos expansíveis em 12 municípios pernambucanos: Petrolina, Cedro, Cabrobó, Salgueiro, Serra Talhada, Petrolândia, Ibimirim, Carnaíba, Igarassu, Olinda, Recife e Cabo. Em estudos mais recentes, Paiva (2016) acrescenta a esta lista os municípios de Paulista e Ipojuca.

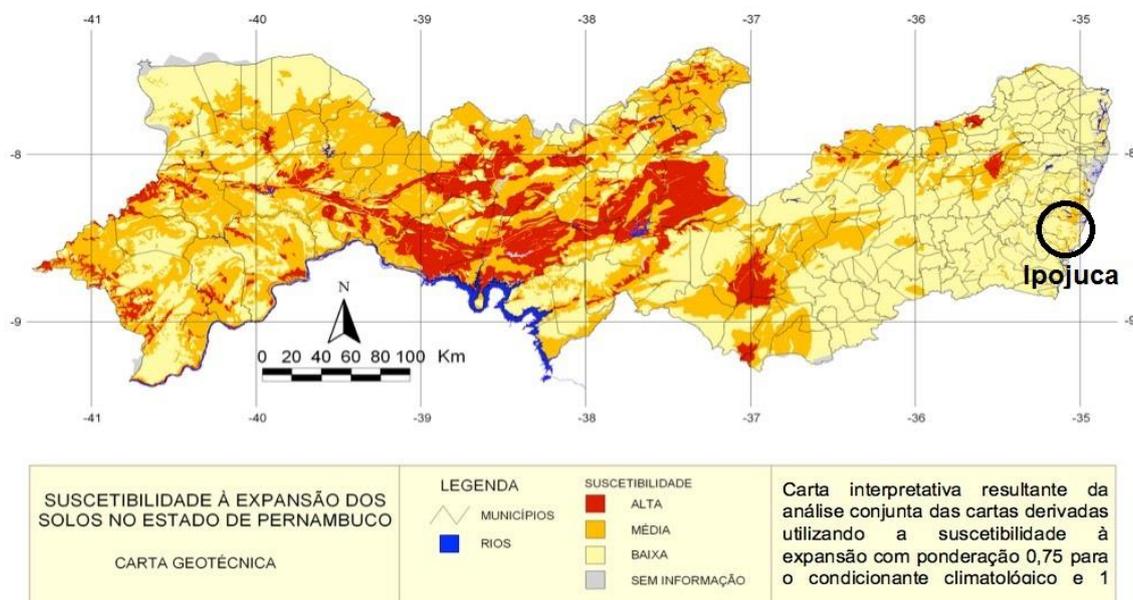
FIGURA 6 - Cartas de Plasticidade-Atividade para argilas expansivas de Pernambuco.



FONTE: Ferreira (2010).

Na Figura 7, Amorim (2004) mostra a Carta de Suscetibilidade à Expansão dos solos no Estado de Pernambuco, onde destacamos o local estudado que apresenta indícios de média suscetibilidade.

FIGURA 7 - Carta de suscetibilidade à expansão dos solos no Estado de Pernambuco destacando o Município de Ipojuca



FONTE: AMORIM, 2004.

2.2 FRAÇÃO DE ARGILA NOS SOLOS

As proporções de argila, silte, areia e pedregulho do solo são as que definem sua granulometria. No entanto, a argila é a que tem maior superfície específica e é de natureza coloidal com alta retenção de cátions e adsorção de fósforo. A fração argila representa a maior parte da fase sólida do solo e é constituída de uma gama variada de minerais que apresentam cargas elétricas negativas responsáveis pela capacidade de troca de cátions.

O desenvolvimento de perfis de solo, o intemperismo das rochas, a diagênese, a ação hidrotermal ou que se depositaram como sedimentos fluviais, marinhos, lacustres ou eólicos resultam em matérias que denominamos de argila (LIMA, 2014).

Segundo Machado (1986), as argilas são constituídas basicamente por silício, alumínio e água, e quantidades significativas de ferro e de metais alcalinos e alcalinoterrosos.

A argila é um mineral de rochas sedimentares compostas de grãos muito finos de silicatos de alumínio hidratado, associados a óxidos (óxido de alumínio e óxido de silício), e água que lhes dão diversas tonalidades e propriedades. A argila tem dimensões muito pequenas, inferior a 0,005mm de acordo pela ABNT (6502/95).

A argila pode ser formada por apenas um mineral argiloso, mas o mais comum é ser formada por uma mistura deles, com predomínio de um, e também matéria orgânica e outras impurezas (BARBOSA, 2013). As propriedades das argilas se devem aos minerais argilosos que os constituem. Para Silva (2010), são geralmente cristalinos, tratando-se quimicamente de silicatos hidratados podendo conter cátions e dispõem-se estruturalmente em camadas e folhas ou, mais raramente, em cadeias ou fitas.

Os mais importantes grupos de argilominerais são a montmorilonita, a illita e a caulinita, que são aluminos silicatos cristalinos hidratados. Estes elementos fazem parte da composição mineralógica dos solos e se originam nas alterações das rochas causadas pelo intemperismo, de maneira que adquirem a capacidade de trocar íons. (LUNA & SCHUCHARDT, 1999).

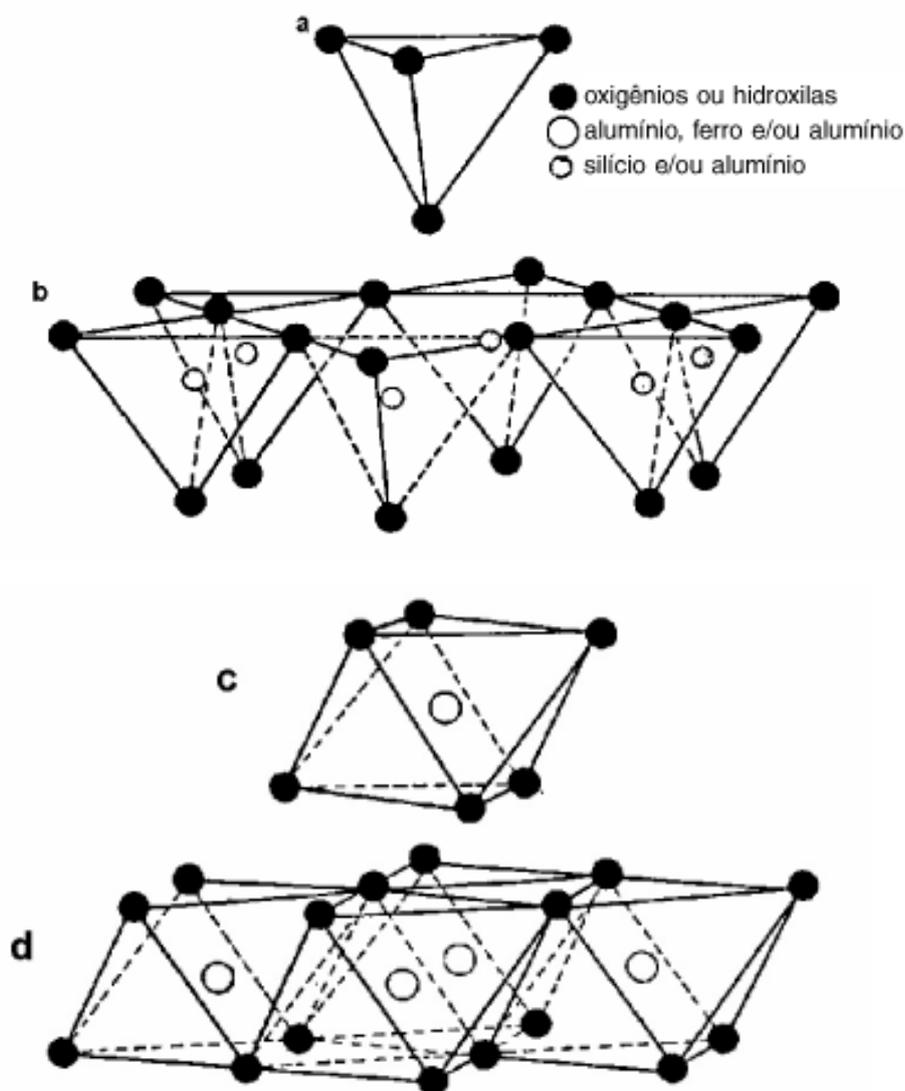
2.2.1 Estrutura dos argilominerais

A estrutura dos argilominerais é formada por folhas de tetraedros de silício e oxigênio e folhas de octaedros de alumínio e oxidrilas, ambas em arranjo hexagonal. Os átomos de oxigênio ficam dispostos em volta dos átomos de silício, em ligação covalente,

acontecendo da mesma forma com as oxidrilas e os átomos de alumínio. Para os tetraedros, o Si, pode ser substituído isomorficamente por Al^{3+} , Fe^{2+} e Fe^{3+} , já nos octaedros pode ocorrer a substituição isomórfica do Al^{3+} , Fe^{2+} , Fe^{3+} , Ti^{4+} , Cr^{3+} , Mn^{2+} , Zn^{2+} , Li^{+} , Mg^{2+} . (GOMES, 1986).

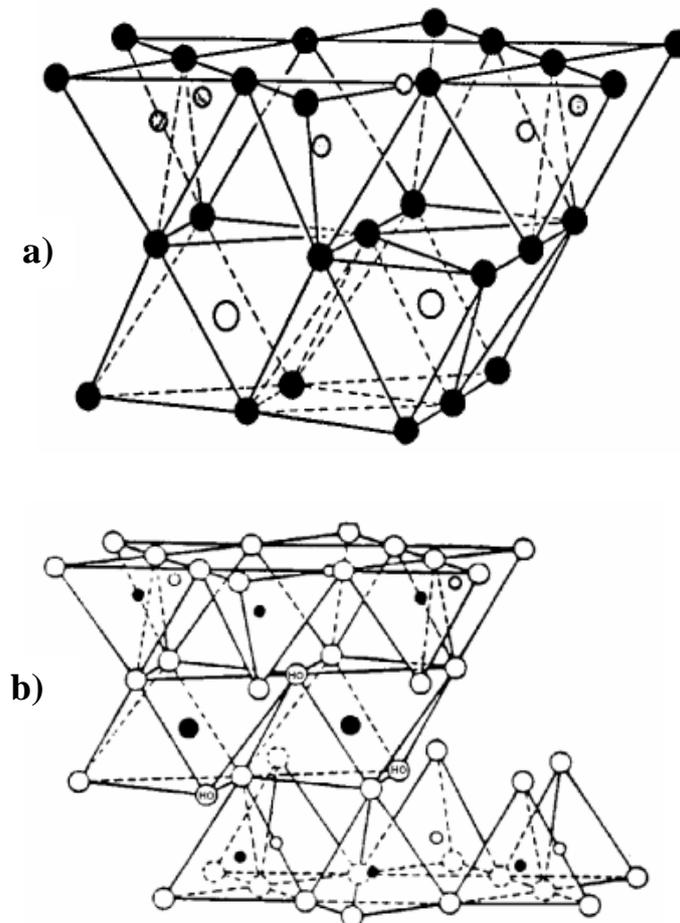
Os argilominerais lamelares são chamados de filossilicatos. Estas lamelas podem ser formadas pela combinação de uma lâmina tetraédrica e uma octaédrica (1:1), como mostra a Figura 8, ou pela combinação de duas lâminas tetraédricas e uma octaédrica (2:1), Figura 9 (GUIMARÃES, 2007).

FIGURA 8 - Unidades estruturais dos argilominerais: a: grupo tetraédrico; b: lâmina tetraédrica; c: grupo octaédrico; d: lâmina octaédrica



FONTE: GRIM (1953).

FIGURA 9 - Modelo esquemático da camada estrutural básica de uma argila: (a) 1:1 e (b) 2:1.



FONTE: GRIM (1953).

Nas ligações entre as unidades estruturais básicas as folhas de tetraedros e de octaedros se empilham ao longo do eixo dando origem a uma camada formada por duas folhas. Nesse empilhamento das folhas, as ligações são feitas pelos oxigênios dos vértices dos tetraedros. Ocorrem também, camadas formadas por três folhas, sendo as folhas de octaedros intercaladas entre duas folhas de tetraedros. Nas estruturas 1:1, as camadas são unidas por pontes de hidrogênio ou oxidrilas, já nas estruturas 2:1, as camadas são unidas por cátions, que se dispõem entre as camadas.

2.2.2 Capacidade de troca catiônica

As argilas apresentam cargas negativas em sua superfície externa, daí seu potencial elevado de reagir com os cátions presentes em soluções, gerando assim sua função de capacidade de troca catiônica (LUNA & SCHUCHARDT, 1999).

Nos argilominerais a troca de cátions varia de acordo com a concentração dos íons trocáveis e adsorvidos, a dimensão, a natureza e seu potencial de hidratação, sendo trocados em seu interior com diferentes energias e podem não estar ligados ao retículo cristalino pela mesma força em todos os argilominerais (GUERRA, 2009).

A capacidade de troca de cátions (CTC) corresponde a soma de cargas positivas do solo retendo os cátions, tais como: Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , Al^{3+} e H^+ , e sua capacidade de troca catiônica varia de acordo com o tipo de argilomineral (GRIM, 1968), como mostra a Tabela 4.

TABELA 4 - Capacidade de troca catiônica dos argilominerais (CTC)

Argilomineral	Capacidade de troca catiônica (meq/100g)
Caulinita	3 a 5
Halosita 2H ₂ O	5 a 10
Halosita 4H ₂ O	10 a 40
Ilita ou Clorita	10 a 40
Sepiolita - Atapulgita	20 a 35
Esmectita	80 a 150
Montmorilonita	80 a 200
Vermiculita	100 a 150

FONTE: GRIM (1968).

Segundo Meurer (2006), a capacidade de troca catiônica exprime-se em milimol por carga, detidos em 100g de argila seca e varia com o tipo de argila. As argilas motmorilonitas, por exemplo, apresentam CTC entre 800 e 1500 ($10^{-3} \text{ mol/c}^* \times 100\text{g}$).

2.3 ESTABILIZAÇÃO DOS SOLOS

A estabilização dos solos é a modificação das características geotécnicas do sistema solo, água e ar, com a finalidade de melhorar os problemas ocasionados pela mudança de volume dos solos, evitando assim a expansibilidade. A estabilização do solo visa o aumento da resistência de um material, aos esforços que nele são impostos (VOGT, 1971).

Para Barbosa (2013), os principais fatores que influenciam na escolha de um método de estabilização dos solos, são os fatores econômicos, a finalidade da obra, a característica do material e as propriedades do solo a serem corrigidas.

Segundo Vendruscolo (2003), um solo estabilizado sofreu processos e técnicas que melhoraram suas propriedades mecânicas, são elas: aumento de resistência, durabilidade,

rigidez, permeabilidade e deformabilidade e são classificados em três grupos: estabilização mecânica, química e física.

Estabilizar um solo é utilizar métodos sejam eles de natureza física, química ou mecânica, permitindo que o solo permaneça estável sob as ações de cargas exteriores e ações climáticas variáveis aplicadas sobre ele (BAPTISTA, 1976). Na escolha do melhor método a ser utilizado deve-se levar em consideração propriedades como a condição natural do solo, propriedades desejadas do solo já estabilizado e os efeitos gerados após a estabilização desse solo (LIMA, 2014).

2.3.1 Estabilização química

Na estabilização química são adicionados aditivos orgânicos ou inorgânicos, como a cal, o cimento Portland, silicatos de sódio, materiais betuminosos, resinas, compostos de fósforo, etc, que modificam as propriedades do solo (VENDRUSCOLO, 2003). Segundo Santos et al. (1995), as propriedades que são modificadas por este tipo de estabilização são as seguintes: resistência mecânica, permeabilidade e deformabilidade do solo.

Na Figura 10, uma prática bastante comum que é o espalhamento direto de cal no solo, dependendo do volume a ser estabilizado este método pode ser mecanizado ou manual.

FIGURA 10 - Aplicação de cal com espalhamento mecanizado.



FONTE: Autor

2.3.2 Estabilização física

Na estabilização física as propriedades do solo são alteradas através da ação do calor, da eletricidade, etc. (VENDRUSCOLO, 2003). A estabilização física consiste na modificação das propriedades do solo, misturando solos de diferentes granulometrias, atuando na textura desses solos (OLIVEIRA, 2006).

Segundo Villibor (1982), na estabilização física do solo por correção granulométrica acontece a combinação e manipulação de solos, para que se obtenha um produto de estabilidade maior que os solos de origem. Diversas técnicas são utilizadas na estabilização física dos solos, entre elas, os tratamentos térmicos de secagem ou congelamento, o tratamento elétrico e eletro-osmose, que melhoram as características estruturais e de drenagem dos solos (OLIVEIRA, 1994).

2.3.3 Estabilização mecânica

A estabilização mecânica do solo é a correção da sua composição granulométrica, através da “arrumação” das suas partículas, com o objetivo de melhorar as características do solo (VENDRUSCOLO, 2003).

Apenas os métodos que alteram o arranjo das partículas ou a granulometria do solo são considerados métodos de estabilização mecânica (GONDIM, 2008). Para Santos, (1995), a estabilização mecânica é uma simples compactação, com o objetivo de reduzir o volume de vazios e aumentar a resistência.

Na Figura 11, a estabilização mecânica através de mistura de solos com diferentes granulometrias, neste processo, os materiais vêm de diversas jazidas para uma mesma região a ser aterrada, com o auxílio de equipamentos de terraplenagem é feita a mistura e compactação estabilizando o solo. Esta prática é bastante comum por permitir velocidade na terraplenagem de grandes aterros, no entanto, sua eficiência dependerá das características dos solos.

FIGURA 11 - Aplicação de materiais de diversas jazidas alterando sua granulometria.



FONTE: Autor.

2.3.4 Plataformas industriais sobre solos expansivos

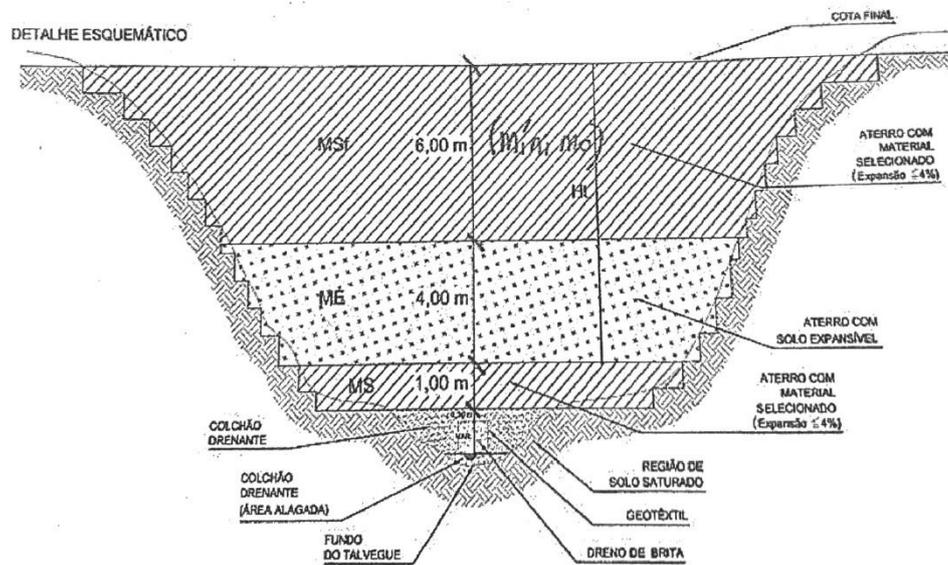
De acordo com Sandroni e Consoli (2010), a implantação de indústrias compreende corte nos trechos elevados de onde afloram solos expansivos e não expansivos e destinados a aterros dos vales e talvegues onde o material cortado vai ser disposto. As posturas frequentes são a substituição e o capeamento destes solos. Na condição que o solo expansivo fique sob camada de material não expansivo capaz de neutralizar ou deixar o potencial expansivo em condições de baixa significância.

A camada de recobrimento de um solo expansivo deve ter espessura mínima de 6 m, em alguns casos como Aratu, BA, onde o solo expansivo possui menor intensidade, um recobrimento de 2 m de altura. (SANDRONI e CONSOLI, 2010).

Ocorre que os volumes necessários para tal cobertura são elevados e que os aterros da região têm demonstrado volume de solo expansivo superior a 60% dos cortes. Por este motivo a necessidade de se criar alternativas para o uso do solo expansivo de forma segura às estruturas edificadas.

A Figura 12 mostra o critério de cobertura do solo expansivo no aterro em uma plataforma industrial de Ipojuca-PE, onde considera-se um solo bom para selo de drenos em fundo de talvegues e cobrimentos de solo expansivo, um solo com expansão livre menor que 4%. (SANDRONI e CONSOLI, 2010).

FIGURA 12 - Espessura mínima de cobertura de solo de baixo potencial expansivo (Ipojuca, PE).



FONTE: SANDRONI e CONSOLI (2010).

Um ensaio bastante utilizado em obras de terraplenagem é o CBR (ISC) previsto pela NBR 9895 (1987), Índice de Suporte Califórnia. Nele pode ser obtida a expansão CBR. Através de sua simplicidade de execução foram criadas as categorias mostradas na Tabela 5.

TABELA 5 - Categorias de expansibilidade em função da expansão do CBR

CATEGORIA	EXPANSÃO CBR (%)
Não expansivo	< 1%
Intermediário	1% a 2%
Expansivo	2% a 5%
Muito Expansivo	> 5%

FONTE: SANDRONI e CONSOLI (2010)

Em 2008, uma proposta de uso de areia mostrou a viabilidade para a contenção da expansividade dos solos. A proposta é quantificar qual a fração necessária de areia para se obter a neutralização dos solos expansivos e qual acréscimo do custo financeiro provocado pelo uso do estabilizante areia na terraplenagem do aterro compactado. No Capítulo 3.1 será descrito o experimento.

2.4 USO DE AREIA COMO AGENTE ESTABILIZANTE

2.4.1 Definição

A areia para construção civil pode ser definida como matéria prima mineral granular, não consolidada constituída principalmente por partículas de quartzo. Outros minerais podem também estar presente na composição da areia, mas vai depender da sua origem geológica. Na construção civil a areia pode ser classificada como natural (aquelas que provem de arenitos inconsolidados, aluviões, rios, minas e várzeas) e artificial (subproduto resultante de pedreiras ou britagem). Comercialmente as areias recebem a denominação de acordo com o grau de beneficiamento que são submetidas, podendo ser: bruta, lavada ou graduada. A areia para construção civil possui granulometria entre 0,05 e 4,8 mm (classificadas em areias finas, médias e grossas) e massa específica normal ($1000 \text{ kg/m}^3 < \gamma < 2000 \text{ kg/m}^3$). (NBR NM 248, 2003).

2.4.2 Ocorrência

Os principais locais de produção de areia no Brasil são várzeas, leitos de rios, depósitos lacustres e mantos de decomposição de rochas. Também é possível a partir de depósitos de areia e cascalhos marinhos recentes, porém no Brasil essa modalidade ainda é pouco explorada, diferentemente de alguns países da Europa e Ásia. A produção de areia é caracteriza pelo grande volume extraído e baixo valor agregado, onde o transporte corresponde, aproximadamente, a 2/3 do preço final do produto (DNPM, 2010).

2.4.3 Tecnologias de mineração e beneficiamento

O beneficiamento da areia é simples, consiste na remoção de impurezas finas, na classificação granulométrica e na secagem, que separam granulometricamente as frações interessantes aos setores de aplicação.

A areia é extraída em unidades de mineração conhecidas como areiais ou portos de areia, podendo ser extraída do leito de rios, depósitos lacustres, minas ou de dunas. A areia produzida no Brasil é em sua maioria de leito de rios ou extraída de minas, com formação de cavas inundadas pelo lençol freático, nas operações em reservatórios ou rios mais largos. Vários tipos de dragas são usadas de acordo com o tipo de depósito mineral,

variando o processo de lavra, que pode ser por desmonte hidráulico, escavação mecânica ou por dragagem (RODRIGUES, 2004).

Os métodos de extração de areia e cascalho vão depender da sua forma de ocorrência e suas características intrínsecas da jazida e região. O quadro 1 abaixo apresenta uma correlação entre as formas de ocorrência de areias e cascalhos e os métodos comumente empregados na sua exploração (ANEPAC, 2011).

QUADRO 1 - Forma de ocorrências e métodos de exploração.

FORMA DE OCORRÊNCIA DE AREIA E CASCALHO	MÉTODOS TÍPICOS DE EXPLORAÇÃO
Não coesa encontrada nos leitos de rios atuais	Dragagem
Não coesa encontrada nas planícies e terraços aluviais	Desmonte hidráulico ou dragagem
Não coesa encontrada em dunas litorâneas	Desmonte mecânico
Areia consolidada na forma de arenitos ou quartzitos, formando platôs, com escarpas	
Cascalho desagregado, resultante da alteração de rochas ígneas, principalmente basaltos e diabásios	

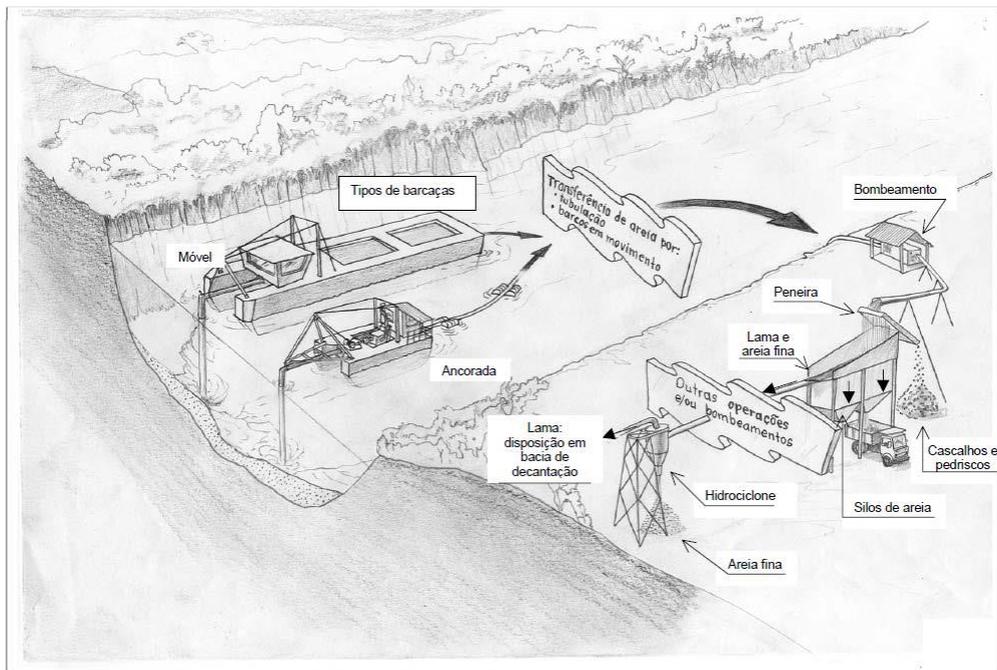
FONTE: ANEPAC, 2011

Existem três principais métodos de lavra que vai depender de como o minério se encontra na natureza, se a operação necessária será seca ou úmida e o grau de dificuldade de extração, para cada grupo existem inúmeros procedimentos práticos, equipamentos, escalas de produção, insumos utilizados, etc. As alternativas de tratamento do mineral beneficiado vai depender de cada caso em particular. As características dos três grupos são apresentadas a seguir (TANNO e SINTONI, 2003):

GRUPO 1: Beneficiamento que utiliza a ação da água como elemento desagregador sobre os minerais dispostos em camadas de sedimentos ou mantos de alteração. Utiliza-se, prioritariamente, uma primeira operação de jateamento de água sob alta pressão na frente de lavra que se desenvolve ao longo das superfícies nas encostas dos morros ou no interior de cavas secas. A Figura 13 apresenta outro tipo de operação que se dá por dragagem em leitos submersos, que consiste na aplicação de sistemas de bombeamento para sucção de polpa formada a partir da camada de sedimentos nos fundos dos rios, lagoas, represas ou canais.

O tratamento nesse grupo inclui também operações complementares de separação com corte granulométrico por peneiramento, tanques ou silos de lavagem e sedimentação, hidrociclones, sistemas de bombeamento para transferência de polpa, entre outras.

FIGURA 13 - Lavra por dragagem em leito de rio ou cava submersa.



FONTE: ALMEIDA, (2002).

GRUPO 2: Beneficiamento por escavação mecânica a seco do material in situ, aplicadas nas rochas alteradas de fácil desagregação. Nas lavras mecânicas se faz uso de máquinas como retroescavadeiras, carregadeiras frontais e equipamentos escarificadores. Vários processos podem ser aplicados nesse grupo, como diversos tipos de moagem com redução progressiva das partículas minerais, britadores de pequeno porte, ciclones, espirais, secagem, pesagem, separação magnética e outros processos físico-químicos onde a escolha do método depende do uso posterior do minério.

GRUPO 3: Beneficiamento em maciços rochosos que necessitam de perfuração e desmonte de rochas por explosivos. Uso de técnicas especiais para a perfuração da rocha e cálculo para dimensionamento de plano de fogo. Este tipo de mineração inclui processo de britagem em diversos estágios para promover a redução das partículas resultantes do desmonte rochoso.

2.4.4 Uso de areia em aterros compactados

Os aterros são depósitos artificiais de qualquer tipo de solo ou outro material, ou seja, consiste na recomposição de escavações ou preenchimento com o uso de material de

empréstimo. Os aterros podem ser compactados ou não, essa definição vai depender das características do serviço e sua finalidade.

Quando se adicionam algum tipo de agente estabilizante em solos, se tem como objetivo melhorar as propriedades dos solos de acordo com o desejado, com a intenção de se obter melhorias no comportamento geotécnico do material, como exemplo a redução da expansibilidade, a variação no suporte, a densidade e eventualmente permeabilidade, resultando em ganhos econômicos, técnicos e ambientais.

Na utilização de areias em aterros devem-se considerar algumas observações, como: a execução deve obedecer às recomendações de projeto, a areia deve ser limpa destituída de detritos, o material deve ser lançado em camadas horizontais obedecendo à espessura estabelecida em projeto. O adensamento pode ser mecânico ou hidráulico e deve-se estar atento ao método e energia de adensamento a ser empregada.

2.5 CARACTERÍSTICAS DA ÁREA DE ESTUDO

2.5.1 Localização

Ipojuca-PE é um município brasileiro do estado de Pernambuco. Pertence à mesorregião metropolitana do Recife e à microrregião de Suape. Possui área territorial de cerca de 512,6 km², contendo área urbana municipal e área rural. É localizado ao sul da cidade do Recife distante 50,2 km da capital. Limita-se ao norte com o município do Cabo de Santo Agostinho, ao sul com o município de Sirinhaém, a leste com o Oceano Atlântico e a oeste com o município de Escada (Figura 2.14). De acordo com a estimativa populacional do ano de 2016, divulgada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), a sua população total era de 92.965 habitantes. (CPRM, 2005).

O município se destaca principalmente pelo turismo no seu litoral, com praias internacionalmente conhecidas, como: Porto de Galinhas, Cupe, Muro Alto, Maracaípe e Serrambí e ainda possui um dos principais portos público do Nordeste e um dos mais tecnologicamente avançados do país, abrangendo em seu território o maior estaleiro do hemisfério sul, o Estaleiro Atlântico Sul, responsável pela construção de navios petroleiros, gesseiros, contêineres, de perfuração e plataformas. Ipojuca abriga no seu complexo portuário a Refinaria Abreu e Lima e sedia a Petroquímica Suape. O Complexo Industrial Portuário de Suape tem área total 13.500 hectares, distribuídos em Zonas Portuária, Industrial, Administrativa, de Preservação Ecológica e Cultural, com

infraestrutura terrestre de 50 km de rodovias e 41 km de ferrovias próprias, com acesso direto ao terminal de contêineres, ao parque de tancagem de granéis líquidos, de minérios e aos Cais Públicos 1 e 4.

Na Figura 14, mostra a localização do município de Ipojuca-PE dentro do Estado de Pernambuco.

FIGURA 14 - Mapa de localização da área.



FONTE: CPRM (2005)

2.5.2 Clima

O município tem clima tropical úmido com chuvas de inverno antecipadas, com verão quente, a temperatura média anual da área é de 24 °C, variando entre a mínima de 18 °C e a máxima de 32 °C, do tipo Ams', segundo a classificação de Koppen. O município registra em média 2.050 mm de precipitação anualmente. (NIMER, 1979)

2.5.3 Geologia e geomorfologia

Segundo Lima Filho (1996), no município de Ipojuca encontram-se quatro unidades geológicas, posicionadas da seguinte forma na coluna estratigráfica:

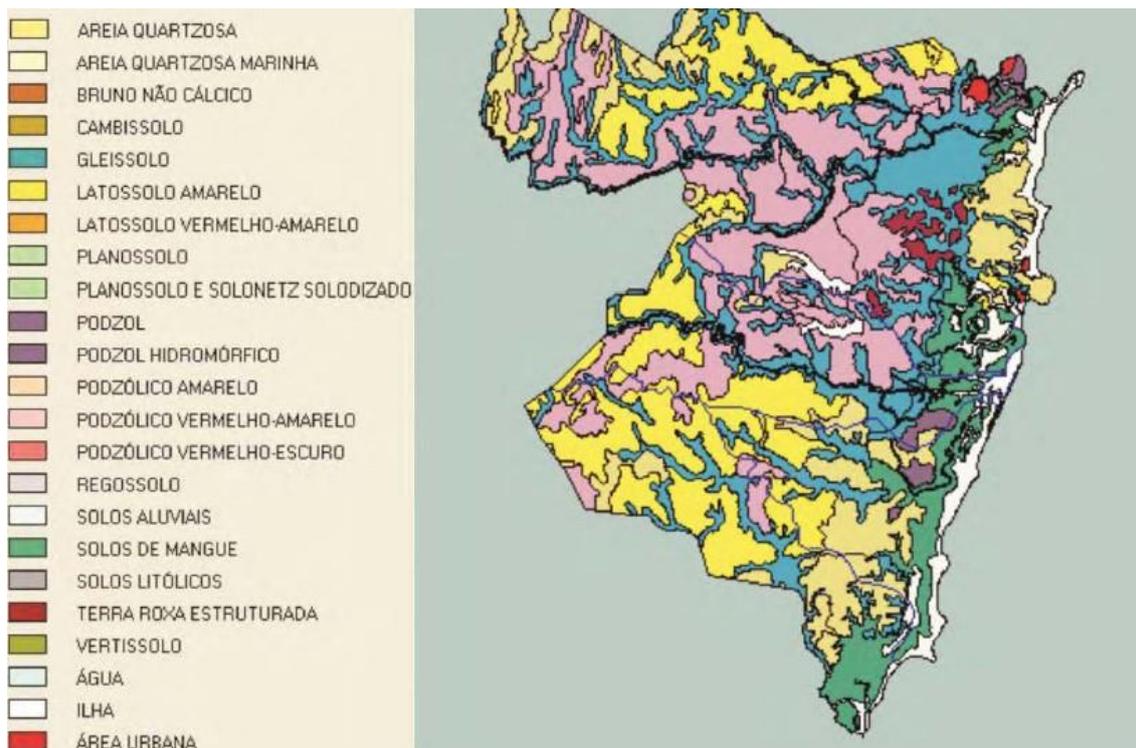
1. Complexo Gnáissico-Migmatítico: composto, predominantemente, por ortognaisses, gnaisses milonitizados, de composição granítica a granodiorítica, por vezes tonalítica;

2. Rochas Granitóides: constituídos por cinco tipos petrográficos, denominados biotita granitos, biotita granitos porfiríticos, muscovita-biotita granitos, quartzosienitos e leucogranitos.
3. Grupo Pernambuco: Pernambuco engloba litologias de origem sedimentar e vulcânica que preenchem a bacia sedimentar que se localiza a sul da cidade do Recife, estendendo-se até a região de Sirinhaém. Está constituído pelas Formações Cabo, Estiva, Ipojuca e Algodoads. As duas primeiras e a última, compostas por rochas de origem sedimentar, e a outra, por rochas de origem vulcânica.

Coberturas Quaternárias: constituídas por sedimentos inconsolidados, de idade quaternária, formando os Depósitos Aluvionares, Sedimentos de Praia, Sedimentos Flúvio-Lagunares, Depósitos de Mangues, Terraços Litorâneos Holocênicos e Terraços Litorâneos Pleistocênicos.

De acordo com as características geotécnicas do município de Ipojuca, podemos dividir o mesmo em duas áreas distintas: Bacia do Cabo e Terrenos Cristalinos. Já na região de Suape predominam os seguintes tipos de solos: Latossolos Amarelos, Argissolos, Nitossolos, Gleissolos, Espodossolos, Organossolos e Neossolos (GUERRA, 1998).

Na microrregião de Suape existe variedade de solos com predominância de manguezal, podzólico vermelho-amarelo e latossolo amarelo. A distribuição dos solos nessa região está localizada numa faixa denominada de litoral Sul de Pernambuco (Figura 15), apresentando solos arenosos, localizados nos terraços litorâneos, até os de textura argilosa que recobrem os morros e colinas situadas na Planície Costeira e constituem a associação Latossolo Vermelho Amarelo e Podzólico Vermelho Amarelo (EMBRAPA, 2001).

FIGURA 15 - Zoneamento de solos da Microrregião de Suape.

FONTE: ZAPE – EMBRAPA, 2001.

2.5.4 Estudos anteriores em Ipojuca – PE

De acordo com Miguel Junior (2013), o solo de Ipojuca-PE apresentou resultados de tensão de expansão e expansão livre elevados sendo controlados estes dois índices com a adição de 9% de cal hidratada do tipo CH-I.

De acordo com Lima (2014), o solo de Ipojuca-PE apresentou resultados com elevada expansividade. Através de microscopia eletrônica de varredura (MEV), a argila expansiva de Suape mostra uma macroestrutura prismática formada por fortes e grandes blocos angulares e subangulares. Através da análise termogravimétrica, identificou-se a presença do argilomineral montmorilonita. Com utilização da cal hidratada como agente estabilizante a expansão “livre” foi controlada por completo com a incorporação de 11% do seu peso.

De acordo com Paiva (2016), o solo de Ipojuca-PE também confirmou a existência de expansividade do solo classificando-o como muito alta. Identificou a existência do argilomineral montmorilonita. A tensão de expansão pode ser controlada com a utilização de 9% de cal hidratada em seu peso. A expansão livre necessitou da 11% de cal hidratada para sua estabilização.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O programa de investigação geotécnica foi desenvolvido no solo do município de Ipojuca-PE e nas misturas desse solo com areia nas proporções, em peso, de 10%, 20%, 30%, 40%, 50% e 75%. O local escolhido é devido ao grande número de empreendimentos que tem se instalado na região onde em sua totalidade houve a necessidade de terraplenagem com elevados volumes de cortes e aterros.

O programa de investigação geotécnica constou de quatro etapas. A primeira etapa consta da análise das caracterizações Física e Mecânica de oito amostras de solo de diversas jazidas de corte de profundidades variando de 2 a 5 metros no aterro da plataforma industrial. Na segunda etapa são também analisados os dados da execução em campo de um aterro experimental com 3 faixas de solo medindo 10 m de largura, com 50 m de comprimento e 0,25 m de altura; uma faixa foi compactada com o solo natural da jazida, outra no solo misturado com 20% de areia e a terceira faixa do solo com mistura de 30% de areia. Na terceira etapa são coletadas amostras do solo expansivo de Ipojuca-PE e da areia do leito do rio Ipojuca, mais precisamente no município de Bezerros-PE e realizados ensaios para as caracterizações Física, Química e Mecânica do solo expansivo e das misturas desse solo com areia nas proporções em peso 10%, 20%, 30%, 40%, 50% e 75%. Na quarta etapa foi realizada uma comparação dos resultados da caracterização Física e Mecânica obtidos na terceira etapa do solo com as misturas de solo-cal realizados por Lima (2014), em solo expansivo de Ipojuca. O Quadro 2 detalha atividades e ensaios realizados em cada etapa.

QUADRO 2 – Atividades de campo e laboratório realizados

ETAPA	ATIVIDADE / ENSAIOS
1	Análise de dados de relatórios de ensaios realizados no Laboratório de Solos e Instrumentação (LSI) da UFPE em oito amostras deformadas de diversas jazidas de corte para servir de material de aterro compactada. Contendo resultados de ensaios de caracterização física, Índice Suporte Califórnia, ensaios de expansão com sobretensão de 7 kPa e 40 kPa e tensão de expansão a volume constante após consolidação de 40 kPa.
2	É composta de duas partes: A primeira descreve a compactação de um aterro experimental realizado no pátio industrial com 3 faixas medindo 10 m de largura, 50 m de comprimento e 0,25 m de altura. Uma faixa foi compactada com o solo da jazida de corte, outra com este solo misturado com 20% de areia e a terceira esse solo com misturado com 30% de areia; E na segunda parte são realizados ensaios para avaliar a tensão de expansão a volume constante no solo compactado e nas misturas de solo com 20% e 30% de areia.
3	Composta de três partes: 1ª - coleta de novas amostras deformadas de uma jazida de corte do solo expansivo de Ipojuca-PE e na areia do leito do Rio Ipojuca em Bezerros-PE; 2ª - realização de ensaios de caracterização Física, Química e para determinação dos óxidos por fluorescência de raio – X; 3ª - Realização de ensaios para avaliar a expansão livre e tensão de expansão a volume constante no solo compactado e nas misturas compactadas desse solo com areia nas proporções, em peso, de 10%, 20%, 30%, 40%, 50% e 75%. Estes ensaios foram realizados na UFPE e UNICAP.
4	Comparação das caracterizações Mecânicas do solo expansivo de Ipojuca-PE misturado com areia obtidos na terceira etapa com as obtidas com a misturas desse solo com cal realizadas por Lima (2014).

3.1 COLETA DE DADOS DOS ENSAIOS PREVIAMENTE REALIZADOS E EXECUÇÃO DO ATERRO EXPERIMENTAL CORRESPONDENDO A PRIMEIRA E SEGUNDA ETAPA DA PESQUISA

Foram coletados dados dos relatórios de ensaios realizados no Laboratório de Solos e Instrumentação (LSI) da UFPE em oito amostras deformadas de diversas jazidas de corte para servir de material de aterro compactado. Os resultados de ensaios de caracterização Física, Índice Suporte Califórnia, ensaios de expansão com sobretensão de 7 kPa e 40 kPa e tensão de expansão a volume constante após consolidação de 40 kPa. As análises dos dados são apresentadas no Capítulo 4.

A necessidade de se obter a velocidade dos trabalhos das máquinas de terraplenagem, os acréscimos de tempo gerados para se realizar o aterro compactado com misturas e se otimizar todo o custeio necessário para se obter um aterro compactado com as características previstas ao empreendimento a ser implantado gerou a criação de um aterro

experimental para viabilizar e comparar os custos, dificuldades e eficiências do aterro com o uso do solo puro, solo com 20% de areia e solo com 30% de areia.

O Aterro experimento foi executado com 3 faixas de solo medindo 10 m de largura, com 50 m de comprimento e 0,25 m de altura com solo fofo, sendo na faixa 1 com solo puro, na faixa 2, solo com mistura com 20% de areia e na faixa 3, solo com mistura com 30% de areia, os percentuais em volume. A areia foi introduzida para se analisar a redução da expansão com adição de um solo inerte, estabilizando mecanicamente. O Aterro recebeu material de uma mesma jazida de corte retirado por escavadeira hidráulica e transportado por caminhão tipo basculantes com capacidade de transporte de 16 m³ por viagem. Após o lançamento do material no local do aterro, o solo foi homogeneizado com motoniveladora e trator de grade. Afere-se a umidade do solo e caso necessário, um caminhão pipa umedece levando-o para a umidade ótima. Em seguida, entra em cena o rolo compactador tipo pé de carneiro para atingir o grau de compactação superior a 95% de compactação. Após a homogeneização foram coletadas amostras nas 3 faixas para caracterização do material.

A Figura 16 mostra o uso dos equipamentos de terraplenagem do aterro experimental da seguinte forma: 1- caminhões basculantes transportam o solo até as áreas de aterro, depositam ali várias cargas de forma a atingir camadas com 25 a 30 cm; 2- motoniveladora homogeniza e nivela formando uma camada uniforme; 3- tratores aradores auxiliam na homogeneização tornando partes de menor tamanho os grumos de solos; 4- carro pipas umedecem o solo afim de chegar a umidade ótima; 5- após a aprovação da umidade ótima entra o rolo compactador compactando a camada em várias rolas até atingir o peso máximo aparente seco. Este é aferido através do ensaio de densidade “in situ” por frasco de areia. As análises dos resultados do aterro experimental serão apresentadas no Capítulo 4.

FIGURA 16 - a) Rolo compactador, b) Motoniveladora misturando e c) Pipa umedecendo o solo misturado ao lado de uma camada pronta para aferição.



FONTE: Autor

3.2 COLETAS E PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS DEFORMADAS PARA A TERCEIRA ETAPA

São coletadas amostras deformadas do solo expansivo de Ipojuca-PE e da areia no leito do Rio Ipojuca em Bezerros- PE que serviu para as misturas.

A finalidade de se obter estabilização do solo expansivo deste estudo com a utilização de areia, é de que a areia entre na mistura com solo expansivo de forma inerte. Diferentemente do que ocorre com a mistura com uso de cal, este estudo propõe o uso de uma areia minimamente reativa, por este motivo, busco-se uma areia proveniente de um rio de águas não salinas, assim, devido à facilidade ao acesso ao areial situado na cidade de Bezerros-PE, por meio de dragagem localizado no Rio Ipojuca, foi disponibilizada a areia para este estudo.

A coleta de amostra deformada do solo expansivo de Ipojuca-PE, foi realizada com o auxílio de ferramentas manuais como pás, picaretas e enxadas, preenchidas e

acomodadas em 8 sacos plásticos com aproximadamente 20 kg, totalizando 160 kg de solo. A amostra de areia foi colocada em 2 sacos com aproximadamente 30 quilos cada, totalizando 60 quilos. Na Figura 3.2 apresenta a coleta e o transporte da amostra de solo.

FIGURA 17 - a) Coleta da amostra deformada, b) Transporte da amostra deformada.



FONTE: Autor.

Na preparação das amostras do solo expansivo e da areia utiliza-se a NBR 6457 (Amostra de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização) que consistiu em secar ao ar (Figura 18), destorroar todo o material e homogeneizar todas as amostras de forma que não houvesse frações diferentes de solos. Os dois materiais após a preparação descrita foram acomodados de volta a sacos plásticos e amarrados para que não houvesse variação de umidade. Para passar para o processo de caracterização, separou-se amostras de materiais puros e misturas, em peso seco. Na figura 19, a areia em processo de secagem.

FIGURA 18 - Amostra deformada de solo expansivo seca ao ar



FONTE: Autor.

FIGURA 19 - Amostra deformada de areia seca ao ar



FONTE: Autor.

Para os ensaios de caracterização Física, Química, de Eflorescência de raio-X e os de avaliação Tensão de Expansão e Expansão “Livre”, foram preparadas oito amostras sendo a primeira do solo expansivo de Ipojuca-PE, da segunda à sétima correspondem às

misturas do solo expansivo com areia nas proporções, em peso seco, de 10%, 20%, 30%, 40%, 50% e 75% respectivamente e a oitava refere-se à areia do leito do Rio de Ipojuca, (Quadro 3).

QUADRO 3 - Frações utilizadas nas amostras de solo e areia

MISTURAS		
AMOSTRA	SOLO (%)	AREIA (%)
1- Solo	100	0
2- 90% Solo + 10% de areia	90	10
3- 80% Solo + 20% de areia	80	20
4- 70% Solo + 30% de areia	70	30
5- 60% Solo + 40% de areia	60	40
6- 50% Solo + 50% de areia	50	50
7- 25% Solo + 75% de areia	25	75
8- Areia	0	100

FONTE: Autor.

3.3 ENSAIOS DE LABORATÓRIO REALIZADOS NA TERCEIRA ETAPA DA PESQUISA

São realizados ensaios de caracterização Física, Química e para determinação dos óxidos por Eflorescência de raio-X e ensaios para avaliar a Expansão “Livre” e Tensão de Expansão a volume constante no solo expansivo compactado (na umidade ótima e na umidade correspondente a 50% de umidade ótima) e nas misturas compactadas desse solo com areia.

3.3.1 Ensaios de caracterização física

Os ensaios de caracterização Física realizados seguiram as seguintes metodologias: preparação para ensaios de caracterização, executado segundo as prescrições da ABNT ABNT/ NBR 6457 (2016) e ABNT/ NBR 7182 (2016) e ensaios de caracterização: determinação do limite de liquidez, conforme ABNT/ NBR 6459 (2016); determinação do limite de plasticidade, conforme ABNT/ NBR 7180 (2016); determinação da massa específica, conforme ABNT/ NBR 6458 (2016), análise granulométrica, conforme ABNT/ NBR 7181 (2016). A determinação da umidade ótima

e da máxima densidade foi obtida no ensaio de compactação ABNT/NBR 7182 (2016) (Solo – Ensaio normal de compactação).

3.3.2 Ensaios de caracterização química

Os ensaios químicos das amostras de solo e suas misturas com teores de 10%, 20%, 30%, 40% e 50% de areia foram realizados no Laboratório de Análises Químicas da Universidade Católica de Pernambuco (UNICAP). As amostras foram analisadas após o tempo mínimo de dois dias da realização das misturas com o solo expansivo e seguiram a metodologia proposta por Donagema et al (2011) no Manual de Métodos de Análise de Solos da Embrapa e os resultados foram calculados, de acordo com Santos et al (2013) utilizando o sistema de classificação de solos da Embrapa: soma de bases (S); capacidade de troca catiônica (CTC ou T); saturação por bases (V). Os resultados foram realizados em triplicata e a diferença entre os resultados não ultrapassou 0,1% do valor em relação às titulações.

A Espectrometria de Fluorescência de raios-X (FRX) foi utilizada para a avaliação quantitativa da composição química do solo. Foram determinados os teores dos dez óxidos de maior abundância: SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, CaO, MnO, MgO, Na₂O, K₂O, TiO₂ e P₂O₅. Uma amostra de cada solo e das misturas solo-cal foram colocadas em estufa para secar a 110 °C e levadas a uma mufla, a 1000 °C, por duas horas, para a determinação de perda ao fogo. Foram preparadas pérolas fundidas usando tetraborato de lítio como fundente, que foram analisadas em espectrômetro de fluorescência de raios X, Rigaku modelo RIX 3000, equipado com tubo de Rh, pelo método de curvas de calibração, que foram construídas com materiais de referências internacional.

3.3.3 Ensaios de caracterização mecânica (expansividade)

Para a Caracterização Mecânica foram realizados os ensaios edométricos referenciados pela ASTM D4546 (Standard test methods for one-dimensional swellor collapse of soils) utilizado para medir tensão de expansão e pela ASTM D4829 (Standard Test method for expansion Index of soils) para medir expansão livre. Nos ensaios de expansão foram realizados nas amostras do solo expansivo sem mistura e para misturas com adição de 10%, 30%, 50% e 75% de areia. Através dos resultados da curva de compactação que apresentou dois picos, observando-se que o primeiro pico esteve a

aproximadamente 50% da umidade do segundo pico, foram moldados os anéis para caracterização da expansividade em duas umidades, uma na umidade ótima e outra na umidade correspondente a 50% da umidade ótima obtidos do ensaio de compactação.

3.3.3.1 Expansão “Livre”

Durante a execução dos ensaios edométricos simples foram adotados procedimentos para aferir a Expansão “Livre”. Foram realizados em células edométricas convencionais com anéis de aço inoxidável com altura de 20,00 mm e diâmetro de 71,3 mm do próprio equipamento e submetidos a uma sobrecarga equivalente a 7,0 kPa. A expansão do solo após a inundação com água é acompanhada até sua estabilização. Os procedimentos adotados segue a norma ASTM D4829.

3.3.3.2 Tensão de Expansão

A Tensão de Expansão é avaliada por três métodos diferentes: 1- Carregamento após a expansão com diferentes tensões verticais de consolidação; 2- Expansão e colapso sob tensão; 3- Volume Constante para as amostras compactadas do solo expansivo e nas misturas solo-areia são avaliadas pelo método Volume Constante.

MÉTODO 1 – Carregamento após expansão com diferentes tensões verticais de consolidação: Os corpos de prova foram carregados a uma tensão vertical predeterminada e posteriormente inundados, sendo medidas as deformações de compressão, de colapso ou de expansão. Foi utilizado papel filtro previamente com a amostra de solo evitando perda ou ganho de umidade antes da inundação. Inicialmente é aplicada uma tensão de 10 kPa, afim de se obter o assentamento do sistema e a leitura inicial do processo de deformação. Após o período de 24h a amostra é inundada e aplicada às cargas com valores (10, 20, 40, 80, 160, 320, 640 e 1280 kPa). O tempo de duração de cada estágio após a inundação é de no mínimo 24h.

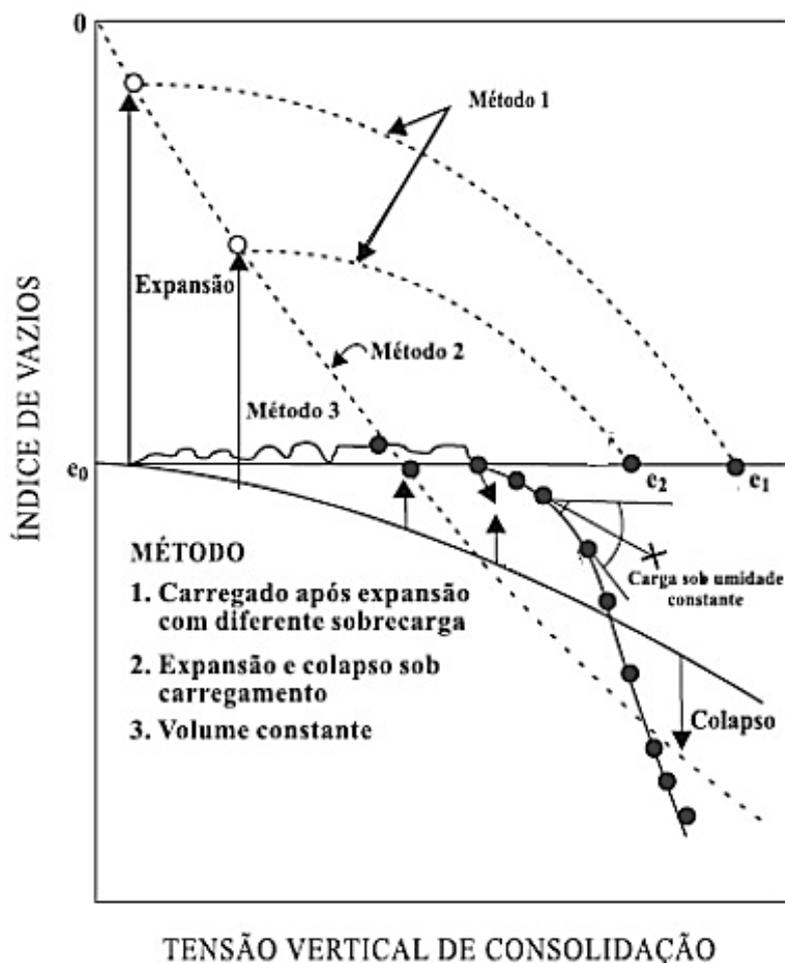
MÉTODO 2 – Expansão e colapso sob tensão: Após a amostra ser ajustada na prensa, cada corpo de prova foi submetido às mesmas tensões dos corpos do Método 1, inundadas e aferidas as deformações. Com as deformações e tensões verticais de inundações, é

obtida por regressão linear a reta que melhor se ajusta aos pontos e a partir da equação é obtida a tensão de expansão que corresponde à deformação zero.

MÉTODO 3 – Volume constante: Após a inundação da amostra e à medida que o volume aumenta, é aplicada uma sobrecarga impedindo esta variação. A leitura inicial do deflectrômetro deverá ser mantida aplicando sobrecargas sempre que o solo expandir. A soma de todas as sobrecargas corresponde a uma tensão, que é chamada de Tensão de Expansão do solo a volume constante.

Na Figura 20 ilustra os 3 métodos de avaliação de tensão de expansão (FERREIRA e FERREIRA, 2009).

FIGURA 20 - Métodos para determinação da Tensão de Expansão.



FONTE: Adaptada de Ferreira e Ferreira (2009)

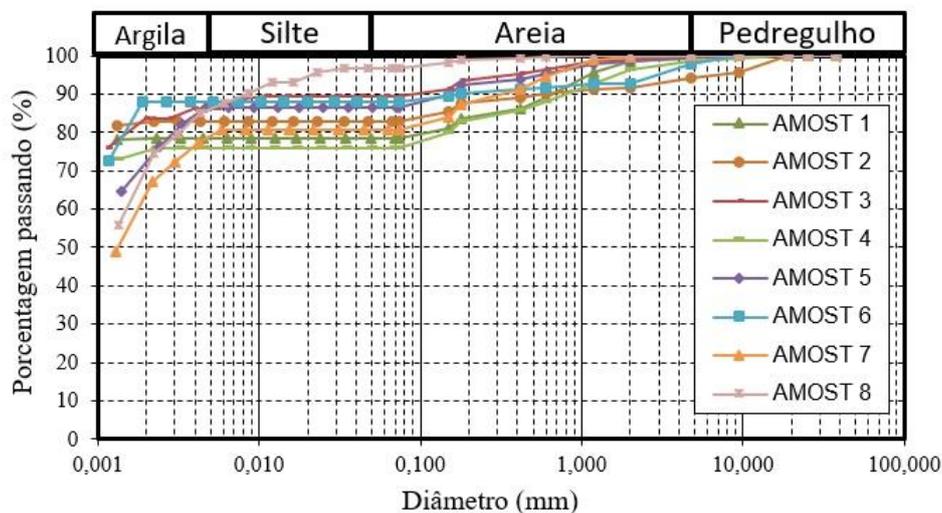
4 RESULTADOS E ANÁLISES

Neste Capítulo são analisados inicialmente os resultados dos ensaios obtidos com a coleta de dados e da execução do aterro experimental correspondentes a primeira e segunda etapa da pesquisa. Posteriormente são apresentados os resultados e análises dos ensaios de laboratórios realizados no solo de Ipojuca-PE, na areia e nas misturas desse solo com a areia coletada no leito do Rio Ipojuca.

4.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA, AVALIAÇÃO DA EXPANSIVIDADE DA ARGILA EXPANSIVA DE IPOJUCA-PE E DA CAMADA DO ATERRO EXPERIMENTAL

A Figura 21 apresenta a distribuição dos grãos dos solos e a Tabela 6 apresenta os percentuais das frações dos solos, os limites de consistência, o peso específico aparente seco máximo, a umidade ótima, a Expansão “Livre” com sobrecarga de 7 kPa e a Tensão de Expansão após consolidação de uma tensão de 40 kPa.

FIGURA 21 - Curvas granulométricas do solo expansivo de Ipojuca - PE.



FONTE: Autor.

A Tabela 6 apresenta também os resultados dos ensaios de Expansão “Livre” em oito amostras do solo expansivo de Ipojuca-PE com sobrecarga equivalente de 7 kPa, com sobrecarga de 40 kPa e Tensão de Expansão após ser consolidada com sobrecarga equivalente a 40 kPa; simulando o uso do solo expansivo sob um aterro compactado com material não expansivo de 2,0 m de altura compactado na umidade ótima e peso específico

aparente de 2,0 kN/m³ constituindo assim uma camada impermeável para evitar o contato de águas com o solo expansivo. Considerando o critério de Seed et al., (1962) para Expansão “Livre” com sobrecarga de 7 kPa a argila é classificada de alta a muito alta expansividade. Considerando os valores da Tensão de Expansão obtidos com uma tensão de 40 kPa aplicada previamente e o critério de Jimenez Salas (1980) os danos causados nas edificações variam de pequenas fissuras para as amostras 1 e 4 (tensão de expansão entre 20 kPa e 50 kPa), fissuras importantes para a amostra 7 (tensão de expansão entre 50 kPa e 100 kPa), danos graves para as amostras 2 e 8 (tensão de expansão entre 100 kPa e 200 kPa), e requerendo demolição para as amostras 3,5 e 6 (tensão de expansão maior que 200 kPa).

TABELA 6 - Caracterização do solo expansivo de Ipojuca – PE correspondente a primeira etapa da pesquisa.

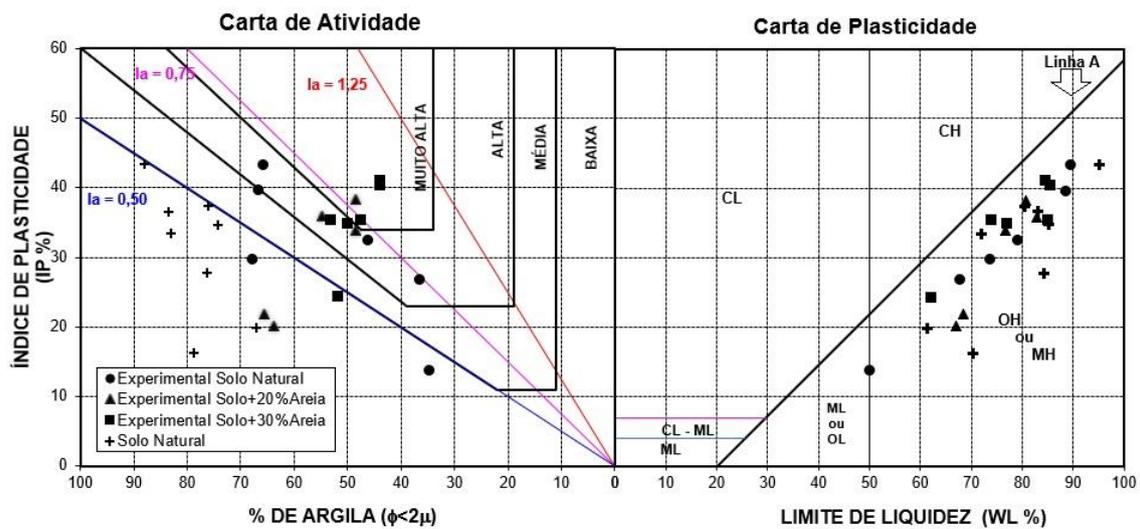
Amostra	Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)	Pedreg. (%)	WL (%)	IP (%)	$\lambda_{\Delta_{\text{máx.}}}$ (kN/m ³)	W _{otm} (%)	Exp. “livre” (%) 7 kPa	Exp. c/ 40 kPa (%)	Tensão c/ 40 kPa (kPa)
1	78,7	0,0	20,7	0,7	70	16	13,47	32,3	11,8	0,5	25,0
2	83,0	0,0	11,3	5,7	72	33	13,00	31,8	17,6	2,3	133,3
3	86,2	3,3	10,2	0,2	83	37	13,94	32,6	28,6	10,6	383,3
4	76,0	0,0	22,7	1,3	81	37	14,43	27,1	13,7	0,8	25,0
5	86,4	0,0	13,3	0,3	84	28	12,70	27,3	43,1	16,3	350,0
6	87,9	0,0	9,9	2,2	95	43	13,53	33,7	20,2	8,8	316,7
7	80,7	0,0	19,4	0,0	61	20	15,10	28,9	12,1	1,2	75,0
8	87,8	9,1	3,2	0,0	85	35	13,17	33,4	16,7	3,6	133,3
DESVIO P.	4,5	3,3	6,6	1,9	10,6	9,2	0,8	2,7	10,6	5,8	147,5
MÉDIA	83,3	1,6	13,8	1,3	79	31	13,67	31,0	20,5	5,5	180,2

FONTE: Autor

O solo expansivo é predominantemente argiloso com fração de argila maior do que 78%, com baixo teor de silte e a fração areia varia de 3,20% a 22,7%. O índice de plasticidade é alto variando de 16% a 37%, a umidade ótima é elevada (27,1% a 33,7%) e peso específico aparente seco máximo varia de 12,70 kN/m³ a 15,10 kN/m³.

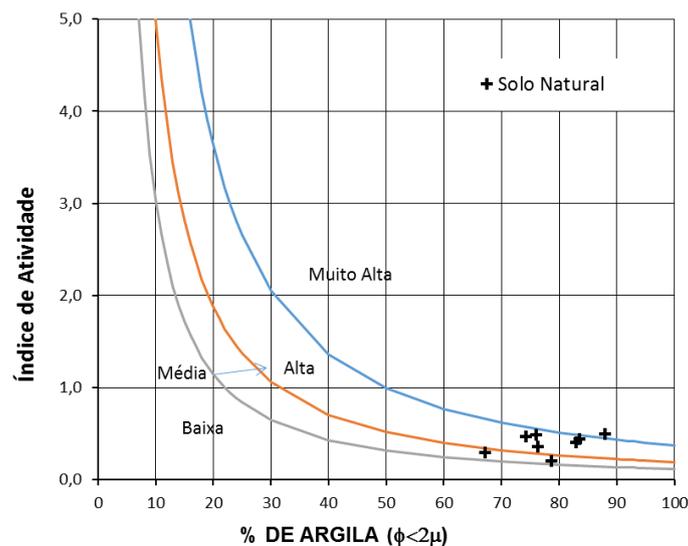
Na Carta de Plasticidade (Figura 22) a relação entre LL e IP está situada abaixo da linha A como solos orgânicos. Isto não é frequente ser encontrado em solos expansivos, normalmente estão situadas acima da linha A. Situação semelhante foi encontrada por Ayala Carcedo et al., (1986) na argila de Madri. O potencial de expansão da argila de Ipojuca varia de baixo a alto pelos critérios de Van der Merwe (1964), inativo a normalmente ativo pelo critério de Skempton (1953), Figura 22, e variando de médio a muito alto pelos critérios de Seed(1962) Figura 23.

FIGURA 22 - Carta de Atividade e Plasticidade em solo natural e misturas.



FONTE: Autor

FIGURA 23 - Critério de classificação de Seed et al., (1962).



FONTE: Autor

Não há uma grande variação na distribuição granulométrica nas amostras do solo expansivo de Ipojuca (considerado na primeira etapa) apresentando alto percentual de argila ($> 76\%$) e alta plasticidade. Entretanto existe uma grande variação na Tensão de Expansão (25 a 383 kPa mesmo com uma sobrecarga equivalente a 40 kPa). Isto pode ser explicado pelo fato dessas amostras terem sido coletadas em áreas de cortes com grande variação de altura, indicando solos com diferentes graus de intemperismo e com argilominerais com diferentes graus de evolução.

A Tabela 7, apresentada os resultados da caracterização física e mecânica do solo e das misturas desse solo com 20% e 30% de areia, utilizado na camada do aterro experimental. O solo expansivo de Ipojuca-PE utilizado foi proveniente de uma jazida de corte retirado por escavadeiras hidráulicas e transportados por caminhão tipo basculantes e homogeneizado com motoniveladora e trator de grade. A fração de finos é elevada, o material possui resultados de umidade ótima elevada e baixíssimos Índice de Suporte Califórnia. Verifica-se uma maior heterogeneidade da granulometria do solo quando comparada com os resultados das oito amostras apresentados anteriormente.

TABELA 7 - Caracterização de aterro experimental com uso de solo-areia.

	Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)	Pedr (%)	WL (%)	IP (%)	□□ _{máx.} (kN/m ³)	W _{om} (%)	I.S.C. (%)	Exp. CBR (%)	"Exp. Livre" 7 kPa (%)	Tensão de exp. (kPa)
SOLO NATURAL	87,1	8,1	4,8	0,0	74	30	14,20	30,4	3,5	8,1		
	62,8	19,2	17,9	0,2	79	32	14,24	28,1	4,2	8,1		
	52,8	13,8	33,3	0,1	68	27	14,67	23,4	4,7	4,9		
	57,3	24,4	18,3	0,0	50	14	14,08	24,3	6,9	6,6		
	78,5	5,4	16,0	0,0	90	43	15,96	22,6	4,9	6,0	29,5*	233*
	81,8	0,4	17,6	0,2	89	40	15,99	27,8	4,5	6,0	30,4**	258**
MÉDIA	70,1	11,9	18,0	0,1	75	31	14,86	26,1	4,8	6,6	30,0	245
80% SOLO 20% AREIA	65,7	0,0	34,3	0,0	69	22	15,96	22,6	6,8	7,0	22,6	
	67,7	2,8	29,3	0,1	83	36	16,01	25,6	6,0	5,7	20,5	
	62,7	15,7	21,6	0,0	77	34	15,43	21,5	3,2	6,5	23,6	
	63,7	0,0	36,2	0,0	67	20	16,48	23,8	5,6	4,8	23,4*	150*
	60,4	9,6	29,0	0,9	81	38	16,30	22,6	9,8	5,0	18,8**	198**
MÉDIA	64,1	5,6	30,1	0,2	75	30	16,04	23,2	6,3	5,8	21,8	174
70% SOLO 30% AREIA	54,9	6,7	38,3	0,0	85	35	15,50	20,5	7,1	4,8		
	53,0	0,0	46,9	0,1	74	35	15,24	21,6	5,8	5,2		
	59,7	3,7	36,2	0,4	62	24	16,18	21,4	5,1	4,2		
	53,3	8,2	38,4	0,0	86	40	16,50	21,8	7,1	4,7		
	53,3	6,5	40,2	0,0	85	41	16,70	20,4	8,3	4,9	23,3*	72*
	54,8	5,6	39,6	0,0	77	35	15,84	22,6	4,2	9,8	18,9**	125**
MÉDIA	54,9	5,1	39,9	0,1	78	35	15,99	21,4	6,3	5,6	21,1	98

*Amostra 1 ** Amostra 2

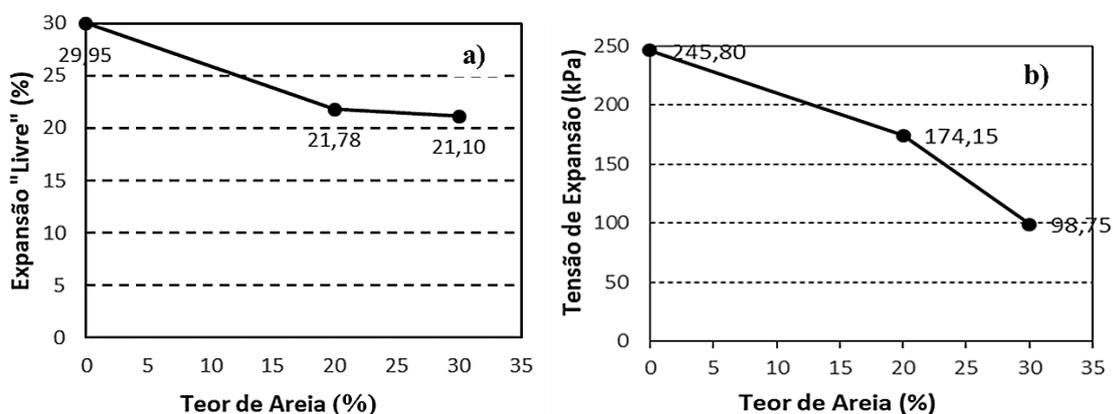
FONTE: Autor

A adição da areia ao solo natural diminuiu a porcentagem de argila, aumentou em média a de silte e areia, como era de se esperar pela própria elaboração da mistura. Em termos de valores médios, os valores dos limites de consistência praticamente não foram alterados com a adição da areia. A adição de areia (material inerte) não modifica a plasticidade da mistura, não altera o argilomineral apenas reduz a quantidade da fração argila que contém os argilominerais. Como há uma redução da fração argila do solo

natural comparada com do solo misturado com areia nas proporções de 20% e 30% e o limite de plasticidade teve pequena variação. As misturas possuem umidade ótima elevada e baixíssimos Índice de Suporte Califórnia.

Os valores médios da Expansão “Livre” (Figura 24A) e da Tensão de Expansão (Figura 24B) obtidos a partir das amostras coletadas das três faixas do aterro experimental que há redução da expansividade a medida que a porcentagem de areia cresce. A Expansão “Livre” do solo expansivo compactado é 29,95% e quando misturado com 30% de areia o valor diminui para 21,10%. A Tensão de Expansão do solo expansivo compactado é 245 kPa com a adição de 20% de areia passa a ser 174 kPa e com a adição de 30% de areia é 99 kPa com uma redução de 43%. Mesmo com a adição de 30% de areia ao solo expansivo de Ipojuca-PE a Expansão “Livre” é alta pelo critério de Cuellar (1978) e a Tensão de Expansão pode causar fissuras importantes nas edificações segundo Jimenez Salas (1980).

FIGURA 24 - Variação de Expansão “Livre” (A) e Tensão de Expansão (B) com acréscimo do teor de areia.



FONTE: Autor

4.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA, QUÍMICA E DA EXPANSIVIDADE DA ARGILA DE IPOJUCA-PE E DAS MISTURAS COM AREIA – TERCEIRA ETAPA

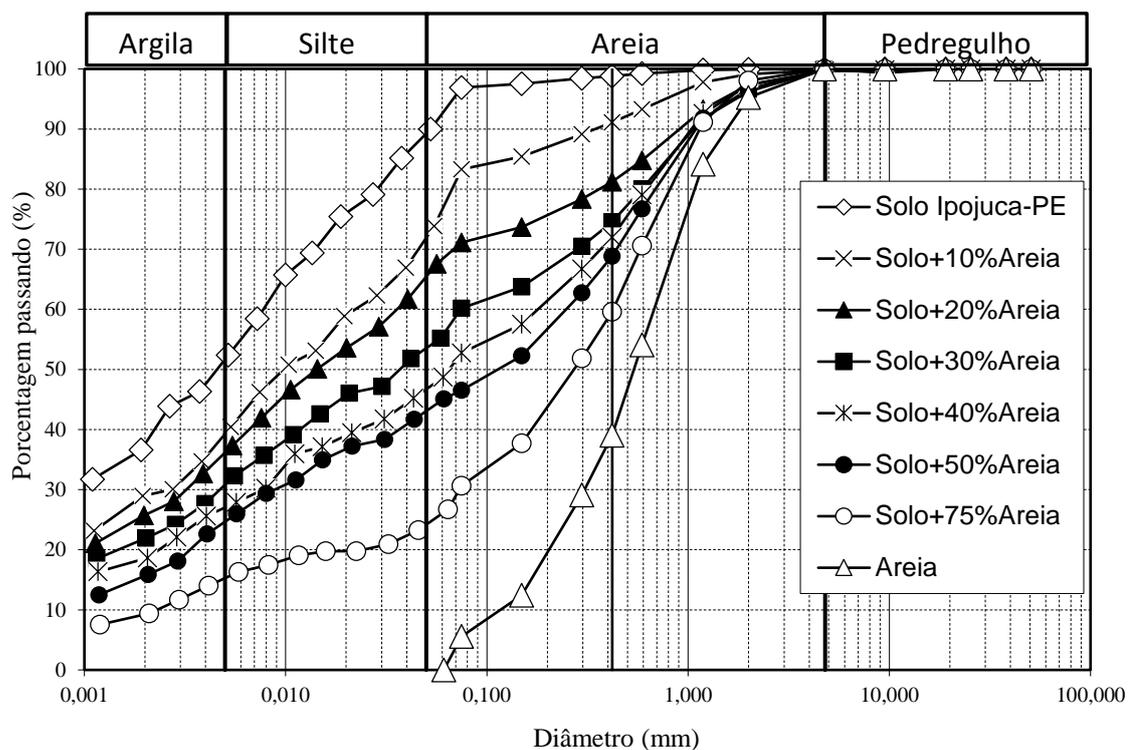
São apresentados e analisados os resultados dos ensaios de caracterização Física, Química e da Expansividade da argila compactada de Ipojuca-PE e de suas misturas com a areia nas proporções, em peso, de 10%, 20%, 30%, 40%, 50% e 75% realizados na

terceira etapa da pesquisa. Em cada análise era abordado inicialmente os solos (argila expansiva de Ipojuca-PE e a areia) e posteriormente as misturas.

4.2.1 Granulometria e limites de Atterberg

A Figura 25 apresenta as curvas granulométricas da argila expansiva, da areia e das misturas e o Quadro 4 apresenta as porcentagens das frações constituintes dos solos e das misturas, os valores dos limites de consistência, da relação silte/argila e da atividade segundo Skempton (1953). A Figura 26 as Cartas de Plasticidade e Atividade com as indicações dos solos e das misturas.

FIGURA 25 - Curva granulométrica solo, areia e solo-areia.



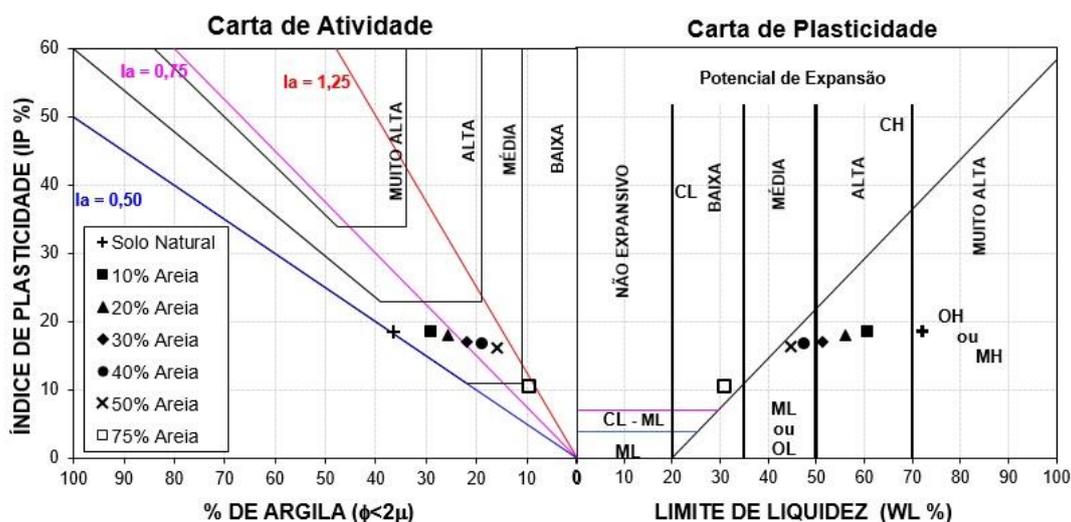
FONTE: Autor

QUADRO 4 - Ensaio de caracterização física.

Caracterização Física	Solo	Areia	Solo expansivo - Areia (%)					
			90-10	80-20	70-30	60-40	50-50	25-75
Pedregulho (%)	0	0	0	0	0	0	0	0
Areia (%)	10	100	26	32	45	51	55	74
Silte (%)	38	0	33	30	24	21	19	10
Argila (%)	52	0	40	37	31	28	26	16
Relação Silte/Argila	0,72	0,00	0,83	0,81	0,77	0,75	0,73	0,64
% < 0,002 mm	37	0	29	26	22	19	16	9
Lim. Liquidez (WL) (%)	72	-	61	56	51	48	45	31
Lim. Plasticidade (WP) (%)	53	-	42	38	34	31	29	21
Índ. de Plasticidade (IP) (%)	19	-	18	18	17	17	16	10
Índice de Atividade (Ia) (%)	0,51	-	0,64	0,70	0,78	0,89	1,03	1,11
Classificação SUCS	MH	SM	MH	MH	MH	SM	SM	SM

FONTE: Autor

FIGURA 26 - Carta de Plasticidade e Atividade em solo natural e misturas solo-areia.

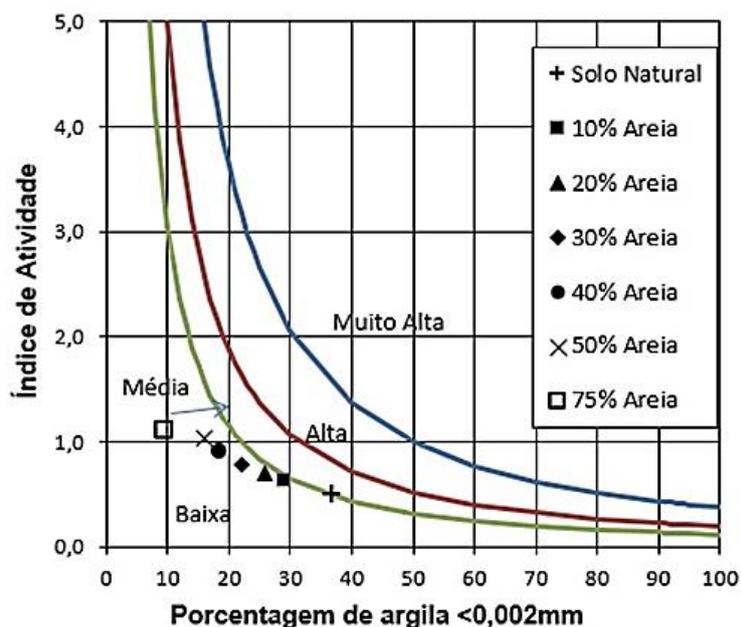


FONTE: Autor

O solo expansivo de Ipojuca-PE ensaiado e analisado nessa etapa (terceira) é constituído por 52% de argila, 33% de silte, 15% de areia, não possui pedregulho e a fração menor do que 0,002 mm é 37%. Tem menos argila e mais silte do que as amostras dos solos de Ipojuca-PE analisados na primeira e segunda etapa evidenciando a heterogeneidade do solo e do local de coleta da amostra. De acordo com Chen (1988) a maioria dos solos expansivos têm alto percentual de partículas com dimensão menor que 0,074 mm. A argila expansiva de Ipojuca-PE aqui analisada tem 92% de partículas < 0,075mm e as argilas de Ipojuca-PE analisadas por Paiva (2016) e Lima (2014) apresentaram respectivamente, 80% e 82%.

Possui alta plasticidade ($IP > 15\%$), Atividade média ($0,5 < I_a < 1,25$) potencial expansivo muito alto segundo Daksanamvrthy e Raman (1973) e médio segundo o critério de Seed et al (1962)(Figura 27), embora o solo expansivo de Ipojuca tenha 52% de argila é identificado como um silte de alta compressibilidade (MH) no Sistema de Classificação Unificado de Solos (USCS).

FIGURA 27 - Critérios de Seed (1962) para o solo de Ipojuca-PE



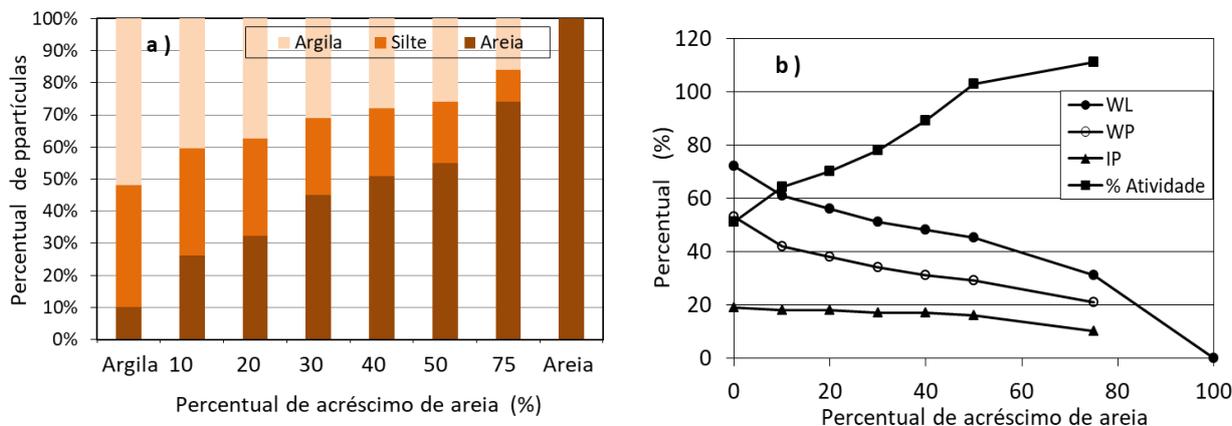
FONTE: Autor

A areia do leito do Rio Ipojuca é mal graduada (SP) no Sistema de Classificação Unificado de Solos (USCS) não líquida e não plástica.

A adição de areia (10%, 20%, 30%, 40%, 50% e 75%) ao solo expansivo de Ipojuca-PE, como era de se esperar, causa uma redução da fração fina das misturas. A fração argila decresce de 52% para 16%, a fração silte decresce de 38% para 10% e a fração areia cresce de 10% para 74%, Figura 28a. A relação silte/argila nas misturas é maior do que na argila de Ipojuca-PE até o incremento de 50% de areia e apresenta um valor máximo (0,83) para a adição de 10% do acréscimo de areia, Quadro 4.

A adição de areia (10%, 20%, 30%, 40%, 50% e 75%) ao solo expansivo de Ipojuca-PE causou nas misturas redução nos valores dos Limites de Liquidez (WL) e Plasticidade (WP) e pequena variação nos valores do Índice de Plasticidade (diferença máxima 3%) e em decorrência a Atividade expressa em percentual ($I_a = 100 IP / \% < 0,002 \text{ mm}$) cresce, Figura 28b.

FIGURA 28 - Influência da adição de areia na granulometria do solo expansivo de Ipojuca, a) no percentual das partículas e b) nos limites de consistência.



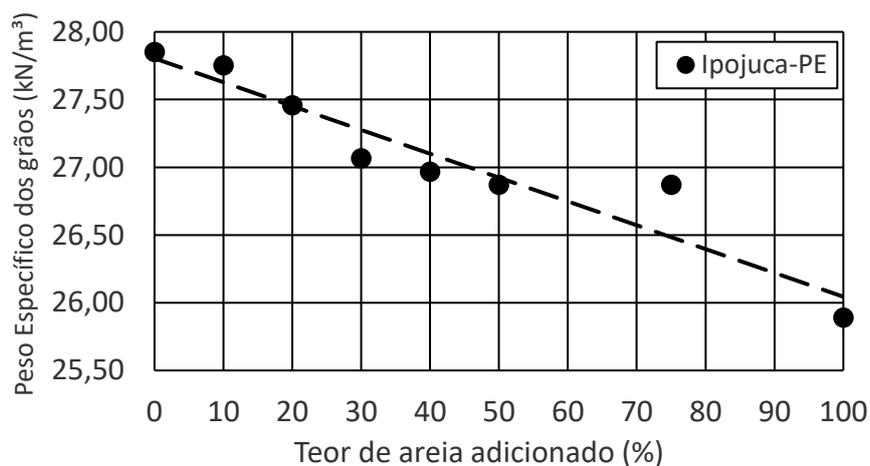
FONTE: Autor

As misturas apresentam alta plasticidade ($IP > 15\%$), Atividade média ($0,5 < I_a < 1,25$), potencial expansivo é alto para acréscimo de 10%, 20% 30% de areia, é médio para acréscimo de 40% e 50% e baixo para acréscimo de 75% segundo o critério de Daksanamvrthy e Raman (1973), Figura 26. O potencial expansivo é baixo segundo o critério de Seed (1962), Figura 27.

A Classificação Unificado de Solos (USCS) das misturas com adição de 10%, 20%, 30% é a mesma do solo expansivo de Ipojuca-PE (Silte de alta compressibilidade - MH). E ao adicionar-se 40%, 50% e 75% a classificação passa a ser areia mal graduada (SM) que é a mesma classificação da areia coletada do leito do Rio Ipojuca, Quadro 4.

4.2.2 Peso específico real dos grãos

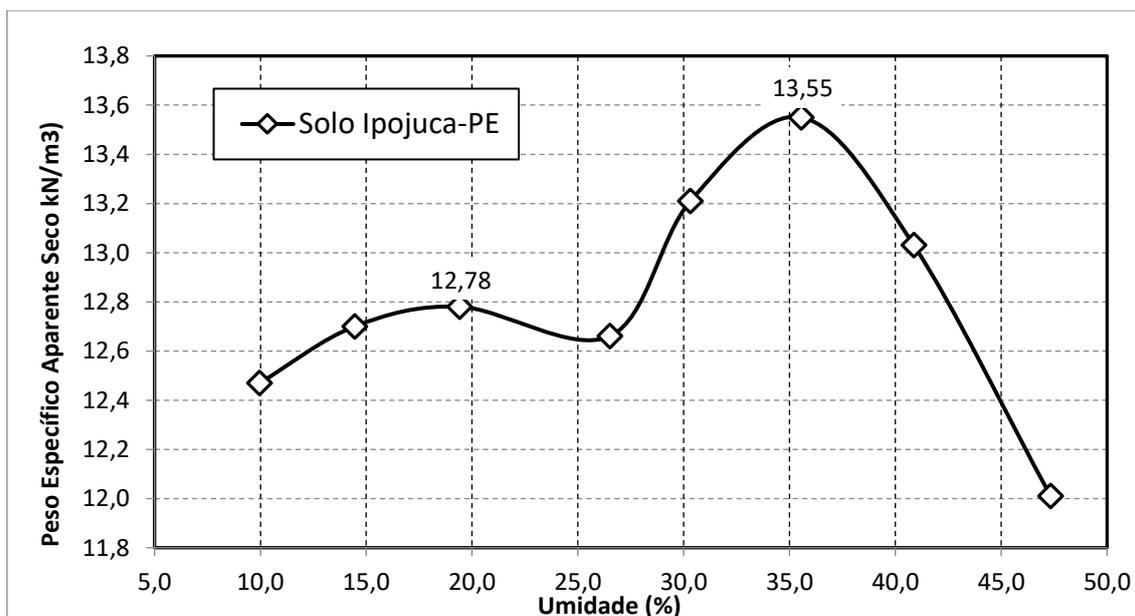
Os valores dos Pesos Específicos Real dos Grãos obtidos pelo método do picnômetro para a argila expansiva e para a areia são respectivamente $28,85 \text{ kN/m}^3$ e $26,00 \text{ kN/m}^3$, Figura 29 apresenta os resultados do solo natural e das misturas solo-areia. Verifica-se que o valor do peso específico da argila expansiva de Ipojuca – PE é elevado, podendo ser justificado quando analisado a Tabela 10, onde é possível verificar que o solo de Ipojuca-PE é rico em óxidos de ferro enquanto que a areia utilizada é quase ausente a presença destes óxidos. Assim ao adicionar da areia ao solo diminui o Pesos Específicos Real dos Grãos.

FIGURA 29 - Peso Específico Real dos Grãos.

FONTE: Autor

4.2.3 Compactação

A curva de compactação da argila expansiva de Ipojuca-PE é apresentada na Figura 30. A forma da curva é de duplo pico, sendo o primeiro com peso específico aparente seco máximo ($\gamma_{d\text{máx.}}$) 12,78 kN/m³ e à umidade ótima (W_{otm}) de 18,00% e o segundo pico com peso específico aparente seco máximo ($\gamma_{d\text{máx.}}$) 13,55 kN/m³ e à umidade ótima (W_{ot}) de 36,00%.

FIGURA 30 - Curva de compactação do solo de Ipojuca-PE.

FONTE: Autor

O duplo pico na curva de compactação é do tipo I, segundo a classificação de Maccarini et al. (1991) e do tipo C, por Lee e Suedkamp (1972). De acordo com esses autores, o formato da curva de compactação com pico duplo é encontrado em solos onde o limite de liquidez varia entre 30 e 70%, muito coesivo e possuem argilomineral montmorilonita. Este solo apresenta alta coesão em período seco, apresenta argilomineral do tipo 2:1 e Limite de Liquidez 72% embora um pouco acima da faixa sugerida Lee e Suedkamp (1972) apresenta duplo pico.

Ao comparar os resultados dos estudos realizados por Lima (2014) e Paiva (2016), nas argilas expansivas de Ipojuca-PE, nota-se que o mesmo ocorreu, duplo pico, mas os valores de peso específico aparente seco e umidade ótima relativamente próximos. No Quadro 5 apresenta os resultados obtidos nos três estudos. Devido aos resultados obtidos (duas umidades para picos de peso específicos maiores) decidiu-se realizar ensaios para avaliar de tensão de expansão tanto na umidade ótima (segundo pico) quanto na umidade correspondente ao primeiro pico, aproximadamente 50% da umidade ótima (Item 8). Nas misturas só foram realizados ensaios nas umidades ótimas das misturas (por só ter um único pico com curva de compactação em formato de sino).

De acordo com Paiva (2016), a presença de pico duplo é explicada pelo fato de quando se adiciona uma pequena quantidade de água ao solo seco ao ar e se homogeneizar, a água apenas molha a extremidade do grumo e a energia da compactação não é suficiente para separar as partículas dos grumos devido à alta resistência do solo seco. Comportamento semelhante também foi encontrado por Ferreira (1995) e Ferreira et al. (2012) em solos expansivos de Ipojuca, Paulista e Petrolândia, em Pernambuco.

QUADRO 5 - Picos de compactação de três estudos do solo de Ipojuca – PE

		Lima (2014)	Paiva (2016)	Autor (2017)
	WL (%)	81	81	72
1º pico	$\gamma_{dm\acute{a}x.}$ (kN/m³)	13,69	13,19	12,78
	W_{ot.} (%)	19,30	18,30	18,00
2º pico	$\gamma_{dm\acute{a}x.}$ (kN/m³)	13,45	12,40	13,55
	W_{ot.} (%)	25,78	38,00	36,00

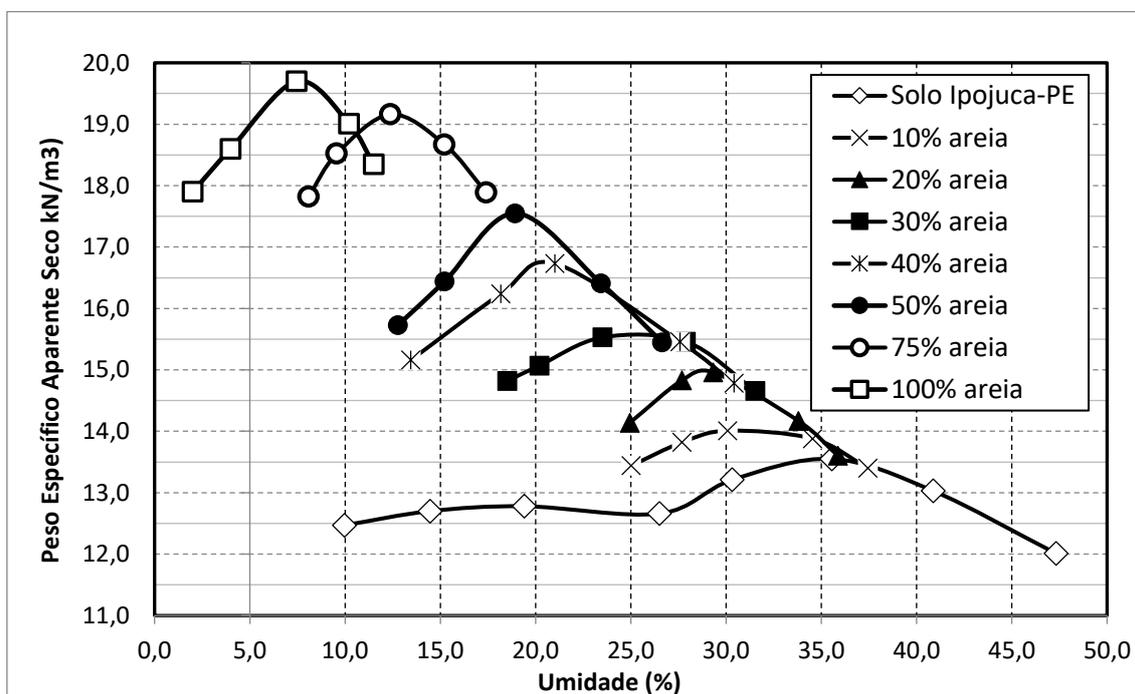
FONTE: Autor

A Figura 31 apresenta as curvas de compactações da argila expansiva, na areia e das misturas solo-areia. O peso específico aparente seco máximo da areia é muito superior ao

do solo expansivo de Ipojuca-PE. Para os teores de areia misturados ao solo expansivo, variando de 0 a 100% as umidades ótimas e os pesos específicos aparentes secos máximos variam, respectivamente, de 36,00% a 7,46% e 13,55 a 19,70 kN/m³, Figura 32. Com a adição de areia no solo expansivo a mistura passa a ter grãos de maiores dimensões, reduz superfície específica, a umidade ótima cai e aumenta o peso específico seco máximo.

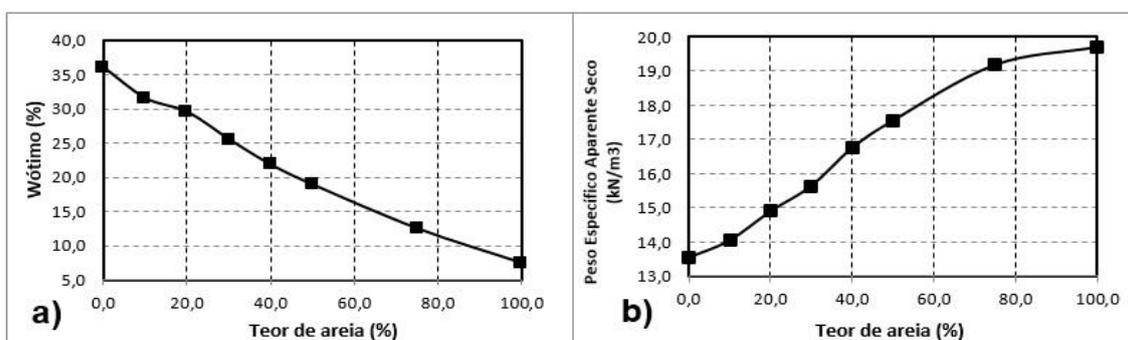
Solos com valores elevados de peso específico aparente seco possuem relação direta com baixo potencial expansivo. Isto porque os argilominerais existentes em um solo expansivo possuem baixa densidade.

FIGURA 31 - Curva de compactação dos solos e das misturas solo expansivo-areia.



FONTE: Autor

FIGURA 32 - a) Comportamento da umidade ótima com a variação do teor de areia no solo e b) Comportamento do peso específico seco máximo com a variação do teor de areia no solo.



FONTE: Autor

4.2.4 Caracterização química

A Tabela 8 apresenta os resultados dos ensaios de caracterização Química do solo de Ipojuca-PE, da areia do leito do Rio Ipojuca e da misturas solo-areia. Valores calculados: da Soma das Bases (S); da Capacidade de Troca Catiônica (CTC); do Grau de Saturação por Bases (V); da Saturação por Alumínio (m) e da Saturação por Sódio (n).

A argila expansiva de Ipojuca-PE apresenta pH em água fortemente ácido ($4,3 < \text{pH} < 4,4$) e extremamente ácido em KCl e CaCl₂ ($\text{pH} < 4,3$) segundo Guimarães (2002).

Apresenta uma Capacidade de Troca Catiônica (CTC) de 40,90 cmolc/kg, indicando alta atividade ($\text{CTC} > 27$ cmolc/kg). A Saturação por Base (35,45%) é inferior a 50%, indicando ser um solo distrófico (pouco fértil). A saturação por sódio (7,58%) está compreendida entre 6% e 15% caracterizando um solo Solódico e a condutividade elétrica é 100,70 μS , caracterizando uma salinidade alta.

A areia do leito do Rio Ipojuca-PE apresenta pH em água ácido ($4,5 < \text{pH} < 5,4$), levemente ácido ($6,0 < \text{pH} < 6,5$) em KCl e a neutro em CaCl₂ ($6,5 < \text{pH} < 7,0$) segundo Guimarães (2002). A Capacidade de Troca Catiônica (CTC) é 16,20 cmolc/kg, indicando baixa atividade ($\text{CTC} < 27$ cmolc/kg). A Saturação por Base (46,91%) é inferior a 50%, indicando solo distrófico (pouco fértil). A Saturação por sódio (19,14%) é maior do que 15% caracterizando um solo Sódico. A condutividade elétrica é 72,88 μS caracterizando uma salinidade alta.

A adição de areia do leito do Rio Ipojuca ao solo expansivo não modifica significativamente as características Químicas do solo expansivo de Ipojuca-PE. As misturas solo expansivo-areia são classificadas de fortemente ácida a ácida considerando o pH em água (Tabela 9). Os valores diferença de pH em KCl e em H₂O ($\Delta\text{pH} = \text{pH}_{\text{KCl}} - \text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$) são apresentados na Tabela 8, para Kiehl (1979). Um valor de ΔpH negativo indica a predominância de argilas silicatadas, enquanto que um ΔpH positivo está associado ao predomínio de óxidos de ferro e alumínio. O ΔpH também pode ser utilizado como indicador de atividade de balanço de cargas do sistema coloidal do solo, podendo apresentar valores próximos a zero, típicos de perfis em avançado estágio de intemperização e pedogênese.

TABELA 8 - Caracterização química do solo e misturas solo-areia de Ipojuca-PE.

Determinações	Unidade	Argila 100-0	Mistura solo expansivo - areia					Areia 0-100
			90-10	80-10	70-30	60-40	50-50	
pH _{H2O}	--	4,44	4,59	4,39	4,49	4,54	4,41	5,37
pH _{KCl}	--	3,63	3,65	3,66	3,63	3,67	3,81	6,51
pH _{CaCl2}	--	4,10	4,09	4,05	4,01	4,05	4,10	6,96
Carbono Orgânico	g/g	0,01	0,05	0,12	0,45	0,15	0,16	0,16
Matéria Orgânica	g/g	0,02	0,09	0,21	0,78	0,26	0,28	0,28
Condutividade Elétrica	μS	100,70	85,62	93,93	89,35	91,70	91,13	72,88
Sódio (Na ⁺)	cmol _c /kg	3,10	3,10	3,10	3,10	3,10	3,10	3,10
Potássio (K ⁺)	cmol _c /kg	2,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Cálcio (Ca ²⁺)	cmol _c /kg	8,40	3,50	5,40	3,50	7,30	2,40	3,40
Magnésio (Mg ²⁺)	cmol _c /kg	1,00	7,50	13,10	4,40	0,70	4,60	1,10
Alumínio (Al ³⁺)	cmol _c /kg	13,30	18,60	10,10	11,00	8,50	7,20	0,00
Hidrogênio (H ⁺)	cmol _c /kg	13,10	6,80	11,80	9,80	11,20	10,60	8,60
Soma de cátions (S)	cmol _c /kg	14,49	15,09	22,62	17,14	16,21	8,05	7,59
Capacidade Troca Cátions (T)	cmol _c /kg	40,90	40,50	43,50	31,80	30,80	27,90	16,20
Água no extrato saturação	%	90,0	78,2	71,2	64,2	59,2	49,8	29,8
Saturação de base V	%	35,45	37,28	49,66	34,59	36,04	36,20	46,91
Saturação de alumínio m	%	47,84	55,19	31,86	50,00	43,37	41,62	0,00
Saturação de Sódio n	%	7,58	7,65	7,13	9,75	10,06	11,11	19,14

$$V=100x S/T; m=100Al^{3+}/S+Al^{3+}; S=Na^{+}+K^{+}+Ca^{2+}+Mg^{2+}; T=S+Al^{3+}+H^{+}; n=100x Na^{+}/T$$

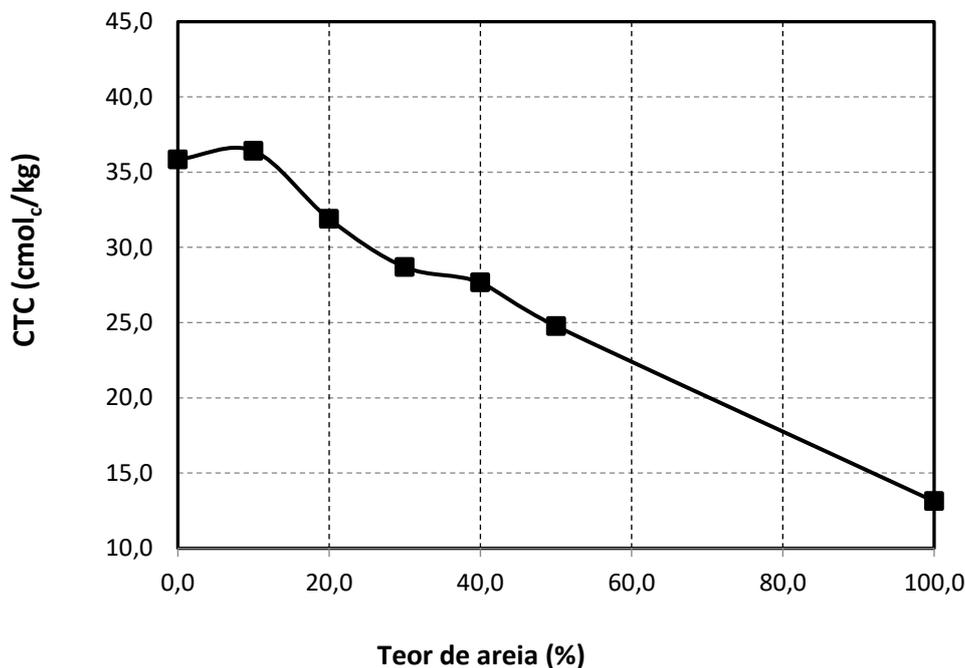
FONTE: Autor

TABELA 9 - Valores do pH

Amostras	pH _{H2O}	pH _{KCl}	pH _{CaCl2}	□Ph	Classificação em água
100% solo expansivo	4,4	3,63	4,10	-0,81	Fortemente Ácido
solo + 10% areia	4,5	3,65	4,09	-0,94	Fortemente Ácido
solo + 20% areia	4,4	3,66	4,05	-0,73	Fortemente Ácido
solo + 30% areia	4,5	3,63	4,01	-0,86	Ácido
solo + 40% areia	4,5	3,67	4,05	-0,87	Ácido
solo + 50% areia	4,4	3,81	4,10	-0,60	Fortemente Ácido
100% areia	5,4	6,51	6,96	1,14	Ácido

FONTE: Autor

As misturas apresentam Capacidade de Troca Catiônica (CTC) alta (CTC > 27 cmolc/kg). A CTC está relacionada à estabilidade do argilomineral. O acréscimo teor de areia ao solo expansivo de Ipojuca diminui CTC (Figura 33) exceto para acréscimo de 10% de areia. A Saturação por Base é inferior a 50%, sendo classificada como distrófico (pouco fértil). A Saturação por sódio está compreendida entre 6% e 15% caracterizando um solo solódico. A condutividade elétrica é alta caracterizando uma salinidade alta.

FIGURA 33 - Capacidade de troca catiônicas.

FONTE: Autor

A matéria orgânica do solo de Ipojuca-PE, obtida a partir do carbono orgânico é 0,02% e na areia é 0,28 utilizada nas misturas. Assim as misturas apresentam também baixo teor de matéria orgânica. Segundo Santos (2013) um solo é rico em matéria orgânica quando possui teor de matéria orgânica > 5%.

As determinações dos óxidos obtidas pelo método de Eflorescência de raio-X no solo expansivo de Ipojuca-PE, da areia do leito do Rio Ipojuca e das misturas solo expansivo-areia estão na Tabela 10. O óxido de silício (quartzo) prevalece sobre o óxido de alumínio e sobre o óxido de ferro. O óxido de silício presente no solo expansivo, ao ser misturado com os da areia, que possui duas vezes a quantidade desses óxidos em sua composição, somam-se elevando seu valor. Os óxidos de alumínio obtiveram redução de percentual, nas misturas com a adição do percentual de areia. O óxido de ferro sofre baixa redução porque areia utilizada tem baixo valor desse óxido.

TABELA 10 - Valores das porcentagens de óxidos e perda ao fogo no solo e misturas solo-areia.

Óxidos	Mistura solo-areia (%)						
	100-0	90-10	80-20	70-30	60-40	50-50	0-100
SiO₂	38,14	39,97	42,91	42,65	45,97	49,8	78,66
Al₂O₃	27,26	27,19	26,92	27,32	26,72	24,85	9,77
Fe₂O_{3t}	15,94	15,79	14,83	14,93	13,53	11,22	0,88
P.F	12,94	11,03	9,08	9,15	7,32	7,74	2,06
CaO	3,86	3,88	3,86	3,75	3,63	3,08	0,28
MgO	0,86	0,89	0,86	0,87	0,87	0,8	0,17
K₂O	0,24	0,35	0,57	0,52	0,87	1,32	5,68
P₂O₅	0,23	0,23	0,22	0,23	0,23	0,2	0,05
MnO	0,15	0,16	0,16	nd	0,13	0,11	0,02
SO₃	0,08	0,08	0,09	0,09	0,09	0,09	0,05
CaO	0,08	0,09	0,15	0,14	0,23	0,29	0,86
ZrO₂	0,06	0,06	0,05	0,06	0,05	0,05	0,03
CeO₂	0,05	0,06	nd	nd	nd	nd	nd
Cr₂O₃	0,03	0,03	0,03	0,04	nd	0,03	0,06
Co₂O₃	0,01	nd	nd	0,01	nd	tr	nd
NiO	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	nd
CuO	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	tr	nd
ZnO	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	tr
SrO	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03
Y₂O₃	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	nd
Nb₂O₅	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	nd
Total	99,99	99,87	99,8	99,83	99,71	99,64	98,6

nd = não detectado; tr = traço; valores em percentuais (%)

FONTE: Autor

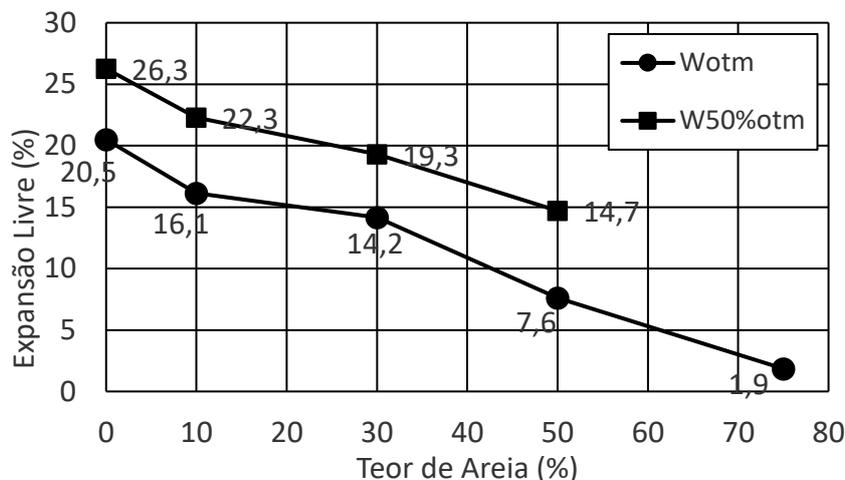
4.2.5 Caracterização mecânica - expansividade

São apresentados os resultados obtidos nos ensaios de Expansão “Livre” e Tensão de Expansão no solo expansivo de Ipojuca-PE e nas misturas solo expansivo-areia. Os ensaios foram realizados em corpos de prova moldados na umidade ótima e peso específico aparente seco máximo das misturas e na umidade que corresponde a 50% da umidade ótima do solo expansivo de Ipojuca –PE que corresponde ao primeiro pico na curva de compactação.

4.2.5.1 Expansão “Livre”

A Expansão “Livre” do solo ($EI = 100\Delta h / ho$) obtida a partir de odômetros convencionais com sobrecarga correspondente a tensão 7 kPa, é 26,3% quando moldado na umidade 50% da ótima e 20,5% quando moldado na umidade ótima (Figura 34). Pelo critério de Daksanamvrthy e Raman (1973), o solo de Ipojuca-PE possui potencial expansivo muito alto.

FIGURA 34 - Variação de expansão “livre” (sobrecarga equivalente a 7 kPa).



FONTE: Autor

Os resultados da Expansão “Livre” obtidos na umidade ótima são inferiores aos obtidos com unidade de 50% da umidade ótima ($W_{otm\ 50\%}$). Isto é devido ao fato de que o processo de expansão, devido à inundação inicia no o corpo de prova moldado na umidade ótima (W_{otm}), a uma umidade maior do que no corpo de prova com umidade correspondente a 50% da umidade ótima fazendo com que a absorção de água seja menor dos argilominerais. Quando os corpos são moldados a $W_{otm\ 50\%}$, o solo está com umidade menor do que na umidade ótima, deste modo, ao inundar o solo, a expansão ocorrerá com a maior absorção de água, ocorrendo maior expansão.

A adição de areia ao solo expansivo reduz a expansão do solo, Figura 34. A Expansão “Livre” é 1,9% para incremento de 75% de areia sendo classificada como média expansividade, segundo Cuellar (1978).

O Quadro 6 mostra os valores da Expansão “Livre” a 7 kPa no solo expansivo e das misturas solo expansivo-areia em amostras compactadas nas três etapas da pesquisa. Verifica-se a grande variação nos valores da Expansão “Livre” (11,80% a 43,10%) das

amostras de corte, evidenciando a dispersão estatística e heterogeneidade do solo. A areia ao ser adicionada ao solo expansivo reduz a “Expansão Livre” passa a ocupar fisicamente o lugar onde antes possuía fração de finos, ocorrendo redução da quantidade de argila e nenhuma transformação mineralógica.

QUADRO 6 - Expansão “Livre” a 7 kPa no solo expansivo e das misturas solo- areia em amostras compactadas.

Primeira etapa da pesquisa		Segunda etapa da pesquisa – Aterro		Terceira etapa da pesquisa – Aterro	
Amostra	Exp. “livre” (%) a 7 kPa	Amostra	Exp. “livre” (%) a 7 kPa	Amostra	Exp. “livre” (%) a 7 kPa
1	11,80	Argila	29,50*	Argila	20,5
2	17,60	Argila	30,40**	90% Argila + 10% Areia	16,10
3	28,60	80% Argila + 20 Areia	23,40*	70% Argila + 30% Areia	14,20
4	13,70	80% Argila + 20 Areia	18,80**	50% Argila + 50% Areia	7,60
5	43,10	70% Argila + 30% Areia	23,30*	25% Argila + 75% Areia	1,90
6	20,20	70% Argila + 30% Areia	18,90**	--	--
7	12,10	--	--	--	--
8	16,70	--	--	--	--

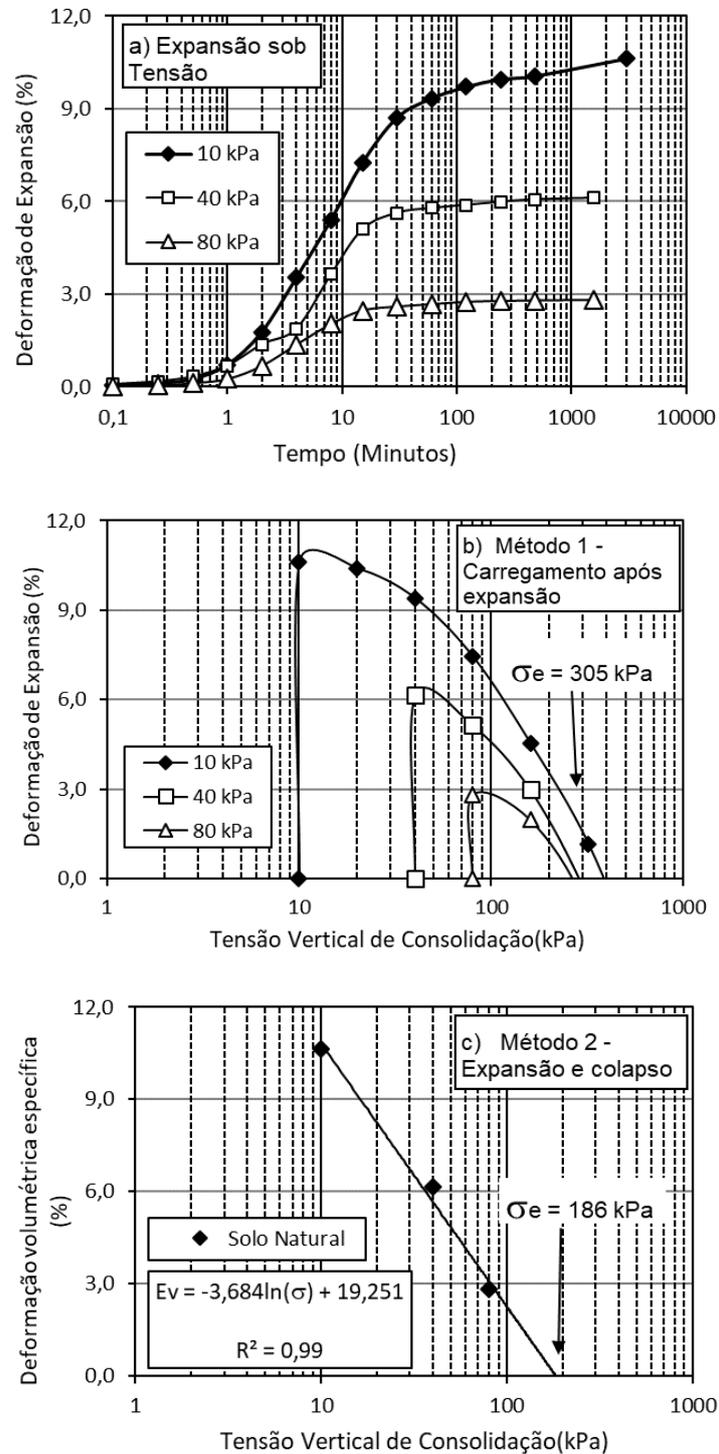
*Amostra 1, ** Amostra 2

FONTE: Autor.

4.2.5.2 Tensão de expansão

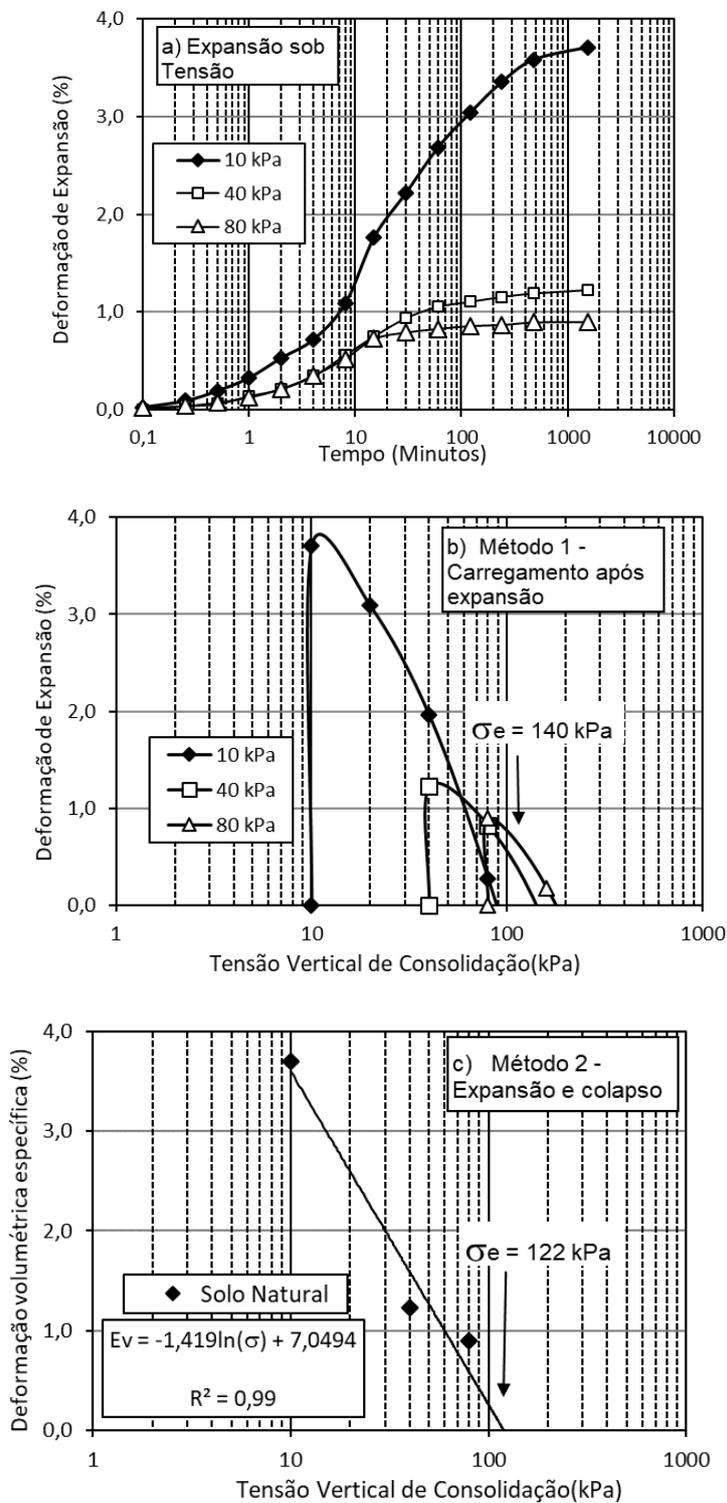
A Figura 35 apresenta os resultados dos ensaios realizados para avaliar a Tensão de Expansão pelos Método 1 – Carregamento após expansão com diferentes tensões verticais de consolidação e Método 2 – Expansão e colapso para a argila expansiva de Ipojuca – PE para amostras moldadas a 50% da umidade ótima ($W_{otm\ 50\%}$) e a Figura 36 para amostras moldadas na umidade ótima (W_{otm}).

FIGURA 35 - Métodos de tensão de expansão aplicados ao solo de Ipojuca- PE moldado a 50% umidade da ótima: a) Expansão sob tensão, b) Método 1 – Carregamento após expansão com diferentes tensões verticais de consolidação, c) Método 2 – Expansão e colapso sob tensão.



FONTE: Autor.

FIGURA 36 - Métodos de tensão de expansão aplicados ao solo de Ipojuca- PE moldado a umidade da ótima: a) Expansão sob tensão, b) Método 1 – Carregamento após expansão com diferentes tensões verticais de consolidação, c) Método 2 – Expansão e colapso sob tensão.



FONTE: Autor.

A Tabela 11 apresenta dos valores da Tensão de Expansão dos solos de Ipojuca-PE (amostras compactadas e indeformada), Petrolândia e Sevilha (Delgado, 1986) obtidas através dos métodos: Método 1 – Carregamento após expansão com diferentes tensões verticais de consolidação, Método 2 – Expansão e colapso sob tensão e a Método 3 - Volume constante. A diferença entre os métodos está relacionada a ordem seguida entre a aplicação de tensão e a inundação. A variação dos valores de tensões aplicadas ao solo utilizadas nos métodos leva a valores distintos da Tensão de Expansão.

TABELA 11 - Tensão de Expansão dos solos de Ipojuca

Método de Tensão de Expansão	Tensão de Expansão (kPa)				
	Ipojuca (W_{otm} 50%)	Ipojuca (W_{otm})	Ipojuca* Paiva (2016)	Petrolândia* Ferreira e Ferreira (2009)	Sevilha* Delgado (1986)
Carregamento após expansão com diferentes tensões verticais de consolidação	305	140	190	333	260
Expansão e colapso sob tensão	186	122	220	239	150
Volume constante	137,5	55,8	245	242	193
Média	209,5	105,9	218	271	201

*Em amostra indeformada

FONTE: Autor.

Os valores médios das Tensões de Expansão do solo expansivo de Ipojuca-PE compactado na umidade correspondente a 50% da umidade ótima, do solo de Ipojuca – PE (Paiva 2016), de Petrolina (Ferreira e Ferreira, 2009) e de Sevilha (1986) obtidos a partir de amostras indeformadas são maiores do que 200 kPa, podem causar danos nas edificações que levam a demolição pelo critério de Jimenez Salas (1980) e no solo de Ipojuca-PE compactado na umidade ótima causa danos graves as edificações (Tensão de Expansão ente 100 kPa e 200 kPa) pelo mesmo critério.

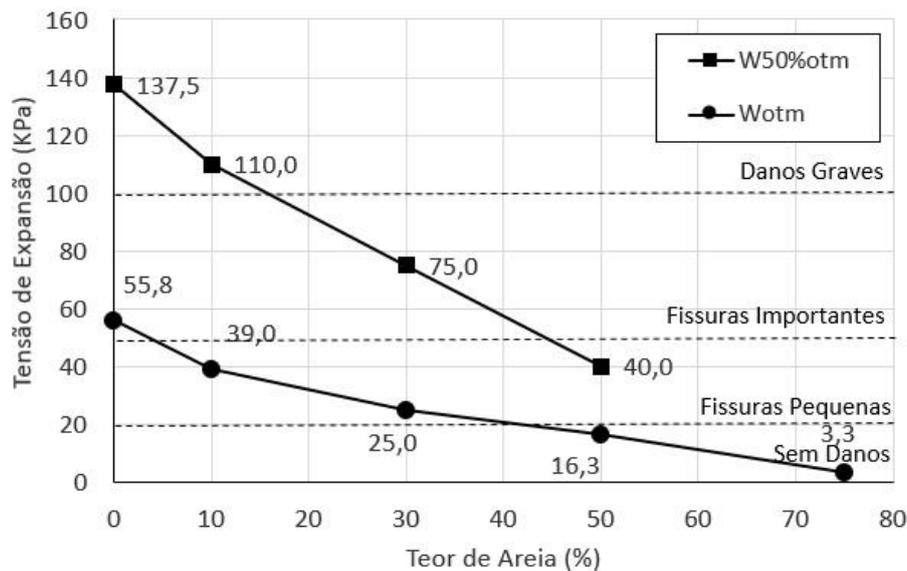
A Figura 37 apresenta a variação de Tensão de Expansão obtido pelo método a Volume Constante com o acréscimo do teor de areia. A Tensão de Expansão do solo expansivo de Ipojuca-PE moldado na umidade ótima foi de 55,8 kPa e quando moldado a 50% da umidade ótima o resultado foi de 137,5 kPa. A diferença está relacionada ao menor valor da sucção do solo quando compactado na umidade ótima em relação ao solo compactado na umidade correspondente a 50% da umidade ótima.

A Tensão de Expansão obtida no solo indeformado de Ipojuca-PE por Paiva (2016) pelo método a Volume Constante é 245 kPa. A Tensão de Expansão obtida no solo compactado na umidade ótima de Ipojuca-PE pelo método a Volume Constante é 55,80 kPa. Considerando o efeito da compactação há uma redução de 77% no valor da Tensão

de Expansão. O valor de 55,80 kPa da Tensão de Expansão ainda causa fissuras importantes nas edificações segundo o critério de Jimenez Salas (1980).

A adição de areia ao solo expansivo de Ipojuca – PE compactado causa redução na Tensão de Expansão (Figura 37). Ao se adicionar 50% de areia a Tensão de Expansão é 16,30 kPa, inferior a 20 kPa, valor que não causa danos às edificações segundo o critério de Jimenez Salas (1980).

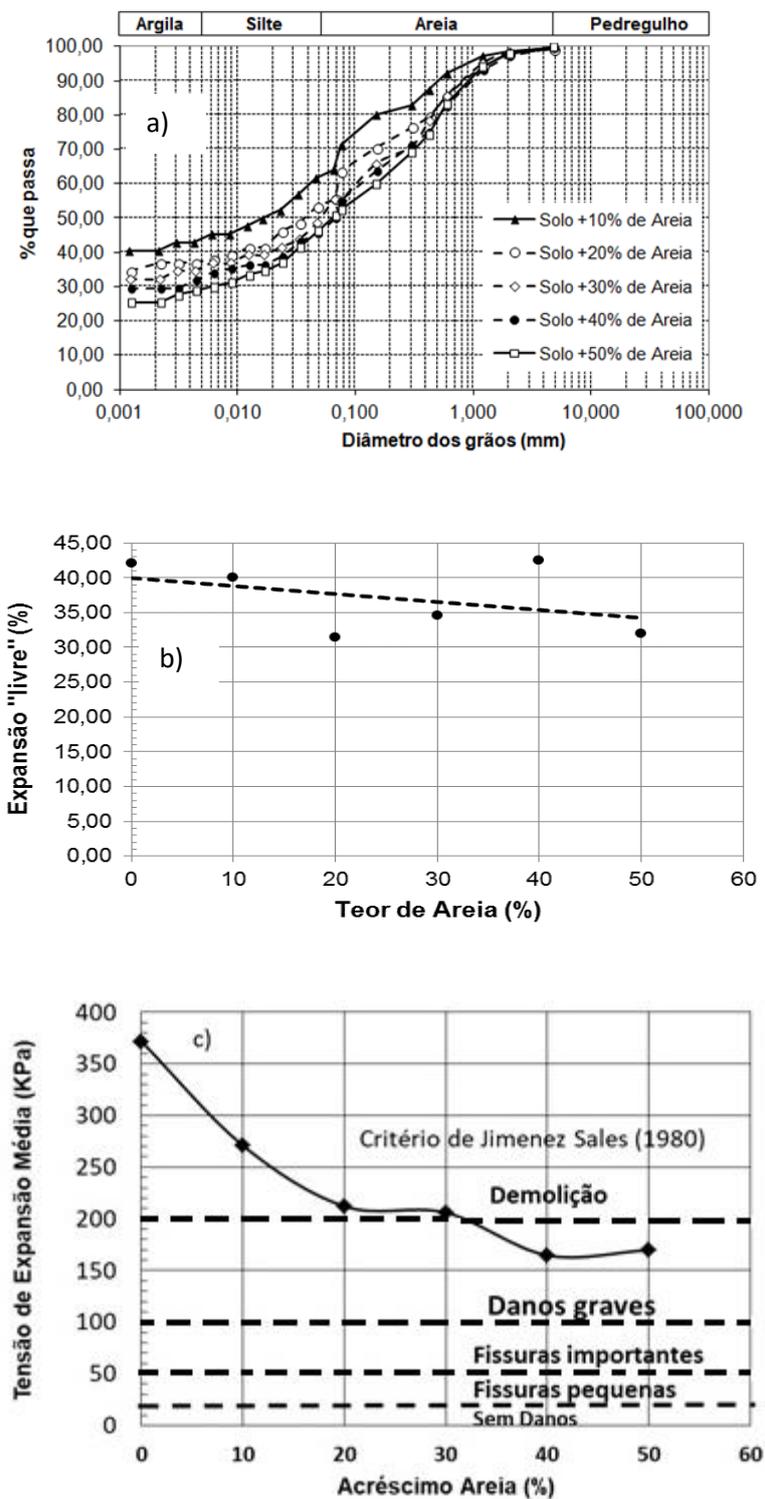
FIGURA 37 - Variação de tensão de expansão com o teor de areia.



FONTE: Autor.

Cavalcanti (2017) avaliou a influência da adição do teor de areia ao solo expansivo de Paulista-PE com acréscimo de 10%, 20%, 30%, 40% e 50% da areia do leito do rio Ipojuca. O solo de Paulista-PE é constituído por uma interestratificação irregular de minerais do tipo 2:1 de Mica e expansivos (Esmectita e Vermiculitas) com presença de Caulinita, apresenta alta expansividade, podendo causar danos às edificações que levam a demolição. A Figura 38 mostra a influência da adição da areia na granulometria, na Expansão Livre e na Tensão de Expansão no solo expansivo de Paulista. Cavalcanti (2017) conclui que a adição da areia ao solo expansivo nos teores adotados melhorou as propriedades físicas e mecânicas, porém nenhuma das misturas de solo-areia conseguiu reduzir a tensão de expansão da argila à valores inferiores a 20 kPa (sem danos às edificações).

FIGURA 38 - Gráficos: a) curvas granulométricas, b) expansão “livre” e c) tensão de expansão no solo expansivos de Paulista-PE e das misturas com areia.



FONTE: CAVALCANTI (2017)

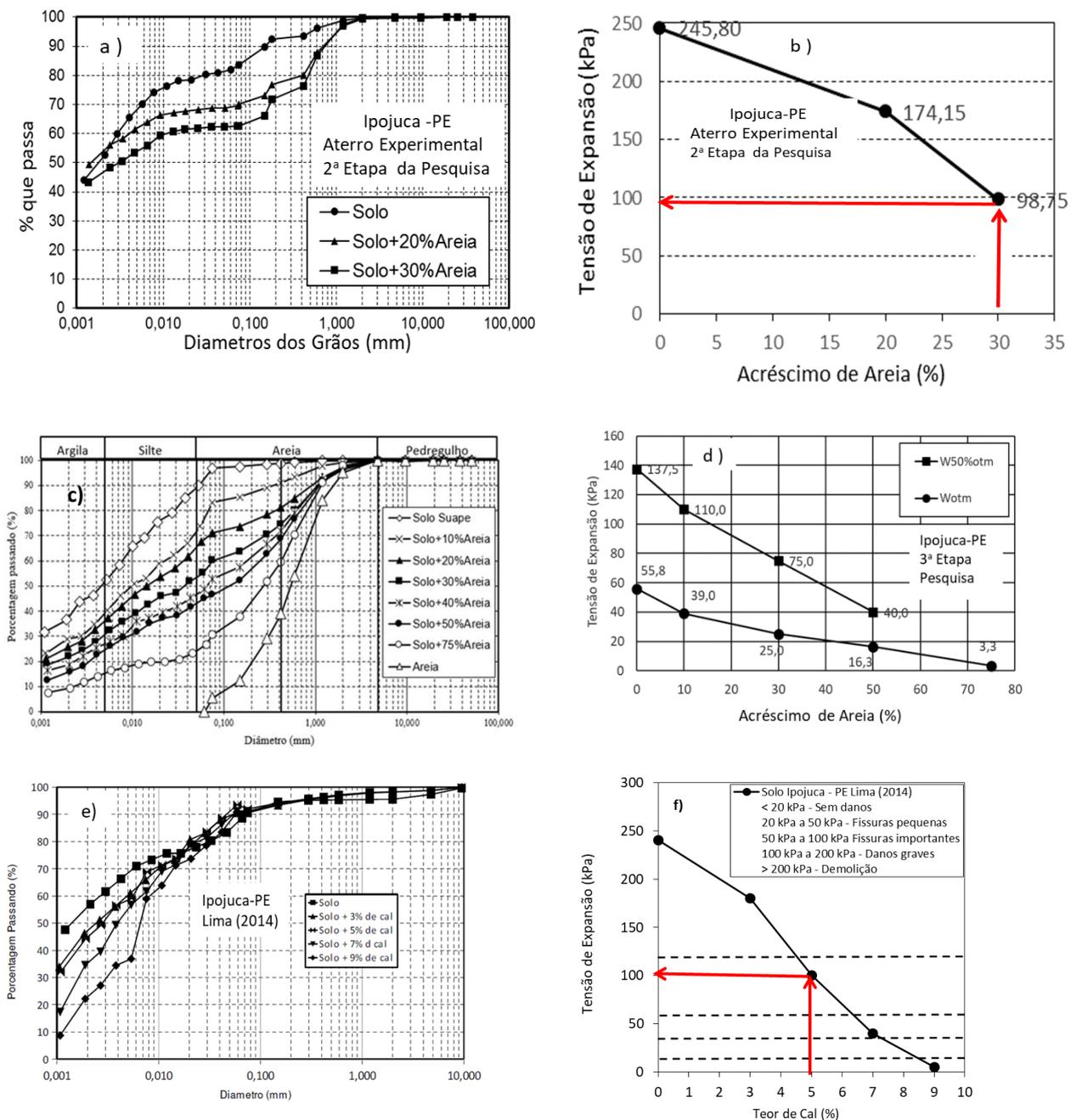
As reduções nos valores da Expansão “Livre” e na Tensão de Expansão obtidas por Cavalcanti (2017) no solo expansivo de Paulista-PE são inferiores aos valores obtidos no presente trabalho no solo expansivo de Ipojuca-PE.

4.3 COMPARAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DE EXPANSIVIDADE DA ARGILA DE IPOJUCA-PE MISTURAS COM AREIA E COM CAL HIDRATADA – QUARTA ETAPA

Lima (2014) analisou a estabilização do solo expansivo de Ipojuca-PE com adição de cal hidratada de 1%, 3% 5% 7% 9% e 11%. Com o percentual de 9% de cal hidratada adicionado ao solo expansivo de Ipojuca-PE, a Tensão de Expansão reduziu a valores insignificantes. O mesmo ocorreu para a Expansão “Livre” com a adição de 11% de cal hidratada. Para se obter resultado semelhante com a adição da cal é necessário a adição de 75% de areia. Na realidade, a adição de 75% de areia ao solo expansivo de Ipojuca-PE (MH) gera uma mistura com composição granulométrica completamente diferente (SM). Há remoção de argilomineral ativo por material granular inerte (areia).

Uma comparação dos efeitos da adição de areia ao solo expansivo de Ipojuca-PE, mostrando os resultados obtidos no aterro experimental (2ª etapa da pesquisa), com estudos realizados em laboratórios (3ª etapa da pesquisa) e com a adição de cal hidratada ao solo expansivo realizado por Lima (2014) é mostrada na Figura 39 e Figura 40. À medida que é adicionada areia ou cal hidratada ao solo expansivo há diminuição da fração argila e aumento das frações silte e areia. Embora o efeito externo (macro) seja o mesmo, os mecanismos são distintos. Um físico e o outro físico-químico. Ao se adicionar a areia, reduz a fração argila pelo efeito de substituição de partículas, portanto, uma ação física. Ao se adicionar a cal hidratada ao solo há inicialmente troca de íons que reduz a espessura da dupla camada do argilomineral. A forte concentração de cátions que separa a dupla camada, diminui a distância entre as partículas devido à concentração e as forças de atração ou repulsão elétrica favorecendo uma nova atração das partículas. Havendo floculação e aglomeração de partículas, resultando em partículas de maiores dimensões, Figura 39 (a, c, e).

FIGURA 39 - Efeito da adição de areia e da cal hidratada ao solo expansivo de Ipojuca-PE: a) Granulometria do solo expansivo e das misturas com areia (aterro experimental - 2ª etapa da pesquisa), b) Variação da Tensão de Expansão com o acréscimo de areia, c) Granulometria do solo expansivo e das misturas com areia (3ª etapa da pesquisa), d) Variação da Tensão de Expansão com o acréscimo de areia (3ª etapa da pesquisa), e) Granulometria do solo expansivo e das misturas com cal hidratada (Lima, 2014), f) Variação da Tensão de Expansão com a adição cal hidratada ao solo expansivo de Ipojuca-PE



FONTE: Lima, 2014

À medida que é adicionada areia ou cal hidratada ao solo expansivo de Ipojuca-PE há diminuição da Tensão de Expansão. Como foi comentado acima o efeito externo (macro) é o mesmo, mas os mecanismos são distintos. Um físico e o outro químico. Ao se adicionar a areia, reduz a quantidade de argilominerais expansivos presentes na fração argila com a substituição da argila e adição da areia (material inerte), portanto uma ação física. Ao se adicionar a cal hidratada ao solo expansivo há uma série de reações químicas importantes: troca de cátions, floculação, pozolânicas e carbonatação que propiciam condições e meios para reduzir a expansão do solo, Figura 39 (b, d, f).

A adição de 30% de areia ao solo expansivo de Ipojuca-PE (amostra da 2ª etapa – aterro experimental, Figura 4.19b) reduz a tensão de expansão a 100 kPa, o que equivale a adicionar 5% de cal hidratada considerando a mesma amostra analisada por Lima (2014), Figura 39f.

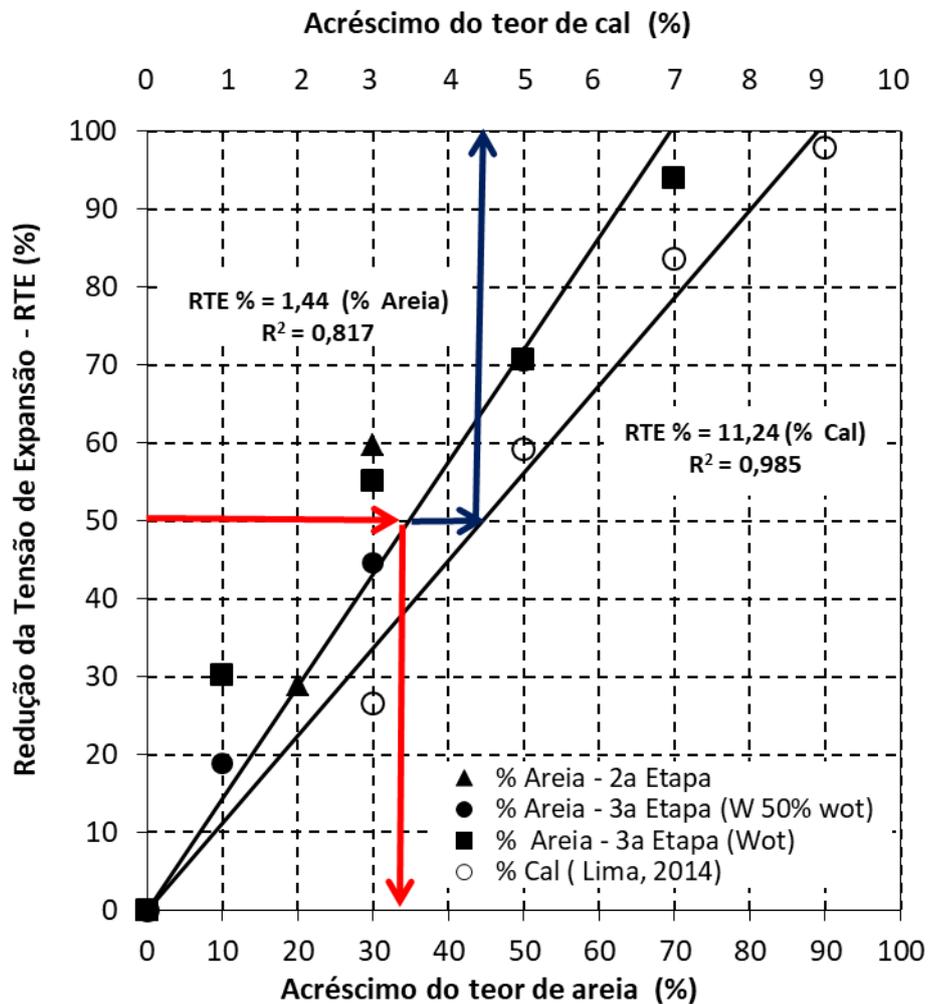
A Equação 3 relaciona os percentuais das Reduções da Tensão de Expansão (RTE_1) com o percentual da adição de areia para todas as amostras do solo expansivo de Ipojuca-PE aqui analisadas e a Equação 4 relaciona os percentuais das RTE_2 com os percentuais da adição de cal hidratada nas amostras do solo expansivo de Ipojuca-PE analisadas por Lima (2014) e a Figura 40 apresenta de forma gráfica essas equações com os valores obtidos a partir dos ensaios. Considerando as equações mencionadas, para se Reduzir a Tensão de Expansão em 50% é necessário adicionar aproximadamente 35% de areia, o que equivale a aproximadamente 4,5% cal. A Equação 5 mostra a relação entre a porcentagem de areia e porcentagem de cal para se obter a mesma Redução na Tensão de Expansão. Ou seja, a quantidade de areia que deve ser adicionada ao solo expansivo de Ipojuca-PE que tenha o efeito equivalente a adição de cal hidratada na Redução da Tensão de Expansão é 7,8 vezes maior. A Tabela 12 apresenta a equivalência quanto ao uso de cal e de areia para Redução da Tensão de Expansão para solo expansivo de Ipojuca-PE.

$$RTE_1 (\%) = 1,44 (\% \text{ Areia}) \quad R^2 = 0,817 \quad (3)$$

$$RTE_2 (\%) = 11,24 (\% \text{ Cal}) \quad R^2 = 0,985 \quad (4)$$

$$(\% \text{ Areia}) = 7,8 (\% \text{ Cal}) \text{ para uma mesma RTE} \quad (5)$$

FIGURA 40 - Redução Tensão de Expansão com adição de areia e cal hidratada ao solo expansivo de Ipojuca-PE.



FONTE: Autor

TABELA 12 - Redução da Tensão de Expansão para solo expansivo de Ipojuca-PE, com o acréscimo do teor de areia ou de cal hidratada.

Redução da Tensão de Expansão RTE (%)	Solo expansivo de Ipojuca-PE % de acréscimo em peso do solo	
	Areia*	Cal**
10 - 30	6,9 – 20,8	0,9 – 2,7
30 - 50	20,8 – 34,7	2,7 – 4,5
50 - 70	34,7 – 48,6	4,7 – 6,3
70 - 100	48,6 – 69,4	6,3 – 9,0

*Alteração Física ** Alteração Físico-química

FONTE: Autor

4.4 SIMULAÇÃO DE ESTIMATIVA DE CUSTO DE ATERRO SEM E COM USO DE ESTABILIZANTE EM SOLO EXPANSIVO.

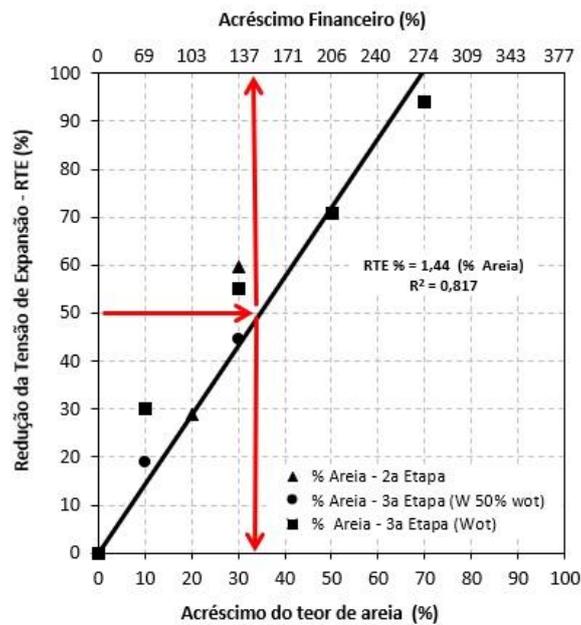
Com o propósito de quantificar o acréscimo financeiro que o melhoramento do solo expansivo pode causar às edificações, através de estimativas de custos. Apresenta-se no Apêndice A uma simulação da estimativa de custos com base em tabelas de custos unitários que são utilizadas em obras de engenharias mais atuais disponíveis para o Estado de Pernambuco. Neste Apêndice A, simula-se o custo financeiro para a terraplenagem de um aterro compactado com volume de corte e aterro de 250.000 m³ (duzentos e cinquenta mil metros cúbicos). Para fazer a comparação são consideradas as informações.

- Tabelas DNIT (dez, 2016) e SINAPI (set, 2017).
- Simulação de aterro sem uso de estabilizante.
- Simulação de aterro com uso de areia como estabilizante.
- Simulação de aterro com uso de cal como estabilizante.
- A Distância Média de Transporte (DMT) das escavações até o aterro varia de 50 a 3000 metros; O bota-fora distando a no máximo 2000 metros.
- No caso da adição da areia não foi considerado no custo do impacto ambiental da destinação final do solo expansivo removido da escavação.

A simulação apresentada (Apêndice A) inicialmente é de um aterro em que não foi identificado solo expansivo não havendo necessidades de incorporar ao seu corpo aditivos estabilizantes como areia ou cal. Em seguida, simulações de incorporação de percentuais de areia ao aterro também incorporação de percentuais de cal hidratada. A Figura 41 apresenta os percentuais de acréscimos financeiros em decorrência do uso de areia. Por exemplo, onde para obtenção de 50% de Redução da Tensão de Expansão haverá um acréscimo na ordem de 150% do custo financeiro. A Figura 42 apresenta os percentuais de acréscimos financeiros em decorrência do uso de cal. Por exemplo, onde para obtenção de 50% de Redução da Tensão de Expansão haverá um acréscimo financeiro na ordem de 279% do custo financeiro. Em ambas figuras os gráficos tiveram como base os resultados obtidos na Figura 4.20, unificando-os aos resultados financeiros do Apêndice A.

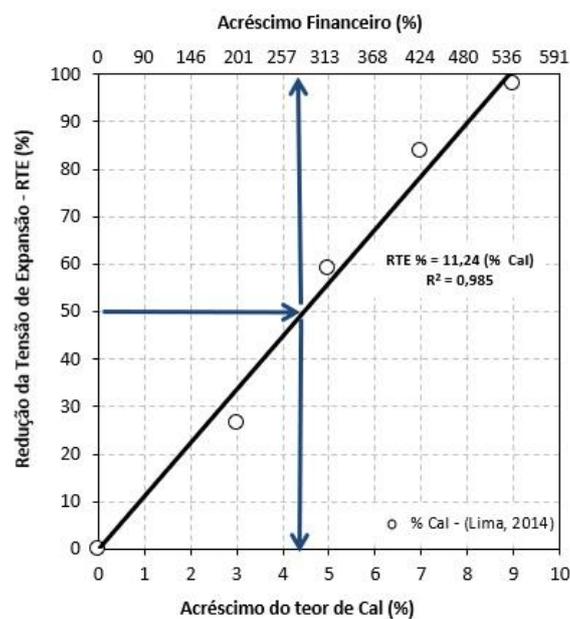
A união dos dados das Figuras 41 e 42 são apresentados na Figura 43, onde é possível obter o desvio financeiro com a adição de areia e/ou cal hidratada como aditivo estabilizante do solo expansivo de Ipojuca-PE.

FIGURA 41 - Redução Tensão de Expansão com adição de areia ao solo expansivo de Ipojuca-PE e o acréscimo financeiro gerado por esta adição.



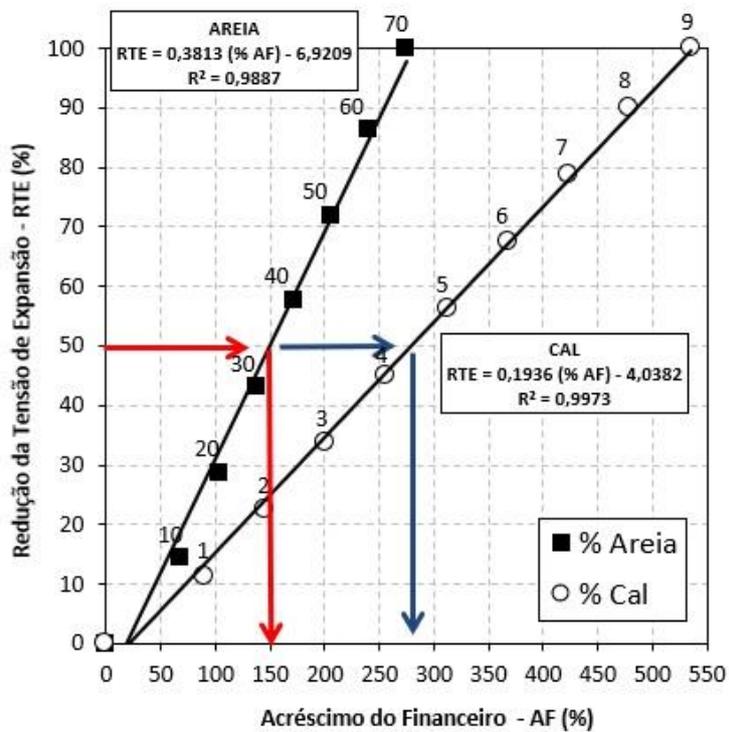
FONTE: Autor

FIGURA 42 - Redução Tensão de Expansão com adição de cal hidratada ao solo expansivo de Ipojuca-PE e o acréscimo financeiro gerado por esta adição.



FONTE: Autor

FIGURA 43 - Redução Tensão de Expansão com adição de cal hidratada ao solo expansivo de Ipojuca-PE e o Acréscimo Financeiro (AF) gerado por esta adição.



FONTE: Autor

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

São apresentadas as principais conclusões e sugestões para estudos futuros, que resultaram da aplicação do programa experimental ao solo estudado de Ipojuca-PE.

- Através dos métodos indiretos orientativos oriundos de ensaios simples já aplicados na terraplenagem foram suficientes para atestarem a existência de elevado potencial expansivo sendo estes comprovados através dos métodos diretos de ensaios específicos.
- As amostras das primeira e segunda etapas deste estudo apresentaram percentual superior a 80% de argila no solo e mesmo com sobrecarga de 40 kPa, os ensaios de Tensão de Expansão obtiveram média de 180 kPa e Expansão “Livre” com média de 5,5%. Resultados que podem gerar danos graves e até demolição das edificações.
- O solo estudado na terceira etapa possui 52% de argila, 33% de silte e 15% de areia. Classificada como MH, um silte de alta compressibilidade (USCS). Possui elevada plasticidade com índice de plasticidade (IP) de 19% e índice de atividade de Skempton (1953) igual a 0,51, que o classifica a argila como inativa. A curva de compactação é do tipo duplo pico com pequena variação percentual de peso específico aparente seco máximo e alta variação percentual de umidade entre um pico e outro. É um solo distrófico (baixa fertilidade), fortemente ácido de $\text{pH} < 7,0$. A expansão “livre” foi de 20,5% iniciado na umidade ótima e de 26,3% iniciado na umidade 50% da ótima. A tensão de expansão a volume constante foi de 55,8 kPa para o solo na umidade ótima e de 137,5 kPa para o solo na umidade 50% da ótima.
- Após a adição de areia ao solo estudado, as misturas estabilizadas apresentaram uma redução à expansão, à medida que, uma maior quantidade de estabilizante foi adicionada à amostra. Constatou-se que a elevação do teor de areia no solo pouco varia o índice de plasticidade (IP) mantendo praticamente a mesma plasticidade. A adição de 50% de areia reduziu a Expansão “Livre” a um valor

de 7,6% de expansão. Para a estabilização da Tensão de Expansão, a adição de areia de 75% reduz a tensão de expansão a 3,3 kPa.

- O aterro experimental foi importantíssimo para observar as dificuldades de se misturar uma grande quantidade de areia ao solo observando quanto a sua homogeneidade em escala produtiva.
- O estudo demonstrou que a compactação do aterro, se feita com a umidade abaixo da ótima, a Tensão de Expansão e a Expansão “Livre” atingirá um potencial muito maior. Acréscimo de 146% para a Tensão de Expansão e de 28% para a Expansão “Livre”.
- A adição de areia ou cal hidratada ao solo expansivo de Ipojuca-PE causa diminuição da fração argila, aumento das frações silte e areia, redução expansão livre e tensão de expansão nas misturas. Embora o efeito externo (macro) seja o mesmo, os mecanismos são distintos. Um físico (adição de areia) e o outro físico-químico (adição de cal).
- A adição de areia (inerte) reduz o quantitativo de argilomineral expansivo presente na argila reduzindo a fração argila, Expansão “Livre” e Tensão de Expansão nas misturas pelo efeito de substituição de partículas, portanto, uma ação física.
- Adicionar a cal hidratada ao solo expansivo causa uma série de reações químicas importantes: troca de cátions, floculação, pozolânicas e carbonatação que propiciam condições e meios para a diminuição da distância entre as partículas devido à concentração e as forças de atração ou repulsão elétrica favorecendo uma nova atração das partículas, redução do espaçamento basal, aglomeração das partículas, reduzindo a expansão do solo por efeito físico-químico.
- A análise dos resultados, do ponto de vista da economia financeira, a utilização da areia como agente estabilizante foi mais satisfatória do que com a cal hidratada. No entanto, a elevada quantidade de fatores influentes como custos dos materiais empregados, disponibilidade dos quantitativos necessários e as

Tensões de Expansão variáveis não permite padronizar os resultados. Sabe-se que para edificar sobre um aterro compactado, sendo ele inerte às expansões, o custo com as fundações será menor do que quando em um aterro não tratado.

Com o propósito de complementar a pesquisa apresentada neste trabalho, sugere-se:

- Avaliação de custo de uma fundação sobre um aterro compactado com uso de solo expansivo com e sem tratamento.
- Comportamento do aterro compactado na umidade ótima, com solo expansivo, observando os longos períodos de seca e posterior período com elevada pluviometria.
- Avaliação ambiental para o não uso do solo expansivo descartando 100% quando encontrado, levando em consideração a área de depósito, área de empréstimos e redução dos custos da fundação das edificações.

REFERÊNCIAS

American Society for Testing and Materials – ASTM, D4546. **Standard test methods for one dimensional swell or collapse of soils.** 2014

_____ ASTM , D4829. **Standard test method for expansion Index of soils.** 2011.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, NBR NM 248. **Agregados – Determinação da composição granulométrica.** 2013.

_____ ABNT, NBR 5681. **Controle tecnológico da execução de aterro.** 1980.

_____ ABNT, NBR 6457. **Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização.** 2016.

_____ ABNT, NBR 6458: **solo - grãos de pedregulho retidos na peneira de 4,8 mm: determinação da massa específica e da absorção de água.** 2016.

_____ ABNT, NBR 6459: **Solo - Determinação do limite de liquidez.** 2016.

_____ ABNT, NBR 6508. **Grãos de solos que passam na peneira 4,8mm - Determinação da massa específica.** 1984.

_____ ABNT, NBR 7180: **Solo - Determinação do limite de plasticidade.** 2016.

_____ ABNT NBR 7181: **Solo - Análise granulométrica.** 2016.

_____ ABNT NBR 7182: **Solo - Ensaio de compactação.** 2016.

_____ ABNT, NBR 9895: **Solo - Índice de Suporte Califórnia.** 1987.

_____ ABNT, NBR 12007: **Solo - Ensaio de Adensamento Unidimensional**. 1995

_____ ABNT, NBR 6502: **Rochas e Solos**. 1995

AITCHISON, G. D.; WOOD, C. C. **Some Interactions of Compaction Permeability and post Construction de Flocculation Affecting The Probability of Priding Failure In Sanall Earth Dams**. 6th Int. Cinf. On Soil Mechanics and Foundation Engineering, Montreal. 1965.

ALMEIDA, R. O. P. O. **Revisitação de áreas mineradas: estudo dos procedimentos aplicados em minerações de areia**. São Paulo. 160p. Dissertação (mestrado) – Escala Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo. 2002.

AMORIM, SAMUEL FRANÇA. **Contribuição à cartografia geotécnica: sistema de informações geográficas dos solos expansivos e colapsíveis do Estado de Pernambuco (SIGSEC – PE)**. Recife, 2004..

ANEPAC - **Associação Nacional das Entidades de Produtores de Agregados para Construção Civil**. Agregados. São Paulo, 2011.

AYALA CARCEDO, J.F., GIJON, M.F., MOZO, C.O., RODRIGUEZ J.L.S., **Mapa previsor de riesgos por expansividad de argillasen España a Escala 1:1.000.000**, In: Geologia Ambiental. Instituto Geologico y Minero de España, Centro de Estudios y Experimentacion de Obras Publicas, España, Madrid. 1986.

BAPTISTA, C. F. N. **Ensaio Fundamentais para a Pavimentação e Dimensionamentos dos Pavimentos Flexíveis**. Vol. 1, 2ª Edição, Editora Globo, Porto Alegre, 1976.

BARBOSA, V. **Estudo do comportamento geotécnico de um solo argiloso de Cabrobó, potencialmente expansivo, estabilizado com cal**. XVIII, 111 folhas, il.,

gráfs., tabs. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. 2013.

CAMPOS, L. E. P. & BURGOS, P. C. **Influência da Sucção na Expansão de Massapês** In: REGEO, Porto Alegre - RS. CD-ROM. 2004.

CAMPOS, J. O. **A desagregabilidade dos siltitos da Formação Corumbataí - Consequências práticas, fenomenologia provável e experimentação pertinente.** Rio Claro.120p. Concurso Público para Livre Docência, Universidade Estadual Paulista - Campus de Rio Claro - São Paulo, 1989.

CAVALCANTI, L.C. **Estabilização granulométrica de uma argila expansiva de Paulista-PE.** Monografia de conclusão do curso de Bacharelado em Engenharia Civil, Universidade Católica de Pernambuco – UNICAP. Recife, 2017.

CHAVES, A. C.; Lira, H. L.; Neves, G. A., Silva, F. A.; Lima, R. C. O.; França, K. B. **Obtenção e caracterização de membranas cerâmicas tubulares a partir de massas incorporadas com argila, caulim e quartzo.** Laboratório de Referência em Dessalinização (LABDES), Universidade Federal de Campina Grande - Campina Grande, PB, 2013.

CHEN, F. H. **The Use of Piers to Prevent the Uplifting of the Lightly Loaded Structures Foudbed on Expansive Clays.** Proc 1 at Int. Conf. Exp. Soils, Texas, pp. 152-171. 1965.

CHEN, F.H. **Foundation on expansive soil.** Amsterdam: Elsevier. 275p. 1975.

CHEN, F. H. **Foundation on Expansive Soils.** New York: Elsevier, 463 p. 1988.

COSTA, J.B. **Caracterização e Constituição do Solo.** Fundação Calouste Gulbenkian, 7ª edição, Lisboa, Portugal, 527 p. 2004.

CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Projeto de cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea.** Diagnóstico do Município de Ipojuca-PE. Recife. 2005.

CUELLAR, V. **Análisis Crítica de los Métodos Existentes para el Empleo de Arcillas Expansivas em obras de Carreteras y Recomendaciones Sobre las Técnicas Más Idóneas Para se Uso habitual en España.** Laboratório del Transporte y Mecanica del suelo, Madrid. 321p. 1978.

DAKSANAMURTY V, RAMAN. V. **A simple method of identifying an expansive soil.** Soils and Foundation, v.13, n. 1 pp. 97-104. 1973.

DELGADO, A. **Influencia de la Trayectoria de las Tensiones em el Comportamento de Las arcilas Expansivas y de los suelos colapsables en el laboratório y en el terreno.** Sevilla, Universidad de Sevilla 564p. (tese de doutorado). 1986.

DNPM. Sumário Mineral Brasileiro. **Agregados para construção civil.** Brasília, 2010. Disponível em: <https://sistemas.dnpm.gov.br/publicacao/Agregados%20para%20Construção%20Civil.pdf> .Acesso em 02. julho. 2017.

DONAGEMA, G.K., CAMPOS, D.V., CALDERANO, S.B., *et al.* **Manual de Métodos de Análise de Solos.** Rio de Janeiro, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Embrapa Solos. 2011.

DRISCOLL R., CRILLY, M.. **Subsidence damage to domestic buildings, Lessons learned and questions asked,** London, Building Research Establishment. 2000.

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo.** 2. ed. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisas de Solos. 212p. 1997.

_____ – EMBRAPA. **Zoneamento Agroecológico do Estado de Pernambuco.** Recife. CD-ROM. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos, Documentos; N°. 35. 2001.

_____ – EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Revista. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisas de Solos. 230p. 2011.

FERREIRA, S. R. M.. **Solos Especiais – Colapsíveis, Dispersivos e Expansivos**. Relatório Anual do CNPq. 1988.

FERREIRA, S. R. M. **Colapso e expansão de solos naturais não saturados devido à inundação**. Tese (Doutorado) da Universidade Federal do Rio de Janeiro, 401 p. 1995.

FERREIRA, S. R. M. **Comportamento Volumétrico de Alguns Solos Expansivos do Estado de Pernambuco – Brasil**. XII Congresso Nacional de Geotecnia – Guimarães – Portugal. 2010.

FERREIRA, S. R. M. e ATAÍDE, S. O. F. **Estudos Da Estabilização De Um Solo Expansivo De Ipojuca-PE Utilizado Em Aterros Compactados**. Anais do Cobramseg (Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica.). Belo Horizonte, MG. 2016.

FERREIRA, S. R. M. et al. **Estabilização de Solos Expansivos de Cabrobó, Paulista e Suape /PE com Cal**. XVI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. Anais, p.264. Porto de Galinhas/PE. 2012.

FERREIRA, S. R. M. et al. **Propriedades geotécnicas de um solo expansivo tratado com cal**. Revista Matéria. UFRJ, Rio de Janeiro pp. 437 a 449. 2015.

FERREIRA, S. R. M. et al. **Solos não saturados no contexto geotécnico**. Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. Capítulo 15, Solos Colapsíveis e expansivos. ABMS, São Paulo, p.415. 2015.

FERREIRA, S. R. M. e FERREIRA, M. G. V. X. **Mudanças de volume devido a variação de teor de umidade em um Vertisolo no Semiárido de Pernambuco**. Revista Brasileira de Ciência do Solo (Impresso), v. 33, p. 779-791. 2009.

FRAZÃO, E. B.; GOULART, E. P. **Aspectos da expansibilidade de argilominerais: Algumas Implicações em Obras Civis**. In: 1º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, ABGE, São Paulo, Tema 11, 2: 351 – 365. 1976.

FRAZÃO, E. B. **Contribuição à metodologia para determinação da pressão de expansão em solos e rochas**. São Paulo. 71p. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo - São Paulo. 1981.

GILLOTT, J. E. **Clay in Engineering Geology**. Elsevier Publ. Company, Amsterdam. 1987.

GOMES, C. F. **Argilas, o que são e para que servem**. Lisboa, Fundação Calouste Gulbenkian, 457p. 1986.

GONDIM, L. M. **Estudo Experimental de Misturas Solo-Emulsão Aplicado às Rodovias do Agropolo do Baixo Jaguaribe/Estado do Ceará**. Dissertação 171 de Mestrado, Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 213 fls. 2008.

GUERRA, D. L.; SANTOS, M. R. M. C. and AIROLDI, C. **Mercury adsorption on natural and organofunctionalized smectites - thermodynamics of cation removal**. Journal of Brazilian Chemical Society, v.20, n.4, p.594-603, 2009.

GUERRA, S. M. S. **Cartografia Geológico-Geotécnica de Áreas Costeiras: O Exemplo de Suape-PE**. Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Rio Claro, São Paulo, Tese de doutorado, 212p. 1998.

GUIMARÃES, J. E. P. **A Cal – Fundamentos e Aplicações na Engenharia Civil**. 2ª ed. Recife: Editora Universitária da UFPE. 2002.

GUIMARÃES, ANGELA DE MELLO FERREIRA. **Materiais híbridos nanoestruturados sintetizados a partir da funcionalização de esmectitas para imobilização de espécies inorgânicas e orgânicas**. Tese de Doutorado. Escola de

Engenharia Curso Pós Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas. Universidade Federal de Minas Gerais. 2007.

GRIM, R. E. **Clay Mineralogy**: McGraw-Hill Book Co., Inc., 384 pp. 1953.

GRIM, R. E. **Clay Mineralogy**. Second edition, McGraw-Hill Co., New York. 1968.

HORTA DA SILVA, J. A. **Solos expansivos – Comportamento, identificação, quantificação da instabilidade volumétrica e projetos de fundações**. Geotecnia. 1975.

IBGE. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Cidades**. Brasília, 2016. Disponível em: <<http://cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php?codmun=260720>> Acesso em 22 de junho de 2017.

I.S.R.M. - INTER. SOC. FOR ROCK MECH. **Suggested methods for determining water content, porosity, density, absorption and related properties and swelling and slakedurability index properties**. Document n° 2, Final Draft, Lisboa, Portugal. p. 142 - 156. 1972.

I.S.R.M. - INTER. SOC. FOR ROCK MECH. **Commission on swelling rock and working group on swelling rock of the commission on testing methods. Suggested methods for laboratory testing of argillaceous swelling rocks**. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol. 26. No 5, p. 415-426. 1989.

JEREMIAS, F. T. S. A. A. **Importância da expansibilidade na durabilidade dos materiais rochosos e técnicas laboratoriais para a sua avaliação**. Lisboa. Dissertação de Mestrado - Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Universidade Nova de Lisboa. 222p. 1991.

JIMENEZ, S. J. A. **Cimentaciones en terrenos expansivos y colapsables**. in: Geotecnia Y Cimentos 111, Vol. 1, ED. Rueda, Madrid. PP533-650. 1980.

JUSTINO DA SILVA, JOSÉ MARIA. **Variação Volumétrica de uma Argila Expansiva não Saturada Submetida a Diferentes Condições Climáticas**. 249 f. Tese

(Doutorado em Engenharia Civil). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo. 2001.

JUSTINO DA SILVA, J. M. **Solos Expansivos**. Livro “Geotecnia no Nordeste”, ABMS-NRNE, Cap. 8, pp. 397-418. 2005.

KIEHL, E.J. **Manual de Edafologia: Relações Solo - Planta**. Editora agronômica CERES Ltda, São Paulo, SP, 262 p. 1979.

LAMBE, T. W. **A mechanistic Picture of. Sher strenght in clay**. Research Conf. On Shear Strength of coh Ensivf soils, Boulder, Colorado, pp 555-580. 1960.

LEE, P. W.; SUEDEKAMP, R. J. **Characteristics of Irregularly Shaped Compaction Curves of Soils**. Highway Research Record n. 381, National Academy of Sciences, Washington, D.C., p 1-9. 1972.

LIMA, MARCIA A. A. **Estudo do comportamento geotécnico de um solo argiloso de Suape, potencialmente expansivo, estabilizado com cal**. Dissertação de Mestrado da Universidade Federal de Pernambuco. 2014.

LIMA FILHO, M. **Mapa geológico das folhas Ipojuca/ Ponta da Gambôa e Sirinhaém escala 1:25000**. Recife: LAGESE. 53p. il. 1996.

LUNA, F.J.; SCHUCHARDT, U. **Argilas pilarizadas - Uma Introdução**. Química Nova, v.22, n.1, p.104- 109, 1999.

MACCARINI, M., SANTOS, G. T. e TEIXEIRA, V. H. **Ponto Crítico de Sensibilidade à Compactação de um Solo Residual Riodacítico Maduro Ocorrente em Santa Catarina**. 23ª Reunião Anual de Pavimentação, Outubro, Florianópolis, pp. 419-429. 1991.

MACHADO, J. C. V. **Comportamento dos Argilominerais**, Curso de Mineralogia de Argilas, módulo 15, CENPES/ SEN – BA. 1986.

MADSEN, F.T. Müller Vonmoos, M. **The Swelling Behavior of Clays**. Appl. Clay Sci., V.4, pp.143-156, Feb. 1989.

MEURER, E. J. **Fundamentos de química dos solos**, 3ª Ed. Porto Alegre, Evangraf, 285p. 2006.

MIGUEL A. M. S. JUNIOR. **Propriedades geotécnicas de expansão de um solo argiloso compactado com e sem adição de cal**. Dissertação de Mestrado, Recife/PE. 2013.

MITCHELL, J. K. **Fundamentals of soil behavior**. 2nd ed., Ed. John Wiley & Sons, Inc. U.S.A. 437 p. 1993.

MORAIS, J. J. O. **Estudo e Caracterização da Expansividade de um Solo Argiloso do Município de Paulista-PE**, Dissertação de Mestrado, UFPE, Recife/PE. 2016.

NELSON, J. D. E MILLER, D. J. **Expansive Soils – Problems and practice in foundation and pavement engineering**. John Wiley & Sons, Inc., New York, 259p. 1992.

NEVES, J. M. C. **Estabilização de solos com cal – Estudo e aplicações rodoviárias**. Dissertação (Mestrado) da Universidade Nova Lisboa, Lisboa.1993.

NEW YORK STATE DIVISION OF HOMELAND SECURITY AND EMERGENCY SERVICES (NYS DHSES). **New York State Standard Multi-Hazard Mitigation Plan Draft, Section 3.13: Land Subsidence and Expansive Soils Hazard**. 2014. Disponível em: <<http://www.dhSES.ny.gov/recovery/mitigation/documents/2014-shmp/Section-3-13-Land-Subs-Expansive-Soil.pdf>> Acesso em 18/04/2016.

NIMER, E. **Pluviometria e recursos Hídricos dos estados de Pernambuco e Paraíba**. Rio de Janeiro: SOUREN, 117p. 1979.

OLIVEIRA, L. C. **A Estabilização de Solos Aplicada a Habitação, Um Estudo de Misturas Solo Cimento**. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro. 1994.

OLIVEIRA, F. U. **Avaliação de três métodos de ensaio para determinação do potencial de expansão de escórias de aciaria para uso em pavimentação.** Dissertação de mestrado; Universidade Federal do Espírito Santo; Santa Catarina/ES. 2006.

OLPHEN, H. V. **As introduction to Clay colloid chemistry.** Willey Interscience, NewYork, 301p. 1963.

PAIVA, WILLIAM DE. **Aplicação da estatística para descrever o comportamento de um solo expansivo.** Recife. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Pernambuco – CTG. Programa de pós-graduação em engenharia civil, 2009.

PAIVA, SÉRGIO CARVALHO DE. **Propriedades Geotécnicas de um Solo Expansivo Tratado com Cal.** Tese de Doutorado - Universidade Federal de Pernambuco – Recife, 2016.

PEJON, O. J. **Étude dugon flement de roches sédimentaires argilo-calcaires em présence d'eau. Observation au Microscope Électronique à Balayage.** Travail réalise à La section de Géologie et Materiaux naturels de la Division de Mécanique de Sols et Géologue de l'Ingénieur du Laboratoire Central de Ponts et Chaussées. Paris. 87 p. 1995.

PEREIRA, E. M. & PEJON, O. J. **Estudo do Potencial Expansivo dos Materiais Argilosos da Formação Guabirota na Região do Alto Iguaçu-PR.** Anais da Mesa Redonda Características Geotécnicas da Formação Guabirota. Curitiba, 21 de setembro de 1999. ABMS/UFPR, p. 17-28. 1999.

PEREIRA, E. M. **Estudo do comportamento à expansão de materiais sedimentares da formação guabirota em ensaios com sucção controlada.** Tese (Doutorado) da Escola de Engenharia de São Carlos, USP, 253p. 2004.

PRESA, E. P. **Deformabilidad de lasarcillas expansivas bajo succión controlada.** Centro de estudios y Experimentación de Obras Públicas. Madrid. 274p. 1984.

RAO, R. R., RAHARDJO, H. e FREDJUND, D. G. **Close from Heave Solutions for Expansive Soils.** Journ. Geotech. Eng. A.S.C.E. Vol. 114, nº 5, pp. 573-588. 1988.

RODRIGUES, C. M. G. & SOUSA, L. M. O. **Influência da composição química e mineralógica no comportamento do saprólito granítico da Guarda.** Actas do 8º Congresso Nacional de Geotecnia. Lisboa. Vol. 1, pp. 321-330. 2002.

RODRIGUES, E. Livro para a SBEA (material em construção), **Capítulo I – Agregados, texto preliminar**, p. 1-18. 2004.

SANDRONI, S. S., CONSOLI, N.C. **Sobre a prática da engenharia geotécnica com dois solos difíceis: os extremamente moles e os expansivos.** Proc. XV Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Gramado. pp. 97-187. 2010.

SANTOS, P. S. **Ciência e tecnologias de argilas.** 2º. ed. São Paulo, Edgard Blucher. v1.408p. 1989.

SANTOS, H.G, JACOMINE, P.K.T., ANJOS, L.H.C., et al. **Sistema brasileiro de classificação de solos.**, 3 ed, Brasília, DF, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Embrapa. 2013.

SANTOS, M., LIMA, D., BUENO, B. **Estabilização dos solos com cal e betume.** In: **6º Reunião de pavimentação urbana**, Santos – São Paulo, abril, 1995.

SCHREINER, H. D. **State of the art review on expansive soils.** Imperial College, London. 1987.

SEED, H.B.; WOORDWARD, R.J. E LUNDGRAN, R. **Prediction of swelling potential of compacted clays**, Proceedings ASCE Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, 88: 107-131. 1962.

SILVA JUNIOR, M. A. M. **Propriedades geotécnicas de expansão de um solo argiloso compactado com e sem adição de cal.** Dissertação (Mestrado) da Universidade Federal de Pernambuco, Recife. 89 pp. 2010.

SILVA, D. A. **Levantamento de problemas em fundações correntes no estado do Rio Grande do Sul**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1993.

SKEMPTON, A. W. **The colloidal activity of clays**. Proc. 3rd Int. Conf. Soil. Mech. Found. Eng., Switzerland. Vol.1, p. 57 - 61. 1953.

SNETHEN, D. R.; JOHNSON, L. D. & PATRICK, D. M. **An evaluation of expedient methodology for identification of potentially expansive soils**. Federal Highway Administration, Washington, FHWARD., p. 77 – 94. 1977.

TANNO, L. C; SINTONI, A; **Mineração & Município: bases para planejamento e gestão dos recursos minerais**. São Paulo: Institutos de pesquisas tecnológicas, 2003.

TAYLOR, R. K.; SMITH, J. **Engineering geology of clay mineral: swelling, shrinking and mudrock breckdown**. Clay Minerals, 1986. p. 235-260. 1986.

TRIBUNAL DE CONTAS DA UNIÃO – (TCU) 2015, TC 002.922/2015-0 **AUDITORIA. REFINARIA ABREU E LIMA – PE**. Disponível em: <https://contas.tcu.gov.br/sagas/SvlVisualizarRelVotoAcRtf?codFiltro=SAGAS>

Acesso em 21/09/2017.

VAN DER MERWE, D.H.. **The prediction of Heave from the Plasticity Index and the Clay Fraction**. Civil Engineering, South Africa v. 6 p. 103 - 107. 1964.

VENDRUSCOLO, M. A. **Estudo do comportamento de materiais compósitos fibrosos para a aplicação como reforço de base de fundações superficiais**. Porto Alegre. 224 p. Tese (Doutorado em engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2003.

VILLIBOR, Douglas Fadul. **Estabilização granulométrica ou mecânica**. 1982.57 f. Universidade de São Paulo, São Carlos, 1982

VOGT, J. C. **Estabilização Betuminosa**. In: 7º Simpósio sobre pesquisas rodoviárias, Rio de Janeiro. Julho, 1971.

WILLIAMS, A. A. B. **Studies of shear strength and bearing capacity of some partially saturated sands**. Proceedings of the Fourth Conference on soil Mechanics and Foundation Engineering, London, Vol. 3, pp. 453-456. 1957.

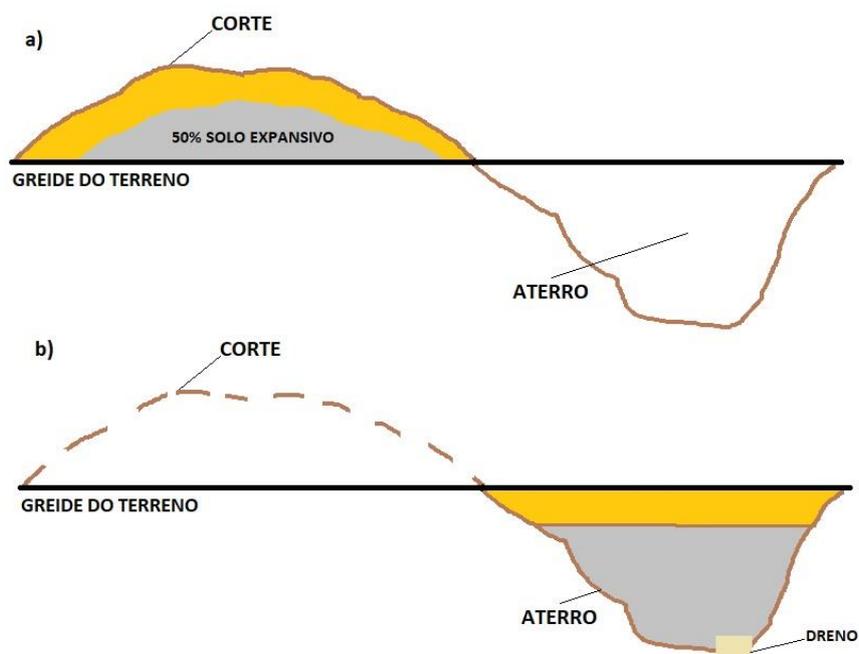
APÊNDICES

APÊNDICE A – EXEMPLO COMPARATIVO SIMPLIFICADO DO PERCENTUAL FINANCEIRO PARA UM ATERRO COMPACTADO COM IDENTIFICAÇÃO DE 50% DE SOLO EXPANSIVO COM E SEM UTILIZAÇÃO DE ESTABILIZANTES.

Comparamos simplificada, através de planilha orçamentária, os itens de uma composição de custo financeiro que seriam alterados os quantitativos em decorrência da identificação prévia do solo expansivo. O volume da movimentação de solo utilizado na planilha foi de 250.000 m³. Os valores unitários foram localizados nas tabelas do DNIT dezembro/2016 e SINAPI setembro/2017. A finalidade é comparar percentualmente qual o impacto do uso de areia e cal hidratada como estabilizante.

A figura A apresenta a linha greide do terreno. Esta linha delimita a cota em que o volume de corte está mais próximo do volume de aterro.

Figura A 1 – Corte e aterro, a) indica área que será cortada e b) corte já executado.



Fonte: Autor.

A.1 PLANILHA ORÇAMENTÁRIA

PLANILHA ORÇAMENTÁRIA							
OBJETO:	SERVIÇO DE TERRAPLANAGEM ENVOLVENDO CORTE E ATERRO COM VOLUME TOTAL DE 250.000 M3 DE MOVIMENTO DE TERRA. A PLANILHA SIMULA TRÊS SITUAÇÕES: 0- TERRAPLANAGEM SEM ADIÇÃO DE ESTABILIZANTE; %- TERRAPLANAGEM COM ADIÇÃO DE AREIA COMO ESTABILIZANTE E %- TERRAPLANAGEM COM ADIÇÃO DE CAL HIDRATADA CH-I COMO ESTABILIZANTE.						
OBS:	O ATERRO SIMULADO É CONSTITUÍDO DE 50% DE MATERIAL EXPANSIVO						
CÓDIGO	DESCRIÇÃO	ESPECIF.	UND	QUANT.	PREÇO (R\$)		
		ADOTADA			UNIT.	TOTAL	
0	TERRAPLANAGEM SEM ADIÇÃO DE ESTABILIZANTE						
2 S 01 100 09	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 50 a 200m c/carreg	DNIT 106/2016-PE	m3	89.440,34	8,45	755.770,85	
2 S 01 100 10	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 200 a 400m c/carreg		m3	32.318,03	9,20	297.325,92	
2 S 01 100 11	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 400 a 600m c/carreg		m3	44.054,27	9,59	422.480,43	
2 S 01 100 12	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 600 a 800m c/carreg		m3	22.039,14	10,05	221.493,38	
2 S 01 100 13	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 800 a 1000m c/carreg		m3	27.987,49	10,76	301.145,44	
2 S 01 100 14	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 1000 a 1200m c/carreg		m3	8.996,21	11,18	100.577,67	
2 S 01 100 15	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 1200 a 1400m c/carreg		m3	1.277,22	11,55	14.751,89	
2 S 01 100 16	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 1400 a 1600m c/carreg		m3	745,59	12,12	9.036,56	
2 S 01 100 17	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 1600 a 1800m c/carreg		m3	17.501,19	12,30	215.264,64	
2 S 01 100 18	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 1800 a 2000m c/carreg		m3	1.207,36	13,04	15.743,91	
2 S 01 100 19	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 2000 a 3000m c/carreg		m3	4.433,15	14,53	64.413,73	
2 S 01 510 00	Compactação de aterros a 95% proctor normal		m3	100.000,00	3,23	323.000,00	
2 S 01 511 00	Compactação de aterros a 100% proctor normal		m3	150.000,00	3,73	559.500,00	
						TOTAL	2.458.172,10
			MISTURA AO SOLO (%)	Acrésc. Financeiro (R\$)	% do Acrésc.		
	AREIA	10	4.143.604,19	69%			
	AREIA	20	4.986.703,97	103%			
	AREIA	30	5.829.803,75	137%			
	AREIA	40	6.672.903,53	171%			
	AREIA	50	7.516.003,31	206%			
	AREIA	60	8.359.103,09	240%			
	AREIA	70	9.202.202,87	274%			
	AREIA	80	10.045.302,65	309%			
	AREIA	90	10.888.402,43	343%			
	AREIA	100	11.731.502,21	377%			
	CAL	1	4.669.814,39	90%			
	CAL	2	6.039.124,37	146%			
	CAL	3	7.408.434,35	201%			
	CAL	4	8.777.744,33	257%			
	CAL	5	10.147.054,30	313%			
	CAL	6	11.516.364,28	368%			
	CAL	7	12.885.674,26	424%			
	CAL	8	14.254.984,24	480%			
	CAL	9	15.624.294,22	536%			
	CAL	10	16.993.604,19	591%			

PLANILHA ORÇAMENTÁRIA						
OBJETO:	SERVIÇO DE TERRAPLANAGEM ENVOLVENDO CORTE E ATERRO COM VOLUME TOTAL DE 250.000 M3 DE MOVIMENTO DE TERRA. A PLANILHA SIMULA TRÊS SITUAÇÕES: 0- TERRAPLANAGEM SEM ADIÇÃO DE ESTABILIZANTE; %- TERRAPLANAGEM COM ADIÇÃO DE AREIA COMO ESTABILIZANTE E %- TERRAPLANAGEM COM ADIÇÃO DE CAL HIDRATADA CH-I COMO ESTABILIZANTE.					
OBS:	O ATERRO SIMULADO É CONSTITUÍDO DE 50% DE MATERIAL EXPANSIVO					
CÓDIGO	DESCRIÇÃO	ESPECIF. ADOTADA	UND	QUANT.	PREÇO (R\$)	
					UNIT.	TOTAL
10% TERRAPLANAGEM COM ADIÇÃO DE AREIA						
2 S 01 100 09	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 50 a 200m c/carreg	DNIT 106/2016-PE	m3	84.968,32	8,45	717.982,31
2 S 01 100 10	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 200 a 400m c/carreg		m3	30.702,13	9,20	282.459,62
2 S 01 100 11	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 400 a 600m c/carreg		m3	41.851,55	9,59	401.356,41
2 S 01 100 12	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 600 a 800m c/carreg		m3	20.937,18	10,05	210.418,71
2 S 01 100 13	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 800 a 1000m c/carreg		m3	26.588,12	10,76	286.088,17
2 S 01 100 14	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 1000 a 1200m c/carreg		m3	8.546,40	11,18	95.548,79
2 S 01 100 15	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 1200 a 1400m c/carreg		m3	1.213,36	11,55	14.014,30
2 S 01 100 16	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 1400 a 1600m c/carreg		m3	708,31	12,12	8.584,73
2 S 01 100 17	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 1600 a 1800m c/carreg		m3	16.626,13	12,30	204.501,40
2 S 01 100 18	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 1800 a 2000m c/carreg		m3	1.146,99	13,04	14.956,71
2 S 01 100 19	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 2000 a 3000m c/carreg		m3	4.211,50	14,53	61.193,05
MAT 000367	Areia grossa - posto jazida/fornecedor (retirado na jazida,sem transporte)		SINAPI 09-2017	m3	12.500,00	60,00
2 S 01 100 19	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 2000 a 3000m c/carreg	DNIT 106/2016-PE	m3	12.500,00	14,53	181.625,00
2 S 01 510 00	Compactação de aterros a 95% proctor normal		m3	100.000,00	3,23	323.000,00
2 S 01 511 00	Compactação de aterros a 100% proctor normal		m3	150.000,00	3,73	559.500,00
2 S 01 513 01	Compactação de material de "bota-fora"		m3	12.500,00	2,59	32.375,00
					TOTAL	4.143.604,19
1% TERRAPLANAGEM COM ADIÇÃO DE CAL						
2 S 01 100 09	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 50 a 200m c/carreg	DNIT 106/2016-PE	m3	88.993,14	8,45	751.992,00
2 S 01 100 10	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 200 a 400m c/carreg		m3	32.156,44	9,20	295.839,29
2 S 01 100 11	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 400 a 600m c/carreg		m3	43.834,00	9,59	420.368,02
2 S 01 100 12	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 600 a 800m c/carreg		m3	21.928,95	10,05	220.385,91
2 S 01 100 13	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 800 a 1000m c/carreg		m3	27.847,56	10,76	299.639,71
2 S 01 100 14	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 1000 a 1200m c/carreg		m3	8.951,23	11,18	100.074,79
2 S 01 100 15	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 1200 a 1400m c/carreg		m3	1.270,83	11,55	14.678,13
2 S 01 100 16	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 1400 a 1600m c/carreg		m3	741,86	12,12	8.991,38
2 S 01 100 17	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 1600 a 1800m c/carreg		m3	17.413,68	12,30	214.188,31
2 S 01 100 18	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 1800 a 2000m c/carreg		m3	1.201,32	13,04	15.665,19
2 S 01 100 19	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 2000 a 3000m c/carreg		m3	4.410,99	14,53	64.091,67
MAT 1106	Cal hidratada CH - I		SINAPI 09-2017	m3	1.250,00	1.088,00
2 S 01 100 19	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 2000 a 3000m c/carreg	DNIT 106/2016-PE	m3	1.250,00	14,53	18.162,50
2 S 01 510 00	Compactação de aterros a 95% proctor normal		m3	100.000,00	3,23	323.000,00
2 S 01 511 00	Compactação de aterros a 100% proctor normal		m3	150.000,00	3,73	559.500,00
2 S 01 513 01	Compactação de material de "bota-fora"		m3	1.250,00	2,59	3.237,50
					TOTAL	4.669.814,39

PLANILHA ORÇAMENTÁRIA						
OBJETO:	SERVIÇO DE TERRAPLANAGEM ENVOLVENDO CORTE E ATERRO COM VOLUME TOTAL DE 250.000 M3 DE MOVIMENTO DE TERRA. A PLANILHA SIMULA TRÊS SITUAÇÕES: 0- TERRAPLANAGEM SEM ADIÇÃO DE ESTABILIZANTE; %- TERRAPLANAGEM COM ADIÇÃO DE AREIA COMO ESTABILIZANTE E %- TERRAPLANAGEM COM ADIÇÃO DE CAL HIDRATADA CH-I COMO ESTABILIZANTE.					
OBS:	O ATERRO SIMULADO É CONSTITUÍDO DE 50% DE MATERIAL EXPANSIVO					
CÓDIGO	DESCRIÇÃO	ESPECIF. ADOTADA	UND	QUANT.	PREÇO (R\$)	
					UNIT.	TOTAL
20%	TERRAPLANAGEM COM ADIÇÃO DE AREIA					
2 S 01 100 09	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 50 a 200m c/carreg	DNIT 106/2016-PE	m3	80.496,30	8,45	680.193,77
2 S 01 100 10	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 200 a 400m c/carreg		m3	29.086,23	9,20	267.593,32
2 S 01 100 11	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 400 a 600m c/carreg		m3	39.648,84	9,59	380.232,38
2 S 01 100 12	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 600 a 800m c/carreg		m3	19.835,23	10,05	199.344,04
2 S 01 100 13	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 800 a 1000m c/carreg		m3	25.188,74	10,76	271.030,89
2 S 01 100 14	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 1000 a 1200m c/carreg		m3	8.096,59	11,18	90.519,91
2 S 01 100 15	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 1200 a 1400m c/carreg		m3	1.149,50	11,55	13.276,70
2 S 01 100 16	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 1400 a 1600m c/carreg		m3	671,03	12,12	8.132,91
2 S 01 100 17	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 1600 a 1800m c/carreg		m3	15.751,07	12,30	193.738,17
2 S 01 100 18	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 1800 a 2000m c/carreg		m3	1.086,62	13,04	14.169,52
2 S 01 100 19	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 2000 a 3000m c/carreg		m3	3.989,84	14,53	57.972,36
MAT 000367	Areia grossa - posto jazida/fornecedor (retirado na jazida,sem transporte)	SINAPI 09-2017	m3	25.000,00	60,00	1.500.000,00
2 S 01 100 19	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 2000 a 3000m c/carreg	DNIT 106/2016-PE	m3	25.000,00	14,53	363.250,00
2 S 01 510 00	Compactação de aterros a 95% proctor normal		m3	100.000,00	3,23	323.000,00
2 S 01 511 00	Compactação de aterros a 100% proctor normal		m3	150.000,00	3,73	559.500,00
2 S 01 513 01	Compactação de material de "bota-fora"		m3	25.000,00	2,59	64.750,00
					TOTAL	4.986.703,97
2%	TERRAPLANAGEM COM ADIÇÃO DE CAL					
2 S 01 100 09	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 50 a 200m c/carreg	DNIT 106/2016-PE	m3	88.545,93	8,45	748.213,14
2 S 01 100 10	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 200 a 400m c/carreg		m3	31.994,85	9,20	294.352,66
2 S 01 100 11	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 400 a 600m c/carreg		m3	43.613,72	9,59	418.255,62
2 S 01 100 12	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 600 a 800m c/carreg		m3	21.818,75	10,05	219.278,44
2 S 01 100 13	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 800 a 1000m c/carreg		m3	27.707,62	10,76	298.133,98
2 S 01 100 14	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 1000 a 1200m c/carreg		m3	8.906,25	11,18	99.571,90
2 S 01 100 15	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 1200 a 1400m c/carreg		m3	1.264,45	11,55	14.604,37
2 S 01 100 16	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 1400 a 1600m c/carreg		m3	738,13	12,12	8.946,20
2 S 01 100 17	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 1600 a 1800m c/carreg		m3	17.326,18	12,30	213.111,99
2 S 01 100 18	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 1800 a 2000m c/carreg		m3	1.195,28	13,04	15.586,47
2 S 01 100 19	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 2000 a 3000m c/carreg		m3	4.388,82	14,53	63.769,60
MAT 1106	Cal hidratada CH - I	SINAPI 09-2017	m3	2.500,00	1.088,00	2.720.000,00
2 S 01 100 19	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 2000 a 3000m c/carreg	DNIT 106/2016-PE	m3	2.500,00	14,53	36.325,00
2 S 01 510 00	Compactação de aterros a 95% proctor normal		m3	100.000,00	3,23	323.000,00
2 S 01 511 00	Compactação de aterros a 100% proctor normal		m3	150.000,00	3,73	559.500,00
2 S 01 513 01	Compactação de material de "bota-fora"		m3	2.500,00	2,59	6.475,00
					TOTAL	6.039.124,37

PLANILHA ORÇAMENTÁRIA						
OBJETO:	SERVIÇO DE TERRAPLANAGEM ENVOLVENDO CORTE E ATERRO COM VOLUME TOTAL DE 250.000 M3 DE MOVIMENTO DE TERRA. A PLANILHA SIMULA TRÊS SITUAÇÕES: 0- TERRAPLANAGEM SEM ADIÇÃO DE ESTABILIZANTE; %- TERRAPLANAGEM COM ADIÇÃO DE AREIA COMO ESTABILIZANTE E %- TERRAPLANAGEM COM ADIÇÃO DE CAL HIDRATADA CH-I COMO ESTABILIZANTE.					
OBS:	O ATERRO SIMULADO É CONSTITUÍDO DE 50% DE MATERIAL EXPANSIVO					
CÓDIGO	DESCRIÇÃO	ESPECIF. ADOTADA	UND	QUANT.	PREÇO (R\$)	
					UNIT.	TOTAL
30% TERRAPLANAGEM COM ADIÇÃO DE AREIA						
2 S 01 100 09	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 50 a 200m c/carreg	DNIT 106/2016-PE	m3	76.024,29	8,45	642.405,22
2 S 01 100 10	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 200 a 400m c/carreg		m3	27.470,33	9,20	252.727,03
2 S 01 100 11	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 400 a 600m c/carreg		m3	37.446,13	9,59	359.108,36
2 S 01 100 12	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 600 a 800m c/carreg		m3	18.733,27	10,05	188.269,37
2 S 01 100 13	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 800 a 1000m c/carreg		m3	23.789,37	10,76	255.973,62
2 S 01 100 14	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 1000 a 1200m c/carreg		m3	7.646,78	11,18	85.491,02
2 S 01 100 15	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 1200 a 1400m c/carreg		m3	1.085,64	11,55	12.539,11
2 S 01 100 16	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 1400 a 1600m c/carreg		m3	633,75	12,12	7.681,08
2 S 01 100 17	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 1600 a 1800m c/carreg		m3	14.876,01	12,30	182.974,94
2 S 01 100 18	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 1800 a 2000m c/carreg		m3	1.026,25	13,04	13.382,32
2 S 01 100 19	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 2000 a 3000m c/carreg		m3	3.768,18	14,53	54.751,67
MAT 000367	Areia grossa - posto jazida/fornecedor (retirado na jazida,sem transporte)	SINAPI 09-2017	m3	37.500,00	60,00	2.250.000,00
2 S 01 100 19	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 2000 a 3000m c/carreg	DNIT 106/2016-PE	m3	37.500,00	14,53	544.875,00
2 S 01 510 00	Compactação de aterros a 95% proctor normal		m3	100.000,00	3,23	323.000,00
2 S 01 511 00	Compactação de aterros a 100% proctor normal		m3	150.000,00	3,73	559.500,00
2 S 01 513 01	Compactação de material de "bota-fora"		m3	37.500,00	2,59	97.125,00
					TOTAL	5.829.803,75
3% TERRAPLANAGEM COM ADIÇÃO DE CAL						
2 S 01 100 09	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 50 a 200m c/carreg	DNIT 106/2016-PE	m3	88.098,73	8,45	744.434,29
2 S 01 100 10	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 200 a 400m c/carreg		m3	31.833,26	9,20	292.866,03
2 S 01 100 11	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 400 a 600m c/carreg		m3	43.393,45	9,59	416.143,22
2 S 01 100 12	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 600 a 800m c/carreg		m3	21.708,55	10,05	218.170,98
2 S 01 100 13	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 800 a 1000m c/carreg		m3	27.567,68	10,76	296.628,26
2 S 01 100 14	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 1000 a 1200m c/carreg		m3	8.861,27	11,18	99.069,01
2 S 01 100 15	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 1200 a 1400m c/carreg		m3	1.258,06	11,55	14.530,61
2 S 01 100 16	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 1400 a 1600m c/carreg		m3	734,41	12,12	8.901,01
2 S 01 100 17	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 1600 a 1800m c/carreg		m3	17.238,67	12,30	212.035,67
2 S 01 100 18	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 1800 a 2000m c/carreg		m3	1.189,24	13,04	15.507,75
2 S 01 100 19	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 2000 a 3000m c/carreg		m3	4.366,66	14,53	63.447,53
MAT 1106	Cal hidratada CH - I	SINAPI 09-2017	m3	3.750,00	1.088,00	4.080.000,00
2 S 01 100 19	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 2000 a 3000m c/carreg	DNIT 106/2016-PE	m3	3.750,00	14,53	54.487,50
2 S 01 510 00	Compactação de aterros a 95% proctor normal		m3	100.000,00	3,23	323.000,00
2 S 01 511 00	Compactação de aterros a 100% proctor normal		m3	150.000,00	3,73	559.500,00
2 S 01 513 01	Compactação de material de "bota-fora"		m3	3.750,00	2,59	9.712,50
					TOTAL	7.408.434,35

PLANILHA ORÇAMENTÁRIA						
OBJETO:	SERVIÇO DE TERRAPLANAGEM ENVOLVENDO CORTE E ATERRO COM VOLUME TOTAL DE 250.000 M3 DE MOVIMENTO DE TERRA. A PLANILHA SIMULA TRÊS SITUAÇÕES: 0- TERRAPLANAGEM SEM ADIÇÃO DE ESTABILIZANTE; %- TERRAPLANAGEM COM ADIÇÃO DE AREIA COMO ESTABILIZANTE E %- TERRAPLANAGEM COM ADIÇÃO DE CAL HIDRATADA CH-I COMO ESTABILIZANTE.					
OBS:	O ATERRO SIMULADO É CONSTITUÍDO DE 50% DE MATERIAL EXPANSIVO					
CÓDIGO	DESCRIÇÃO	ESPECIF. ADOTADA	UND	QUANT.	PREÇO (R\$)	
					UNIT.	TOTAL
40%	TERRAPLANAGEM COM ADIÇÃO DE AREIA					
2 S 01 100 09	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 50 a 200m c/carreg	DNIT 106/2016-PE	m3	71.552,27	8,45	604.616,68
2 S 01 100 10	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 200 a 400m c/carreg		m3	25.854,43	9,20	237.860,73
2 S 01 100 11	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 400 a 600m c/carreg		m3	35.243,41	9,59	337.984,34
2 S 01 100 12	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 600 a 800m c/carreg		m3	17.631,31	10,05	177.194,70
2 S 01 100 13	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 800 a 1000m c/carreg		m3	22.390,00	10,76	240.916,35
2 S 01 100 14	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 1000 a 1200m c/carreg		m3	7.196,97	11,18	80.462,14
2 S 01 100 15	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 1200 a 1400m c/carreg		m3	1.021,78	11,55	11.801,51
2 S 01 100 16	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 1400 a 1600m c/carreg		m3	596,47	12,12	7.229,25
2 S 01 100 17	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 1600 a 1800m c/carreg		m3	14.000,95	12,30	172.211,71
2 S 01 100 18	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 1800 a 2000m c/carreg		m3	965,88	13,04	12.595,13
2 S 01 100 19	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 2000 a 3000m c/carreg	m3	3.546,52	14,53	51.530,99	
MAT 000367	Areia grossa - posto jazida/fornecedor (retirado na jazida,sem transporte)	SINAPI 09-2017	m3	50.000,00	60,00	3.000.000,00
2 S 01 100 19	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 2000 a 3000m c/carreg	DNIT 106/2016-PE	m3	50.000,00	14,53	726.500,00
2 S 01 510 00	Compactação de aterros a 95% proctor normal		m3	100.000,00	3,23	323.000,00
2 S 01 511 00	Compactação de aterros a 100% proctor normal		m3	150.000,00	3,73	559.500,00
2 S 01 513 01	Compactação de material de "bota-fora"		m3	50.000,00	2,59	129.500,00
					TOTAL	6.672.903,53
4%	TERRAPLANAGEM COM ADIÇÃO DE CAL					
2 S 01 100 09	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 50 a 200m c/carreg	DNIT 106/2016-PE	m3	87.651,53	8,45	740.655,43
2 S 01 100 10	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 200 a 400m c/carreg		m3	31.671,67	9,20	291.379,40
2 S 01 100 11	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 400 a 600m c/carreg		m3	43.173,18	9,59	414.030,82
2 S 01 100 12	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 600 a 800m c/carreg		m3	21.598,36	10,05	217.063,51
2 S 01 100 13	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 800 a 1000m c/carreg		m3	27.427,74	10,76	295.122,53
2 S 01 100 14	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 1000 a 1200m c/carreg		m3	8.816,29	11,18	98.566,12
2 S 01 100 15	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 1200 a 1400m c/carreg		m3	1.251,68	11,55	14.456,85
2 S 01 100 16	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 1400 a 1600m c/carreg		m3	730,68	12,12	8.855,83
2 S 01 100 17	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 1600 a 1800m c/carreg		m3	17.151,17	12,30	210.959,34
2 S 01 100 18	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 1800 a 2000m c/carreg		m3	1.183,21	13,04	15.429,03
2 S 01 100 19	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 2000 a 3000m c/carreg	m3	4.344,49	14,53	63.125,46	
MAT 1106	Cal hidratada CH - I	SINAPI 09-2017	m3	5.000,00	1.088,00	5.440.000,00
2 S 01 100 19	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 2000 a 3000m c/carreg	DNIT 106/2016-PE	m3	5.000,00	14,53	72.650,00
2 S 01 510 00	Compactação de aterros a 95% proctor normal		m3	100.000,00	3,23	323.000,00
2 S 01 511 00	Compactação de aterros a 100% proctor normal		m3	150.000,00	3,73	559.500,00
2 S 01 513 01	Compactação de material de "bota-fora"		m3	5.000,00	2,59	12.950,00
					TOTAL	8.777.744,33

PLANILHA ORÇAMENTÁRIA						
OBJETO:	SERVIÇO DE TERRAPLANAGEM ENVOLVENDO CORTE E ATERRO COM VOLUME TOTAL DE 250.000 M3 DE MOVIMENTO DE TERRA. A PLANILHA SIMULA TRÊS SITUAÇÕES: 0- TERRAPLANAGEM SEM ADIÇÃO DE ESTABILIZANTE; %- TERRAPLANAGEM COM ADIÇÃO DE AREIA COMO ESTABILIZANTE E %- TERRAPLANAGEM COM ADIÇÃO DE CAL HIDRATADA CH-I COMO ESTABILIZANTE.					
OBS:	O ATERRO SIMULADO É CONSTITUÍDO DE 50% DE MATERIAL EXPANSIVO					
CÓDIGO	DESCRIÇÃO	ESPECIF. ADOTADA	UND	QUANT.	PREÇO (R\$)	
					UNIT.	TOTAL
50%	TERRAPLANAGEM COM ADIÇÃO DE AREIA					
2 S 01 100 09	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 50 a 200m c/carreg	DNIT 106/2016-PE	m3	67.080,25	8,45	566.828,14
2 S 01 100 10	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 200 a 400m c/carreg		m3	24.238,53	9,20	222.994,44
2 S 01 100 11	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 400 a 600m c/carreg		m3	33.040,70	9,59	316.860,32
2 S 01 100 12	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 600 a 800m c/carreg		m3	16.529,36	10,05	166.120,03
2 S 01 100 13	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 800 a 1000m c/carreg		m3	20.990,62	10,76	225.859,08
2 S 01 100 14	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 1000 a 1200m c/carreg		m3	6.747,16	11,18	75.433,26
2 S 01 100 15	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 1200 a 1400m c/carreg		m3	957,92	11,55	11.063,92
2 S 01 100 16	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 1400 a 1600m c/carreg		m3	559,19	12,12	6.777,42
2 S 01 100 17	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 1600 a 1800m c/carreg		m3	13.125,89	12,30	161.448,48
2 S 01 100 18	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 1800 a 2000m c/carreg		m3	905,52	13,04	11.807,93
2 S 01 100 19	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 2000 a 3000m c/carreg	m3	3.324,87	14,53	48.310,30	
MAT 000367	Areia grossa - posto jazida/fornecedor (retirado na jazida.sem transporte)	SINAPI 09-2017	m3	62.500,00	60,00	3.750.000,00
2 S 01 100 19	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 2000 a 3000m c/carreg	DNIT 106/2016-PE	m3	62.500,00	14,53	908.125,00
2 S 01 510 00	Compactação de aterros a 95% proctor normal		m3	100.000,00	3,23	323.000,00
2 S 01 511 00	Compactação de aterros a 100% proctor normal		m3	150.000,00	3,73	559.500,00
2 S 01 513 01	Compactação de material de "bota-fora"		m3	62.500,00	2,59	161.875,00
					TOTAL	7.516.003,31
5%	TERRAPLANAGEM COM ADIÇÃO DE CAL					
2 S 01 100 09	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 50 a 200m c/carreg	DNIT 106/2016-PE	m3	87.204,33	8,45	736.876,58
2 S 01 100 10	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 200 a 400m c/carreg		m3	31.510,08	9,20	289.892,77
2 S 01 100 11	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 400 a 600m c/carreg		m3	42.952,91	9,59	411.918,42
2 S 01 100 12	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 600 a 800m c/carreg		m3	21.488,16	10,05	215.956,04
2 S 01 100 13	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 800 a 1000m c/carreg		m3	27.287,81	10,76	293.616,80
2 S 01 100 14	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 1000 a 1200m c/carreg		m3	8.771,31	11,18	98.063,23
2 S 01 100 15	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 1200 a 1400m c/carreg		m3	1.245,29	11,55	14.383,09
2 S 01 100 16	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 1400 a 1600m c/carreg		m3	726,95	12,12	8.810,65
2 S 01 100 17	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 1600 a 1800m c/carreg		m3	17.063,66	12,30	209.883,02
2 S 01 100 18	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 1800 a 2000m c/carreg		m3	1.177,17	13,04	15.350,31
2 S 01 100 19	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 2000 a 3000m c/carreg	m3	4.322,33	14,53	62.803,39	
MAT 1106	Cal hidratada CH - I	SINAPI 09-2017	m3	6.250,00	1.088,00	6.800.000,00
2 S 01 100 19	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 2000 a 3000m c/carreg	DNIT 106/2016-PE	m3	6.250,00	14,53	90.812,50
2 S 01 510 00	Compactação de aterros a 95% proctor normal		m3	100.000,00	3,23	323.000,00
2 S 01 511 00	Compactação de aterros a 100% proctor normal		m3	150.000,00	3,73	559.500,00
2 S 01 513 01	Compactação de material de "bota-fora"		m3	6.250,00	2,59	16.187,50
					TOTAL	10.147.054,30

PLANILHA ORÇAMENTÁRIA							
OBJETO:	SERVIÇO DE TERRAPLANAGEM ENVOLVENDO CORTE E ATERRO COM VOLUME TOTAL DE 250.000 M3 DE MOVIMENTO DE TERRA. A PLANILHA SIMULA TRÊS SITUAÇÕES: 0- TERRAPLANAGEM SEM ADIÇÃO DE ESTABILIZANTE; %- TERRAPLANAGEM COM ADIÇÃO DE AREIA COMO ESTABILIZANTE E %- TERRAPLANAGEM COM ADIÇÃO DE CAL HIDRATADA CH-I COMO ESTABILIZANTE.						
OBS:	O ATERRO SIMULADO É CONSTITUÍDO DE 50% DE MATERIAL EXPANSIVO						
CÓDIGO	DESCRIÇÃO	ESPECIF.	UND	QUANT.	PREÇO (R\$)		
		ADOTADA			UNIT.	TOTAL	
60%	TERRAPLANAGEM COM ADIÇÃO DE AREIA						
2 S 01 100 09	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 50 a 200m c/carreg	DNIT 106/2016-PE	m3	62.608,24	8,45	529.039,60	
2 S 01 100 10	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 200 a 400m c/carreg		m3	22.622,62	9,20	208.128,14	
2 S 01 100 11	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 400 a 600m c/carreg		m3	30.837,99	9,59	295.736,30	
2 S 01 100 12	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 600 a 800m c/carreg		m3	15.427,40	10,05	155.045,36	
2 S 01 100 13	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 800 a 1000m c/carreg		m3	19.591,25	10,76	210.801,81	
2 S 01 100 14	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 1000 a 1200m c/carreg		m3	6.297,35	11,18	70.404,37	
2 S 01 100 15	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 1200 a 1400m c/carreg		m3	894,05	11,55	10.326,32	
2 S 01 100 16	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 1400 a 1600m c/carreg		m3	521,91	12,12	6.325,59	
2 S 01 100 17	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 1600 a 1800m c/carreg		m3	12.250,83	12,30	150.685,24	
2 S 01 100 18	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 1800 a 2000m c/carreg		m3	845,15	13,04	11.020,74	
2 S 01 100 19	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 2000 a 3000m c/carreg		m3	3.103,21	14,53	45.089,61	
MAT 000367	Areia grossa - posto jazida/fornecedor (retirado na jazida,sem transporte)		SINAPI 09-2017	m3	75.000,00	60,00	4.500.000,00
2 S 01 100 19	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 2000 a 3000m c/carreg		DNIT 106/2016-PE	m3	75.000,00	14,53	1.089.750,00
2 S 01 510 00	Compactação de aterros a 95% proctor normal	m3		100.000,00	3,23	323.000,00	
2 S 01 511 00	Compactação de aterros a 100% proctor normal	m3		150.000,00	3,73	559.500,00	
2 S 01 513 01	Compactação de material de "bota-fora"	m3		75.000,00	2,59	194.250,00	
				TOTAL		8.359.103,09	
6%	TERRAPLANAGEM COM ADIÇÃO DE CAL						
2 S 01 100 09	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 50 a 200m c/carreg	DNIT 106/2016-PE	m3	86.757,13	8,45	733.097,73	
2 S 01 100 10	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 200 a 400m c/carreg		m3	31.348,49	9,20	288.406,14	
2 S 01 100 11	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 400 a 600m c/carreg		m3	42.732,64	9,59	409.806,01	
2 S 01 100 12	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 600 a 800m c/carreg		m3	21.377,97	10,05	214.848,57	
2 S 01 100 13	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 800 a 1000m c/carreg		m3	27.147,87	10,76	292.111,07	
2 S 01 100 14	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 1000 a 1200m c/carreg		m3	8.726,33	11,18	97.560,34	
2 S 01 100 15	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 1200 a 1400m c/carreg		m3	1.238,90	11,55	14.309,34	
2 S 01 100 16	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 1400 a 1600m c/carreg		m3	723,22	12,12	8.765,46	
2 S 01 100 17	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 1600 a 1800m c/carreg		m3	16.976,15	12,30	208.806,70	
2 S 01 100 18	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 1800 a 2000m c/carreg		m3	1.171,13	13,04	15.271,59	
2 S 01 100 19	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 2000 a 3000m c/carreg		m3	4.300,16	14,53	62.481,32	
MAT 1106	Cal hidratada CH - I		SINAPI 09-2017	m3	7.500,00	1.088,00	8.160.000,00
2 S 01 100 19	Esc. carga tr. mat 1ª c. DMT 2000 a 3000m c/carreg		DNIT 106/2016-PE	m3	7.500,00	14,53	108.975,00
2 S 01 510 00	Compactação de aterros a 95% proctor normal	m3		100.000,00	3,23	323.000,00	
2 S 01 511 00	Compactação de aterros a 100% proctor normal	m3		150.000,00	3,73	559.500,00	
2 S 01 513 01	Compactação de material de "bota-fora"	m3		7.500,00	2,59	19.425,00	
				TOTAL		11.516.364,28	

**APÊNDICE A – EXEMPLO COMPARATIVO SIMPLIFICADO DO
PERCENTUAL FINANCEIRO PARA UM ATERRO COMPACTADO COM
IDENTIFICAÇÃO DE 50% DE SOLO EXPANSIVO COM E SEM UTILIZAÇÃO
DE ESTABILIZANTES**

A.1 PLANILHA ORÇAMENTÁRIA