



CENTRO UNIVERSITÁRIO DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA E CIÊNCIA SOCIAIS APLICADAS – FATECS
ENGENHARIA CIVIL

SONNY ALBERT AMORIM DA SILVA

MATRÍCULA: 2131557/0

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO SOLO LATERÍTICO DE BRASÍLIA
MISTURADO COM A FRAÇÃO DE VERMICULITA EXPANDIDA NO
PREENCHIMENTO DE CAVAS EM REGIÕES URBANAS**

BRASÍLIA – DF

2017

SONNY ALBERT AMORIM DA SILVA

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO SOLO LATERÍTICO DE BRASÍLIA
MISTURADO COM A FRAÇÃO DE VERMICULITA NO PREENCHIMENTO DE
CAVAS EM REGIÕES URBANAS**

Monografia apresentada como requisito para conclusão do curso de Bacharelado em Engenharia Civil pela Faculdade de Tecnologia e Ciência Sociais Aplicadas do Centro Universitário de Brasília - UniCEUB.

Orientadora: Eng^a Civil Neusa M. B. Mota, D.Sc.

BRASÍLIA – DF

2017

SONNY ALBERT AMORIM DA SILVA

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO SOLO LATERÍTICO DE BRASÍLIA
MISTURADO COM A FRAÇÃO DE VERMICULITA NO PREENCHIMENTO DE
CAVAS EM REGIÕES URBANAS**

Monografia apresentada como requisito para conclusão do curso de Bacharelado em Engenharia Civil pela Faculdade de Tecnologia e Ciência Sociais Aplicadas do Centro Universitário de Brasília - UniCEUB.

Orientadora: Eng^a Civil Neusa M. B. Mota, D.Sc.

Brasília, 2017.

Banca Examinadora

Eng^a Civil: Neusa Maria Bezerra Mota, D.Sc. UniCEUB

Orientadora

Eng^o. Civil: Jairo Furtado Nogueira, M.Sc. UniCEUB

Examinador Interno

Eng^o. Civil : Bruno Sousa Almeida, Esp. DER/DF.

Examinador Externo

Dedico este trabalho a minha mãe Rosângela Amorim da Silva.

“Ninguém te impõe limites, barreiras são criadas por você mesmo, supere-as e supere-se.”

Marcos Antonio Soares

AGRADECIMENTOS

A minha amada mãe, Rosângela Amorim da Silva, pelas conversas e incentivos desde criança para batalhar e nunca desistir dos meus objetivos e sonhos.

A minha tia avó, Maria das Graças, pela paciência e apoio incondicional para que eu tivesse tempo e me dedicasse aos estudos em casa.

A minha orientadora, Neusa Maria Bezerra Mota, pela amizade, dedicação, competência profissional e vida, pois é um exemplo de pessoa.

Aos meus professores e amigos especialmente, Jaime Ante, Jairo Furtado, Jorge Oliveira, Maruska Silva e Sandra Fernandez, pelo apoio, incentivo, paciência, dedicação e por serem exemplos de professores.

Aos meus amigos e funcionários do laboratório de geotecnia, materiais e topografia, Vanilson, Wallace e Dida, pelo apoio nos ensaios, paciência e muitos dias de gargalhadas no laboratório.

Ao Ministério da Educação, pelo programa de Financiamento Estudantil (FIES). Sem esse programa não haveria essa oportunidade de adquirir tamanha aprendizagem e conquista.

Ao Centro Universitário de Brasília, por proporcionar qualidade de ensino e excelência no suporte aos alunos.

MUITO OBRIGADO!

RESUMO

A construção civil é um dos setores desenvolvidos pela engenharia que requer alta demanda de novos processos, tecnologias e métodos, capazes de gerar resultados melhores para as inúmeras situações em que se manifestam. As cavas urbanas são cada vez mais frequentes, em geral, devido à implantação de empreendimentos comerciais e residenciais com mais de um subsolo, obras viárias, ferroviárias, e metroviárias que, buscam um melhor aproveitamento das áreas mais nobres das grandes cidades. Em termos geotécnicos o reaterro dessas cavas, com o solo do próprio local, em especial na região do Distrito Federal, solos lateríticos, podem representar esforços solicitantes adicionais às estruturas e fundações e levar a um comprometimento do desempenho técnico e funcional dessas obras, comprometendo a eficiência e economia do empreendimento. Nesse sentido, este trabalho apresenta uma alternativa para preenchimento de cavas urbanas, com mistura de menor peso específico comparado ao solo natural, a partir da mistura de solo e vermiculita expandida, tida como um componente alternativo para a engenharia geotécnica em função de sua densidade relativamente baixa e por ser um material, inorgânico. Foram realizados ensaios de caracterização dos materiais, classificação MCT, determinação dos teores de vermiculita expandida na mistura com a massa de solo seco, compactação Proctor, resistência ao cisalhamento direto, teste de umedecimento, absorção d'água e expansibilidade. As misturas ensaiadas foram para os teores de 6%, 12,5%, 19% e, 25% de vermiculita em relação à massa de solo seco. Dos resultados obtidos na pesquisa foi possível determinar que o solo-vermiculita como material alternativo na recomposição de cavas urbanas reduziu 20% do ângulo de atrito e dobrou a coesão no estado saturado e, gerou reduções significativas no peso específico seco máximo dos materiais, aproximadamente, 29% para o solo laterítico com adição de 25% de vermiculita expandida em peso com relação ao solo em estado natural, permitindo realizar preenchimento de cavas urbanas com material mais leve não onerando o custo final das estruturas.

Palavras-chave: Preenchimento de cavas. Recomposição de cavas. Vermiculita expandida. Redução do peso específico.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	i
LISTA DE TABELAS	iv
LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS	v
LISTA DE SÍMBOLOS	vi
1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS	3
2.1 OBJETIVO GERAL	3
2.2 objetivos específicos	3
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	4
3.1 SOLOS LATERÍTICOS NO BRASIL	4
3.1.1 Aspectos físicos dos solos de Brasília/DF	6
3.2 VERMICULITA EXPANDIDA	7
3.2.1 Processamento	8
3.2.2 Características	10
3.3 MELHORAMENTO DE SOLOS UTILIZANDO OUTROS MATERIAIS.....	11
3.4 MELHORAMENTO DE SOLOS UTILIZANDO VERMICULITA EXPANDIDA.....	17
4 MATERIAIS E METÓDOS	23
4.1 MATERIAIS.....	23
4.1.1 Solo laterítico	23
4.1.2 Vermiculita expandida	24
4.2 MÉTODOS.....	25
4.2.1 Caracterização do solo	25
4.2.2 Vermiculita expandida	32
4.2.3 Mistura solo-vermiculita expandida	33
4.2.4 Cisalhamento direto.....	34
4.2.5 Expansão.....	36

4.2.6	Teste de umedecimento	36
4.2.7	Classificação de solos tropicais MCT	37
5	APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	39
5.1	CARACTERIZAÇÃO DO SOLO.....	39
5.1.1	Ensaio de granulometria.....	39
5.1.2	Limites de Atterberg.....	40
5.1.3	Massa específica real dos grãos	41
5.1.4	Classificação MCT.....	41
5.2	CARACTERIZAÇÃO DA VERMICULITA EXPANDIDA.....	41
5.2.1	Granulometria	41
5.2.2	Massa específica real dos grãos	42
5.2.3	Mistura solo-vermiculita	42
5.2.4	Teste de absorção de água da vermiculita expandida	43
5.3	COMPACTAÇÃO PROCTOR.....	43
5.4	TESTE DE UMEDECIMENTO	48
5.5	AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DIRETO.....	50
5.5.1	Curvas de cisalhamento direto (estado após o teste de umedecimento).....	50
5.5.2	Curvas de cisalhamento direto (estado inundado)	52
5.5.3	Envoltórias de Mohr-Coulomb (estado após o teste de umedecimento).....	54
5.5.4	Envoltórias de Mohr-Coulomb (estado inundado)	55
5.5.5	Índice de vazios, grau de saturação e porosidade	58
5.6	AVALIAÇÃO DA EXPANSÃO	59
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS .	61
6.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS	61
6.2	SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	62
7	REFERÊNCIAS	63

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 Distribuição das coberturas lateríticas no Brasil.	4
Figura 3.2. Mineral de Vermiculita.....	8
Figura 3.3. Obtenção de vermiculita pelo processo seco ou úmido.....	9
Figura 3.4. Comparação entre o tamanho de amostras de vermiculita antes e após o processo de expansão.	10
Figura 3.5. Curvas de compactação do solo com e sem adição de cal hidratada. ...	12
Figura 3.6. Envoltória de Mohr-Coulomb para solo com e sem adição de cal hidratada.	13
Figura 3.7. Curvas de compactação do solo com e sem adição de cimento.	15
Figura 3.8. Amostra de solo-pneu com teor de 3% de borracha.....	16
Figura 3.9. Amostra de vermiculita expandida.	17
Figura 3.10. Resultado dos testes de secagem ao ar.....	18
Figura 3.11. Teste de umedecimento.....	18
Figura 3.12. Resultado do teste de umedecimento e secagem.....	19
Figura 3.13. Resultado do teste de imersão em água.	19
Figura 3.14. Resultado da curva de retenção com ajuste pelo método de Duplo Van Genuchten.....	20
Figura 3.15. Envoltórias de resistência ao cisalhamento para o solo com e sem adição de vermiculita expandida.	21
Figura 3.16. Contração de amostras com e sem adição de vermiculita expandida: a) Solo com adição de 2,28% de vermiculita; b) Solo sem adição de vermiculita.	21
Figura 4.1. Armazenamento do solo para a pesquisa.....	24
Figura 4.2. Amostra de solo.	24
Figura 4.3. Porção de vermiculita expandida.	25
Figura 4.4. Vermiculita expandida conforme adquirido.	25
Figura 4.5. Materiais e equipamentos utilizados no ensaio de sedimentação das amostras de vermiculita expandida e solo.	26
Figura 4.6 Limites de Atterberg dos solos.....	26
Figura 4.7. Limites de Atterberg: (a) Ensaio de limite de liquidez; (b) Ensaio de limite de plasticidade.	27
Figura 4.8. Pentapicnometro 5200E.....	29

Figura 4.9. Balanças digitais de precisão. a) Balança digital de precisão 0,001 g; b) Balança digital de precisão 0,01 g; c) Balança digital de precisão 0,1 g.	30
Figura 4.10. Materiais e equipamentos utilizados no ensaio de compactação.	31
Figura 4.11. Sequência de ensaio de compactação: a) Mistura dos materiais; b) Preservação da umidade dos materiais; c) Arrasamento da ultima camada de solo; d) Arrasamento final do corpo de prova.	32
Figura 4.12. Teste de absorção de água para vermiculita expandida.	33
Figura 4.13. Moldagem de um corpo de prova para realização do ensaio de cisalhamento direto: a) Centralizando o anel para moldagem; b) Corte do corpo de prova; c) Corpo de prova após moldagem parte superior; d) Corpo de prova após moldagem parte inferior.	35
Figura 4.14. Máquina de ensaio de cisalhamento direto saturado.....	35
Figura 4.15. Corpos de prova submersos por 96 horas.	36
Figura 4.16. Teste de umedecimento dos corpos de prova.	37
Figura 4.17. Ensaio classificação MCT.	38
Figura 5.1. Curvas granulométricas do solo puro com e sem defloculante.	39
Figura 5.2. Ensaio de limite de liquidez.....	40
Figura 5.3. Ensaio de limite de plasticidade.....	41
Figura 5.4. Curva granulométrica da vermiculita expandida.	42
Figura 5.5. Curvas de compactação com e sem adição de vermiculita.	43
Figura 5.6. Tendência das curvas de compactação (pontos ótimos todos os teores).	44
Figura 5.7. Amostras com e sem adição de vermiculita expandida: a) SN; b) S+6%V; c) S+12,5%V; d) S+19%V; e) S+25%V.....	45
Figura 5.8. Redução do peso específico seco máximo versus o teor de material (todos os teores).	46
Figura 5.9. Redução do peso específico seco versus o teor de material (todos os teores).	47
Figura 5.10. Verificação das densidades (todos os teores).	47
Figura 5.11. Ensaio de umedecimento das amostras.	49
Figura 5.12. Curvas de resistência ao cisalhamento após o teste de umedecimento (SN).	51
Figura 5.13. Curvas de resistência ao cisalhamento após o teste de umedecimento (S+25%V).	51

Figura 5.14. Curvas de resistência ao cisalhamento (SN).	52
Figura 5.15. Curvas de resistência ao cisalhamento (S+6%V).	52
Figura 5.16. Curvas de resistência ao cisalhamento (S+12,5%V).	53
Figura 5.17. Curvas de resistência ao cisalhamento (S+19%V).	53
Figura 5.18. Curvas de resistência ao cisalhamento (S+25%V).	54
Figura 5.19. Envoltórias de Mohr-Coulomb ensaio após o teste de umedecimento para o solo com e sem adição de vermiculita.	55
Figura 5.20. Envoltórias de Mohr-Coulomb para o solo com e sem adição de vermiculita.	56
Figura 5.21. Ensaio de expansibilidade das amostras.	60

LISTAS DE TABELAS

Tabela 3.1. Produção de vermiculita não e expandida entre 1994 a 2007.	7
Tabela 3.2. Classificação granulométrica de padrões de concentrados de vermiculita natural.	8
Tabela 3.3. Densidade específica dos grãos para o solo natural e diversos teores de cal hidratada.	12
Tabela 3.4. Peso específico seco máximo e umidade ótima do solo com e sem adição de cal hidratada.	12
Tabela 3.5. Ângulo de atrito e coesão para o solo com e sem adição de cal hidratada.	14
Tabela 3.6. Peso específico seco máximo e umidade ótima do solo com e sem adição de cimento.	14
Tabela 3.7. Peso específico seco máximo e umidade ótima do solo com e sem adição de borracha reciclada.	16
Tabela 4.1. Símbolos dos materiais utilizados na pesquisa.	34
Tabela 5.1. Análise granulométrica do solo com e sem defloculante.	39
Tabela 5.2. Limites de Atterberg para o solo estudado.	40
Tabela 5.3. Massa específica real dos grãos dos materiais.	42
Tabela 5.4. Peso específico seco máximo e umidade ótima dos materiais.	45
Tabela 5.5. Pesos específicos aparentes secos e umidades de compactação com e sem adição de vermiculita.	46
Tabela 5.6. Resultados do ensaio do teste de umedecimento.	49
Tabela 5.7. Controle de temperatura e umidade ambiente.	49
Tabela 5.9 Parâmetros obtidos de resistência ao cisalhamento direto inundado.	56
Tabela 5.10. Índice de vazios, grau de saturação e porosidade.	58

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i> (Sociedade Americana para Testes e Materiais)
CETEM	Centro de Tecnologia Mineral
Com defloc.	Com defloculante
DF	Distrito Federal
DNPM	Departamento Nacional da Produção Mineral
EMBRAPA	Empresa Brasileira de pesquisa Agropecuária
ISC	Índice de Suporte Califórnia
NBR	Norma Brasileira Registrada
Sem defloc.	Sem defloculante
SUCS	Sistema Unificado de Classificação de Solos
SINPRO	Sindicado dos Professores
UnB	Universidade de Brasília
UniCEUB	Centro Universitário de Brasília

LISTA DE SÍMBOLOS

e	Índice de vazios
D₅₀	Diâmetro correspondente a 50% que passa em peso
CL	Argilo siltoso
Cb	Cambiossolo
c'	Coesão
cm/s	Centímetro por segundo
G_s_{mist}	Massa específica real dos grãos da mistura
G_s	Massa específica real dos grãos
G_s_{solo}	Massa específica real dos grãos de solo
G_s_{vermiculita}	Massa específica real dos grãos de vermiculita
g/cm³	Gramas por centímetros cúbicos
IP	Índice de Plasticidade
kPa	Kilo Pascal
kN/m³	Kilo Newton por metro cúbico
Kg/m³	Kilo grama por metro cúbico
LE	Latossolo vermelho-escuro
LV	Latossolo vermelho-amarelo
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
ML	Silte argilo-arenoso de baixa compressibilidade
MH	Silte elástico
Mg	Massa retida em cada peneira
Mh	Massa do material úmido submetido a sedimentação
mL	Mililitro

MPA	Mega Pascal
n	Porosidade
Psi	Libra-força por polegada quadrada
pH	Escala de uma solução
Qs	Porcentagem de material em suspensão no instante da leitura do densímetro
SN	Solo Natural
S+6%V	Solo com adição de 6% de vermiculita expandida
S+12,5%V	Solo com adição de 12,5% de vermiculita expandida
S+19%V	Solo com adição de 19% de vermiculita expandida
S+25%V	Solo com adição de 25% de vermiculita expandida
S+30%V	Solo com adição de 30% de vermiculita expandida
100%V	100% de vermiculita expandida e zero de solo
Sr	Grau de saturação
$w_{\text{ótim}}$	Umidade ótima
$w(\%)$	Teor de umidade
φ'	Ângulo de atrito interno
$Y_{\text{dmáx}}$	Peso específico seco máximo
Y_d	Peso específico aparente
τ	Tensão cisalhante
σ_n	Tensão normal
%solo	Teor de solo da mistura
%vermiculita	Teor de vermiculita expandida granular da mistura
%mat pass.	Porcentagem de materiais que passa
%mat ret.	Porcentagem de materiais que fica retido

1 INTRODUÇÃO

Na engenharia geotécnica existem diversas propostas para o melhoramento de solos com o intuito de elevar sua resistência mecânica e reduzir seu peso específico, a fim de encontrar outro meio alternativo que proporcione ao mesmo tempo eficiência e economia.

Por exemplo, a realização de uma compactação de preenchimento de cava com solo natural pode proporcionar um peso específico expressivo e, dependendo do tipo de obra, se torna necessário melhorar a resistência do mesmo. Para tal, existem diversos estudos e obras executadas com cimento ou cal hidratado, por exemplo, que proporcionam densidades elevadas à medida que se aumenta suas porcentagens de adição.

Qualquer que seja o peso da estrutura, no entanto, existem esforços internos e externos atuando, cujos valores dependem do tipo de material a ser trabalhado. Como resultado, haverá um acréscimo no custo final da obra e, por este motivo, é essencial o desenvolvimento de estudos com materiais menos densos.

Um material interessante como opção para a recomposição de cavas é a vermiculita expandida, que apresenta densidade relativamente baixa perante outros materiais, como o cimento, a cal e a borracha, por exemplo.

A vermiculita é produzida em escala em algumas regiões no mundo, como África do Sul, Estados Unidos, China e Brasil. Sua comercialização pode se dar tanto na forma expandida ou concentrada, dependendo da finalidade de destino. Na engenharia geotécnica, a vermiculita é utilizada após o processo de transformação da matéria, resultando em vermiculita expandida, que pode ser empregada como agregado na mistura de solos, como o presente na região de Brasília – DF.

Tendo em vista o cenário descrito anteriormente, estabeleceu-se na presente pesquisa uma metodologia laboratorial com adição de vermiculita expandida para ser utilizado como material alternativo para mistura com solos lateríticos, a fim de utilizá-lo como material de preenchimento de cavas em regiões

urbanas. As avaliações incluíram ensaios de caracterização física, determinação dos teores de vermiculita expandida na mistura com a massa de solo seco, compactação Proctor, resistência ao cisalhamento direto, teste de umedecimento, absorção d'água e expansibilidade para o solo com e sem adição de vermiculita expandida.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Analisar o comportamento mecânico do solo laterítico de Brasília ao adicionar uma fração de vermiculita na recomposição de solo em cavas em regiões urbanas.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar o comportamento mecânico do solo com e sem a adição de vermiculita expandida;
- Determinar os teores da fração de vermiculita a ser misturado com o solo laterítico;
- Determinar e avaliar os parâmetros mecânicos do solo-vermiculita, através da realização de ensaios de cisalhamento direto saturado;
- Determinar e avaliar os parâmetros mecânicos de resistência ao cisalhamento direto do solo-vermiculita logo após o teste de umedecimento dos corpos de prova, após o período de 21 dias, e também, para simular a possível presença de lençol freático próximo de regiões reaterradas e suas consequências na durabilidade das misturas.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

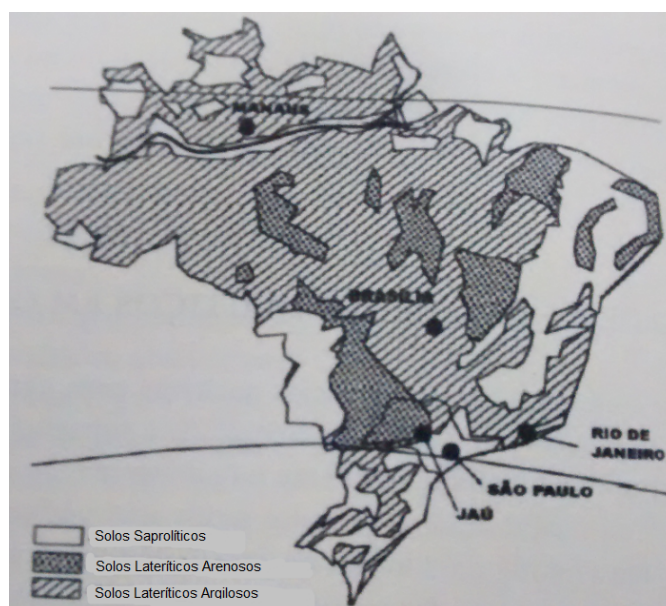
3.1 SOLOS LATERÍTICOS NO BRASIL

Como ponto de partida, deve-se entender a respeito do perfil geológico do solo para compreender melhor sobre o comportamento geotécnico em decorrência de sua profundidade.

Figura 3.1 apresenta a distribuição dos tipos de solos presentes no Brasil, segundo Chioffi (2013), os solos tropicais (lateríticos) são resultados da decomposição e desintegração da rocha sã pelos agentes atmosféricos. Divididos em dois tipos: residuais e transportados.

Os solos residuais dependem do tipo e da composição mineralógica da rocha original a qual lhe deu origem, sendo subdividido em maduro e jovem. Como não existe uma mudança direta de uma camada para outra, é possível observar uma passagem gradativa permitindo separar em pelo menos quatro faixas abaixo do solo propriamente dito: solo de alteração, rocha alterada, rocha fraturada e rocha sã (Chioffi, 2013).

Figura 3.1 Distribuição das coberturas lateríticas no Brasil.



Fonte: Villibor *et al.*, 2000 apud Carvalho, 2009.

Assim, o solo de alteração possui pequenos traços da rocha matriz, por exemplo: linhas incipientes de estruturas ou minerais não decompostos, enquanto a

rocha alterada é um material que lembra a rocha no seu aspecto, preservando parte da sua estrutura, textura e de seus minerais, porém com um grau de dureza ou resistência inferior ao da rocha sã. A rocha sã representa uma rocha inalterada (Chiossi, 2013).

Como complemento ao assunto, Budhu (2015) apresentou os tipos de materiais geológicos que passam pelo processo de intemperismo físico e químico das rochas. O intemperismo físico trata-se da alteração das dimensões sem a modificação da composição inicial da rocha. Em contrapartida, no intemperismo químico, o solo sofre a redução das dimensões, juntamente com a alteração química da rocha de origem, pelo processo de saturação, carbonatação e oxidação do solo.

Segundo Budhu (2015), o solo que passa pelo processo de intemperismo e fica no mesmo local que sofreu a ação é denominado solo residual e aquele que fora transportado pela água é chamado de solo fluvial (aluvionares). Desse modo, a estrutura do solo depende do meio ambiente em que foi transportado e também no qual ocorreu o processo eletroquímico.

Budhu (2015) relata ainda que existem dois tipos comuns de estruturas de solos, tais como: flocculados e dispersos, de maneira que altera permanentemente de forma única a estrutura do solo.

- Flocculados: são estruturas formadas em áreas que possuem água doce, assim, as partículas tendem a se orientar de forma perpendicular, uma em relação à outra; e
- Dispersos: são estruturas formadas em áreas que possuem água salina, que possuem diversas partículas com orientações paralelas.

O comportamento mecânico do solo irá depender, portanto, do tipo de mineral predominante no solo. Os minerais são materiais cristalinos que formam os sólidos que compõem os solos.

Budhu (2015) relata ainda que a proporção de cada constituinte (sólido, líquido e ar), o tamanho das partículas e a sua distribuição granulométrica dentro da massa de solo podem indicar o uso apropriado do material e como resultado indicar qualitativamente a capacidade de suporte do material.

3.1.1 Aspectos físicos dos solos de Brasília/DF

Lima (2003) estudou o comportamento dos solos de Brasília para verificar a degradação físico-química e mineralógica de maciços junto às voçorocas. Em seu trabalho, relata que os solos de Brasília apresentam características de solo poroso com espessuras que podem chegar até 10 m, apresentando comportamento geotécnico bastante distinto em relação a outras regiões.

Segundo Martins (1998) apud Lima (2003), as classes de solos de Brasília são denominadas de latossolo vermelho-escuro – (LE), latossolo vermelho-amarelo – (LV) e cambissolo - (Cb) que recobrem aproximadamente 80% do Distrito Federal – (DF).

Lima (2003) descreveu de modo simples as características dessas classes na região, conforme a seguir:

- Latossolos (LE e LV): são resultados do alto grau de intemperização e lixiviação, formando uma estrutura bastante porosa, metaestável, indicando alto índice de vazios onde apresenta baixo peso específico. Os latossolos vermelho-escuro abrangem cerca de 54,47% do território do DF e os latossolos vermelho-amarelo correspondem a 15,84%, formados a partir de rochas metamórficas, como as ardósias, metarritmitos e quartzitos. Apresentando um horizonte B no qual consiste de uma mistura de óxidos hidratados de ferro e alumínio com proporções de argilominerais e minerais silicatos como o quartzo. Segundo a EMBRAPA (1978) apud Lima (2003), a diferença entre os latossolos vermelho-escuro e latossolo vermelho-amarelo está relacionada ao horizonte B, que varia conforme o tipo de óxido de ferro, presente.
- Cambiossolos (Cb): são solos que, por possuírem horizonte B incipiente, apresentam certo grau de desenvolvimento, no entanto não suficiente para decompor totalmente os minerais primários de fácil intemperização. Onde horizontes A e B apresentam 1 m de espessura, aproximadamente, e apresentam cerca de 31% do território do DF (Kertzman & Diniz, 1995 apud Lima, 2003).
- Solos Hidromórficos: são solos desenvolvidos sob a influência do lençol freático próximo ou na superfície, evidenciado pela presença de

matéria orgânica e pela presença de cores cinzentas, pois são sintomas de redução de ferro proporcionando problemas na capacidade de suporte e drenagem, contam com 4,16% da área do DF (EMBRAPA, 1978 apud Lima, 2003).

3.2 VERMICULITA EXPANDIDA

Segundo Sznelwar & Scalabrin (2009), a utilização da vermiculita se originou nos Estados Unidos da América. A comercialização do material pode ser tanto em concentrado (vermiculita não expandida) como também em forma expandida.

Assim, as aplicações são em diversos setores, como:

- Na agricultura;
- Na siderurgia; e
- Na construção civil;

Na construção civil, a utilização de vermiculita contribui na fabricação de elementos estruturais mais leves, propiciando também conforto térmico e acústico, bem como a redução de custos no setor. Desse modo, pode-se dizer que propicia melhoria significativa na qualidade de moradias e em suas instalações.

O comércio mundial de vermiculita está em torno de US\$ 200 milhões ao ano. No Brasil, a exploração começou na década de 50, em São Paulo – Tatuí, onde alavancou em 1971 com entrada da mina de São Luiz de Montes Belos em Goiás. O Brasil é o quinto produtor mundial, com 15% da produção mundial e detém 10% das reservas declaradas. Os fatores decisivos para a comercialização do material foram a informação, o marketing, a tecnologia e o capital, segundo Sznelwar & Scalabrin (2009). A Tabela 3.1 apresenta o levantamento mais recente sobre a produção de vermiculita não e expandida no Brasil (Sznelwar & Scalabrin, 2009).

Tabela 3.1. Produção de vermiculita não e expandida entre 1994 a 2007.

Produção/ano	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
Vermiculita concentrada (t)	16.000	18.806	21.999	23.000	24.300	23.400	24.074	21.464	22.577	26.055	25.103	24.191	19.279	18.952
Vermiculita expandida (t)	4.000	3.826	4.000	5.000	4.200	3.100	3.100	3.100	12.812	10.520	11.000	8.148	8.105	9.000

Fonte: Sumário Mineral - DNPM (Departamento Nacional da Produção Mineral) e Mineraldata - CETEM (Centro de Tecnologia Mineral) apud Sznelwar & Scalabrin, 2009.

Vieira (2013) relata que a vermiculita é um argilomineral pertencente à família das micáceas, constituída por silicatos hidrato de magnésio, como também, ferro e alumínio, a seguir é apresentado um grão do mineral vermiculita (Figura 3.2).

Figura 3.2. Mineral de Vermiculita.



Fonte: Curbelo, 2002 apud Vieira, 2013.

3.2.1 Processamento

Curbelo (2002) apud Vieira (2013) relata que a vermiculita pode ser encontrada com facilidade em rochas ígneas; principalmente em rochas que apresentam feldspato, granito e sienito. A matéria prima é de fácil acesso em regiões montanhosas, com extração a céu aberto. A obtenção pode ser através de mecanismos semi ou totalmente mecanizada.

Após a extração da vermiculita, o material é lavrado na própria mina, onde é realizado o peneiramento das amostras após a secagem ao ar livre, com o intuito de classifica-lo granulometricamente, conforme a Tabela 3.2.

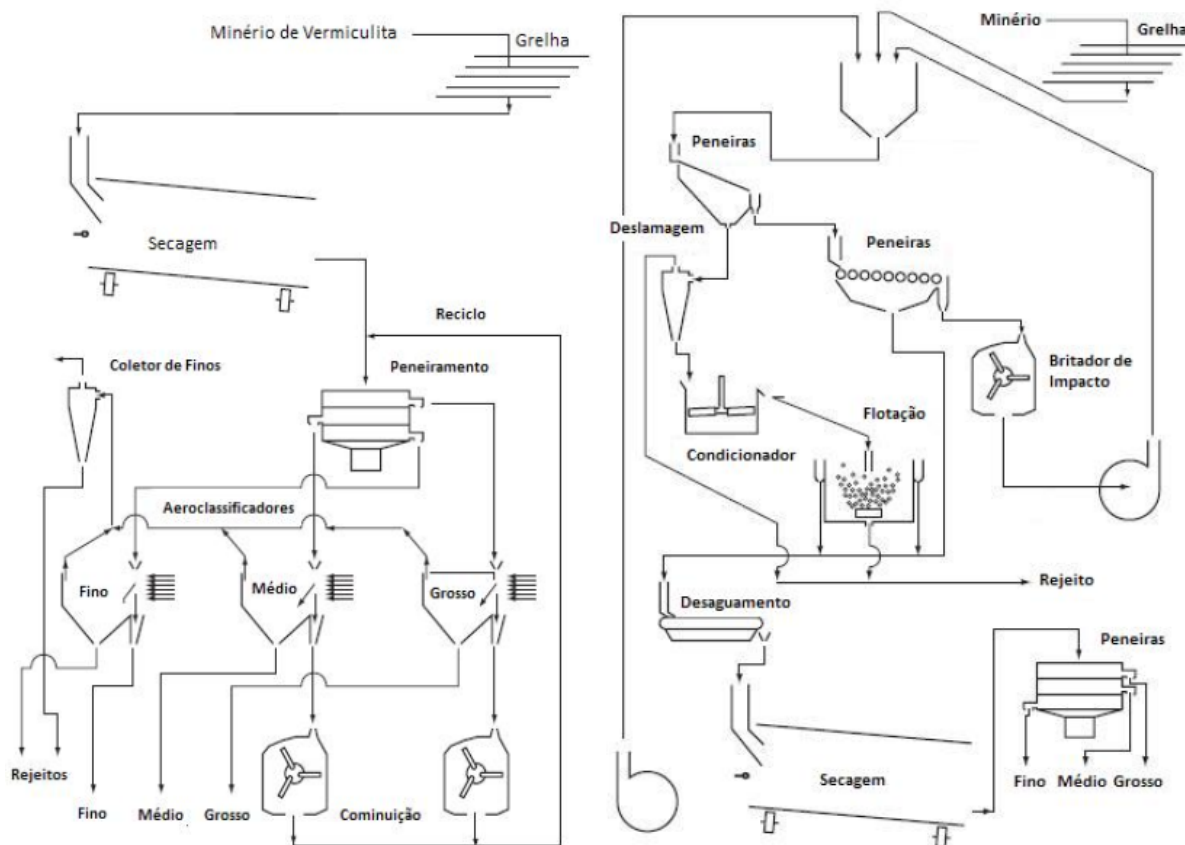
Tabela 3.2. Classificação granulométrica de padrões de concentrados de vermiculita natural.

Padrão Internacional	Tamanho (mm)		Padrão Americano	Tamanho (mm)		Padrão Brasileiro	Tamanho (mm)	
Grossa	-8,00	2,80	1	-7,00	3,33	-		
Média	-4,00	1,40	2	-3,50	1,75	Média	55-95%>	2,4
Fina	-2,00	0,71	3	-2,00	0,60	Fina	65-95%>	1,2
Superfina	-1,00	0,36	4	-0,85	0,21	Superfina	70-95%>	0,6
Micrometro	-0,71	0,25	5	-0,30		Micrometro	80-100%>	0,3

Fonte: Reis, 2002 apud Ugarte *et al.*, 2005 apud Vieira, 2013.

O processo de obtenção da vermiculita passa por diversas etapas até chegar ao produto final. A Figura 3.3 apresenta dois processos de obtenção do material a seco ou úmido.

Figura 3.3. Obtenção de vermiculita pelo processo seco ou úmido.



Fonte: Hindman, 2006 apud Szelwar e Scalabrin, 2009.

Segundo Hindman (2006) apud Szelwar & Scalabrin (2009), a obtenção a seco é o método mais utilizado no Brasil, assim necessita de uma secagem previa antes da separação do material, em que se mantém exposto à secagem ao ar livre até chegar à umidade de 4%, que é a ideal para o processo de moagem através dos moinhos de martelo, sendo, posteriormente, peneirado para se obter diferentes frações de grãos.

Em seguida, a classificação dos materiais é feita por separadores pneumáticos ou mesas vibratórias. Se houver fração fina (classificada como pó) abaixo de 5μ , e é descartada do sistema por correia transportadora, podendo se empregar mecanismos magnéticos ou eletrostáticos quando existir, por exemplo, biotita de minério.

A obtenção pelo processo úmido não é tão aplicada, mas é utilizada em casos em que o teor de vermiculita no minério bruto seja baixo ou quando houver presença de contaminantes. Nesse processo úmido, utilizam-se métodos de flotação da fração fina com granulometria menor que 1 mm e outros métodos de beneficiamento baseados na morfologia ou densidade dos grãos (Hindman, 2006 apud Sznelwar & Scalabrin, 2009).

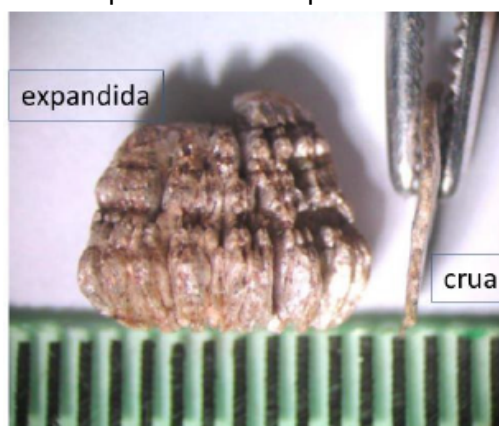
3.2.2 Características

A vermiculita em estado natural é formada pela superposição das lamínulas, quando são submetidas a altas temperaturas que sofrem o processo de expansão, podendo chegar até doze vezes o tamanho de seu volume original.

O processo de transformação da matéria é realizado a temperatura de 800 a 1100 °C, passando de uma estrutura lamelar para flocos. A vermiculita possui uma densidade de 640 a 960 Kg/m³ antes de ser levada a altas temperaturas; depois de submetida, pode obter densidade de 56 a 192 Kg/m³, podendo ter expansão de 90% do volume (Vieira, 2013).

A Figura 3.4 apresenta a comparação de duas amostras de vermiculita, antes e depois de passar pelo processo de expansão (Ugarte *et al.*, 2005 apud Vieira, 2013).

Figura 3.4. Comparação entre o tamanho de amostras de vermiculita antes e após o processo de expansão.



Fonte: Ugarte *et al.*, 2005 apud Vieira, 2013.

A seguir, serão apresentadas as principais características do material (Fonte: <http://www.refratil.com.br/produto/vermiculita-expandida>):

- Baixa condutividade acústica: pode chegar até 62% de redução;
- Possui grande capacidade de retenção de água, podendo chegar a cinco vezes o tamanho do grão;
- Material não tóxico – silicato mineral inerte;
- Não abrasivo – na escala de Mohs possui dureza de 1,5;
- Inibe raízes e algas;
- É um material estável a pressão hidrostática negativa, devido aos milhões de poros microscópicos, que deixa a água passar através de seus poros; e
- É um material inorgânico que apresenta pH neutro de 7.

3.3 MELHORAMENTO DE SOLOS UTILIZANDO OUTROS MATERIAIS

Na área da engenharia civil é possível realizar a mistura de solo com diversos materiais para melhorar as propriedades mecânicas do solo.

Guérios (2013) estudou o comportamento do solo misturado com cal hidratada com a finalidade de utilizar tal composto na estabilização de sub-base de pavimento urbano. Realizou ensaios de compactação Proctor Normal, esforço de compressão, capacidade de suporte e resistência ao cisalhamento direto (com as energias de 50 kPa, 100 kPa e 200 kPa) e, posteriormente, determinou os teores de 0%, 2%, 5% e 10% de cal em pó. Tais porcentagens foram determinadas devido aos problemas de trincas provenientes do aumento excessivo da cal hidratada na mistura causando enrijecimento do solo.

Os ensaios de densidade específica dos grãos para o solo natural e para os distintos teores de cal são apresentados conforme a Tabela 3.3 e a densidade aumenta conforme o acréscimo do teor de cal na mistura. A Tabela 3.4 apresenta o peso específico seco máximo e a umidade ótima obtidas na pesquisa após o ensaio de compactação.

Tabela 3.3. Densidade específica dos grãos para o solo natural e diversos teores de cal hidratada.

Material	
Gs Solo natural (g/cm ³)	2,435
Gs Solo + 2% cal (g/cm ³)	2,435
Gs Solo + 5% cal (g/cm ³)	2,462
Gs Solo + 10% cal (g/cm ³)	2,707

Fonte: Guérios, 2013.

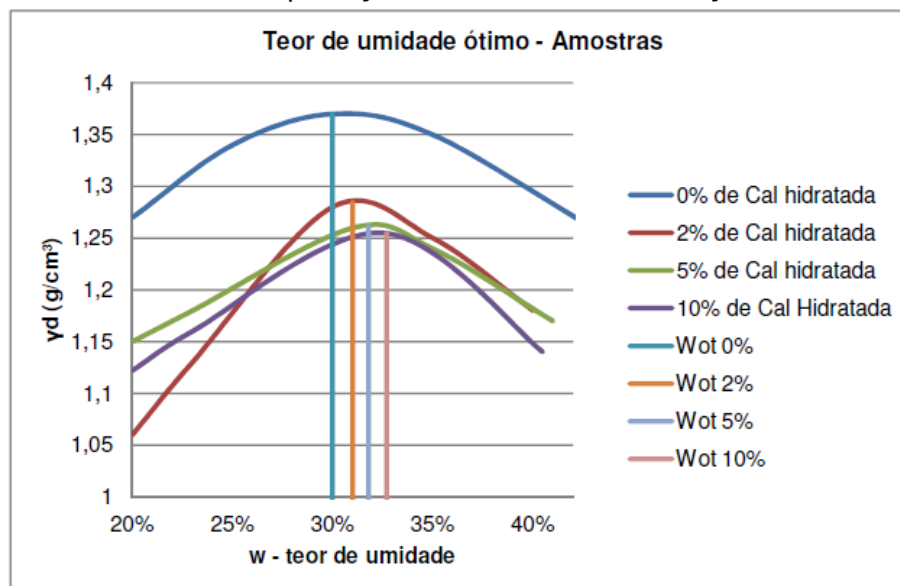
Tabela 3.4. Peso específico seco máximo e umidade ótima do solo com e sem adição de cal hidratada.

Material	Y _{dmáx} (kN/m ³)	W _{ótím} (%)
Solo natural	13,43	30
Solo + 2% cal	12,55	31
Solo + 5% cal	12,36	32
Solo + 10% cal	12,26	33

Fonte: Guérios, 2013.

A Figura 3.5 apresenta as curvas de compactação do solo com e sem adição de cal hidratada. Observa-se que, quanto maior for o teor de cal hidratada na mistura, maiores acréscimos de água se tornam necessários (Guérios, 2013).

Figura 3.5. Curvas de compactação do solo com e sem adição de cal hidratada.

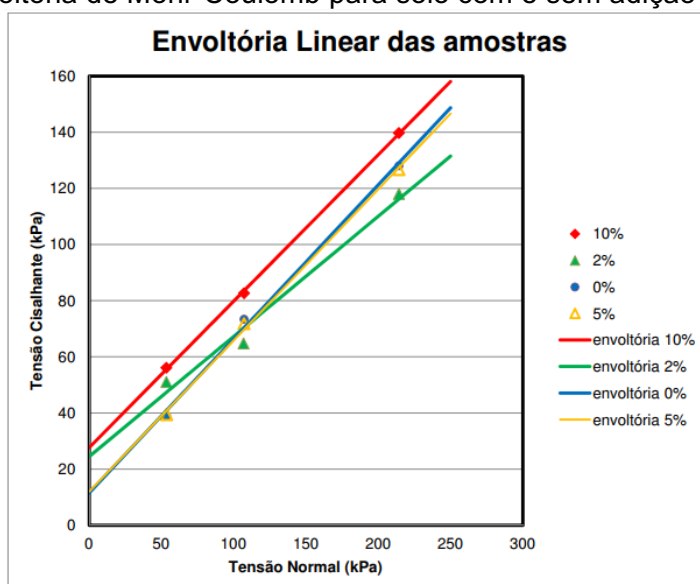


Fonte: Guérios, 2013.

A Figura 3.6 exibe os resultados da envoltória de Mohr-Coulomb para o solo com e sem mistura de cal. Pode-se notar que as misturas de 0% e 5% quase não apresentam diferenças nos resultados de cisalhamento direto. Logo, os melhores resultados foram para adição de 10% de cal, em que o composto ganha resistência devido à reação pozolânica na mistura (Guérios, 2013).

Tal fenômeno se dá através da reação do cálcio da cal, juntamente com os aluminatos e silicatos presentes nos argilo-minerais, podendo continuar conforme a existência de cal hidratada na mistura e o pH permaneça acima de 10 (Little, 1999 apud Guérios, 2013).

Figura 3.6. Envoltória de Mohr-Coulomb para solo com e sem adição de cal hidratada.



Fonte: Guérios, 2013.

A Tabela 3.5 apresenta os valores de ângulo de atrito e coesão obtidos na pesquisa por Guérios (2013) para o solo puro e com adição de cal. O autor conclui que, o melhor teor de cal hidratada para a mistura com solo seria de 10% em peso para a estabilização de sub-base, assim como para melhoria na trabalhabilidade da mistura, aumento na resistência ao cisalhamento direto e na coesão e redução do peso específico.

Tabela 3.5. Ângulo de atrito e coesão para o solo com e sem adição de cal hidratada.

Material	ϕ' (°)	c' (kPa)
Solo natural	28,7	11,6
Solo + 2% cal	23,2	24,5
Solo + 5% cal	28,3	12,0
Solo + 10% cal	27,6	27,7

Fonte: Guérios, 2013.

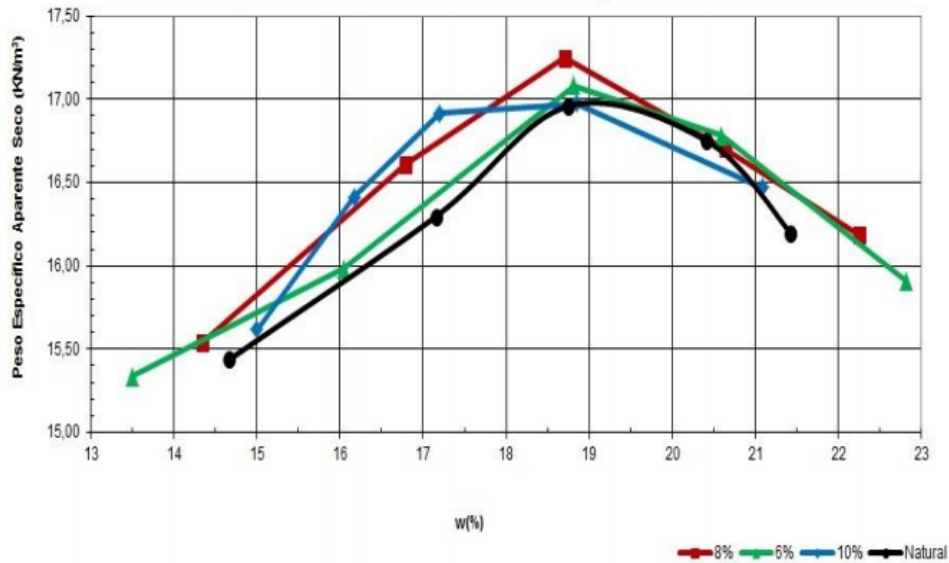
Cunha (2014) avaliou os efeitos do solo com adição de 6%, 8% e 10% de cimento em peso, com a finalidade de obter o melhor comportamento para fins rodoviários. O solo fora classificado no sistema SUCS como CL – Argilo siltoso. Posteriormente, realizou ensaios de compactação Proctor Normal para cada teor de material, obtendo peso específico seco máximo e umidade ótima, conforme a Tabela 3.6. A Figura 3.7 apresenta o comportamento das curvas de compactação adquiridos nos ensaios. Segundo o autor, o peso específico seco máximo aumentou até o teor de 8% de cimento. O autor concluiu que, ao realizar a adição de cimento ao solo, pode-se utilizar o material local de baixa resistência em obras geotécnicas.

Tabela 3.6. Peso específico seco máximo e umidade ótima do solo com e sem adição de cimento.

Material	$Y_{dm\acute{a}x}$ (kN/m³)	$W_{\acute{o}tim}$ (%)
Solo natural	17,00	19,1
Solo + 6% cimento	17,15	19,3
Solo + 8% cimento	17,25	18,7
Solo + 10% cimento	17,00	18,0

Fonte: Cunha, 2014.

Figura 3.7. Curvas de compactação do solo com e sem adição de cimento.



Fonte: Cunha, 2014.

Silva *et al.*, (2016) estudaram a mistura de solo laterítico de Brasília classificado como ML – Silte arenoso de baixa plasticidade segundo o sistema de classificação SUCS e como A-7-5(10) segundo o sistema ASSHTO. A Figura 3.8 exibe um corpo de prova compactado com adição de 3% de borracha reciclada. A finalidade da pesquisa é utilizar o material em preenchimento de estruturas de arrimo a fim de construir estruturas mais leves. Os estudos foram realizados com fração fina de borracha reciclada com diâmetro médio $D_{50} = 1,9$ mm.

A metodologia de pesquisa foi dividida em: caracterização dos materiais, determinação do teor ótimo de borracha, compactação Proctor Modificada, resistência ao cisalhamento com energias de 200 kPa, 400 kPa, 600 kPa e 800 kPa, permeabilidade e Índice de Suporte Califórnia.

O teor ótimo de borracha encontrado foi de 3% em relação à massa de solo. Dos resultados obtidos na pesquisa, concluiu-se que:

- A mistura apresentou redução do peso específico seco máximo de 8%, segundo a Tabela 3.7;
- No ensaio de resistência ao cisalhamento, o composto apresentou uma redução na coesão de 48% (de 25,39 kPa para 12,28 kPa), logo o ângulo de atrito aumentou 10% (de 29,89° para 32,89°);
- A mistura apresentou um ISC de 9,36%, no qual o solo-borracha apresentou redução de 80% em relação ao solo sem adição; e

- O material apresentou um coeficiente de permeabilidade maior que o solo puro.

Figura 3.8. Amostra de solo-pneu com teor de 3% de borracha.



Fonte: Silva *et al.*, 2016.

Tabela 3.7. Peso específico seco máximo e umidade ótima do solo com e sem adição de borracha reciclada.

Material	$Y_{dmáx}$ (kN/m³)	$W_{ótím}$ (%)
Solo natural	16,26	21,7
Solo + 3% borracha	14,95	19,9

Fonte: Silva *et al.*, 2016.

Chrusciak (2013) apresentou uma formula que utiliza a média ponderada entre os teores de materiais e o valor da gravidade específica real dos grãos (G_s), conforme a Equação 1 para adquirir o G_s da mistura.

$$G_{S_{mist}} = \frac{G_{S_{solo}} \times \%_{solo} + G_{S_{vermiculita}} \times \%_{vermiculita}}{100} \quad (1)$$

Onde:

$G_{S_{mist}}$ = massa específica real dos grãos da mistura;

$G_{S_{solo}}$ = massa específica real dos grãos do solo;

$G_{S_{vermiculita}}$ = massa específica real dos grãos vermiculita;

$\%_{solo}$ = teor de solo da mistura; e

$\%_{vermiculita}$ = teor de vermiculita da mistura.

3.4 MELHORAMENTO DE SOLOS UTILIZANDO VERMICULITA EXPANDIDA

Vieira (2013) estudou a utilização de vermiculita expandida misturada com solo. O objetivo de sua pesquisa foi melhorar o solo para ser utilizado como material compactado no cobrimento de coberturas de aterros.

Dentre os resultados de caracterização da vermiculita expandida, a Figura 3.9 apresenta uma bandeja com amostra de vermiculita expandida apresentando massa específica aparente de $0,11 \text{ g/cm}^3$. O solo apresentou peso específico real dos grãos de $2,735 \text{ g/cm}^3$. Segundo o autor, o solo foi classificado como CL (Argila de baixa plasticidade) de acordo com o Sistema Universal de Classificação do Solo – SUCS.

Para avaliar os efeitos das propriedades mecânicas e hidráulicas Vieira (2013) realizou ensaios de compactação estática, teste de secagem, teste de umedecimento, determinação da curva característica, compressão diametral, compressão simples e resistência ao cisalhamento direto. Os teores de vermiculita expandida foram de 0%, 0,57%, 1,14%, 1,71%, 2,28% e 2,85% em peso.

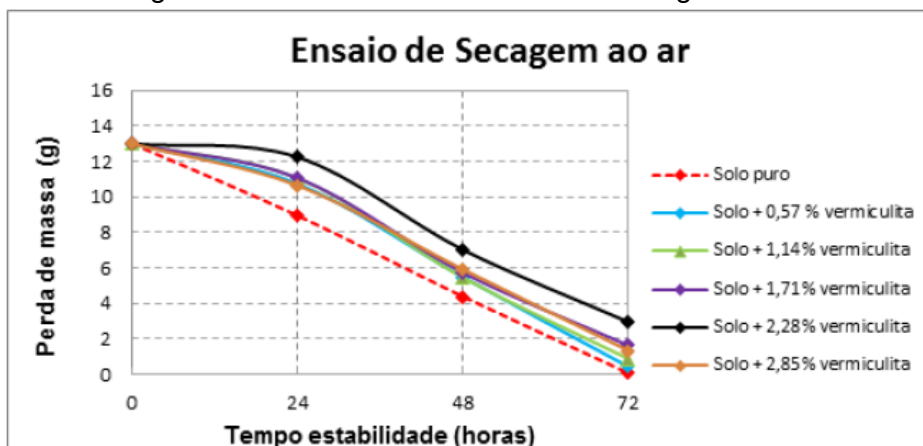
Figura 3.9. Amostra de vermiculita expandida.



Fonte: Vieira, 2013.

No ensaio de compactação para o solo puro, foi observado que a umidade ótima foi de 13% e para a mistura com vermiculita expandida foi de 21%. No ensaio de teste de secagem, a mistura contendo 2,28% de vermiculita expandida apresentou retenção de 21% de água no qual corresponde a 2,95 g de umidade, enquanto o solo puro havia evaporado os 13% de umidade inicial, segundo a Figura 3.10 (Vieira, 2013).

Figura 3.10. Resultado dos testes de secagem ao ar.



Fonte: Vieira, 2013.

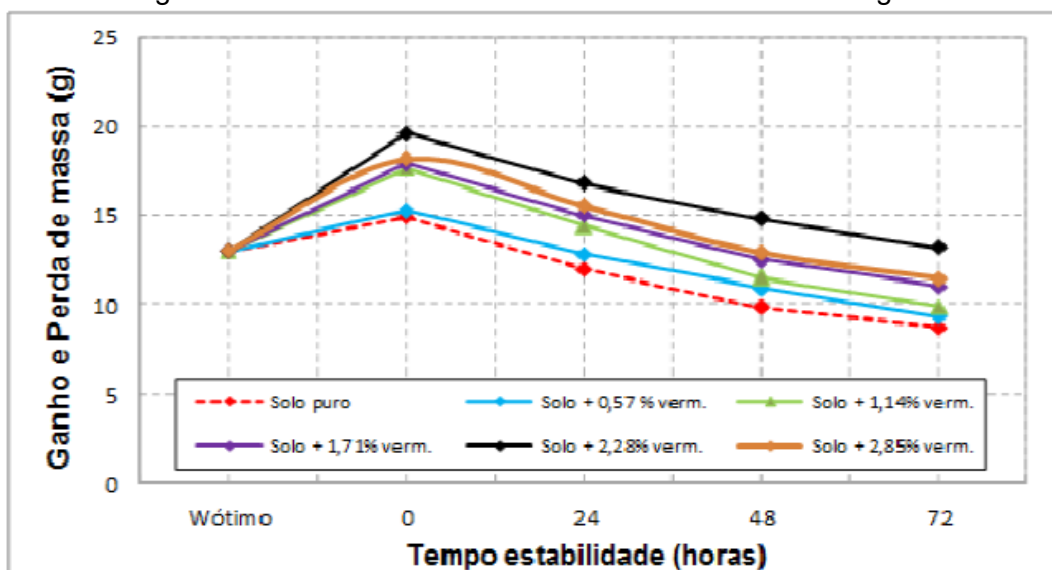
No teste de umedecimento, foram preparadas na umidade ótima para o solo com e sem adição de vermiculita expandida, no qual a mistura com vermiculita obteve 38% de água a mais em relação ao solo puro. A Figura 3.11 apresenta o ensaio de teste de umedecimento das amostras e a Figura 3.12 exibe as curvas de ganho e perda de massa com o passar do tempo de ensaio.

Figura 3.11. Teste de umedecimento.



Fonte: Vieira, 2013.

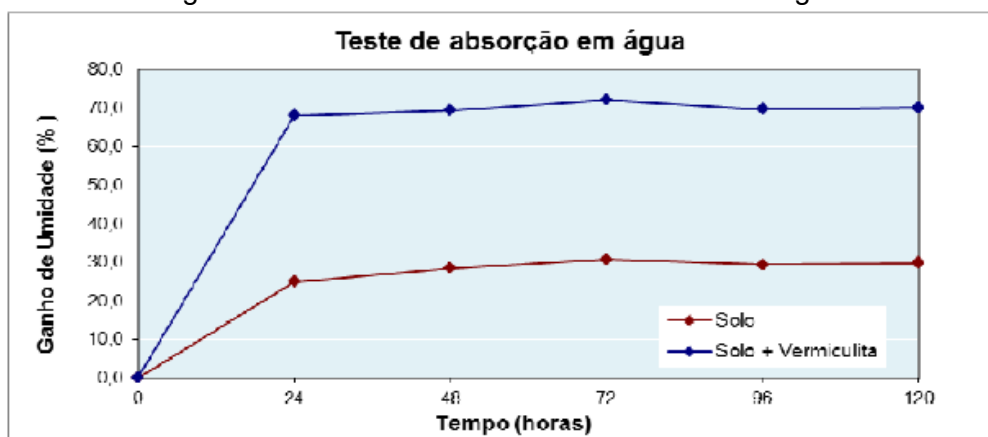
Figura 3.12. Resultado do teste de umedecimento e secagem.



Fonte: Vieira, 2013.

O teste de imersão em água foi realizado por 120 horas para o solo com e sem adição de 2,28% de vermiculita apresentando 10% para o solo natural e 20% para o solo-vermiculita. A seguir são apresentados os resultados obtidos nos testes de absorção (Figura 3.13).

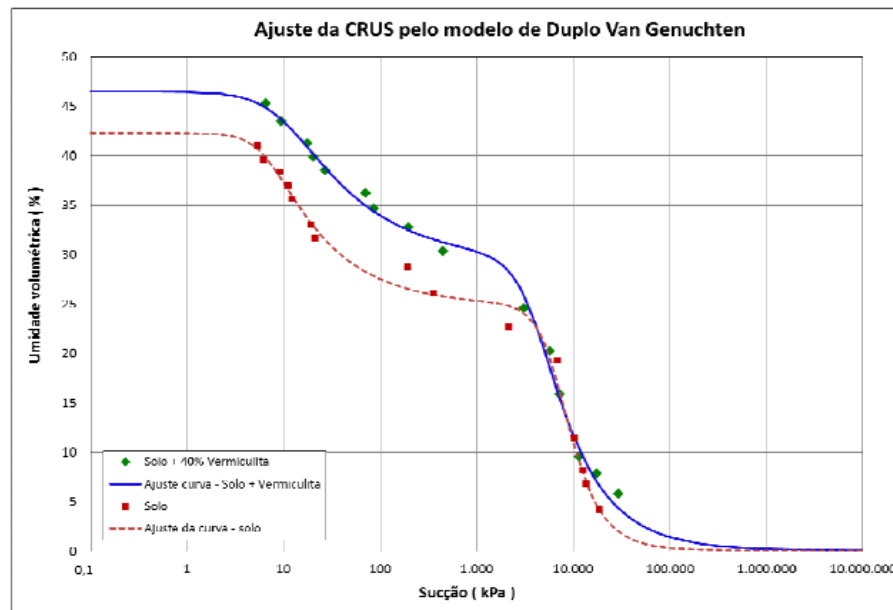
Figura 3.13. Resultado do teste de imersão em água.



Fonte: Vieira, 2013.

Com relação aos ensaios de curva característica de retenção, Vieira (2013) preparou 30 amostras, sendo, 15 amostras foram de solo puro e 15 com adição de vermiculita expandida. O autor relatou que a capacidade de retenção de água na mistura foi maior devido a possuir maior porosidade que o solo puro conforme a seguir (Figura 3.14).

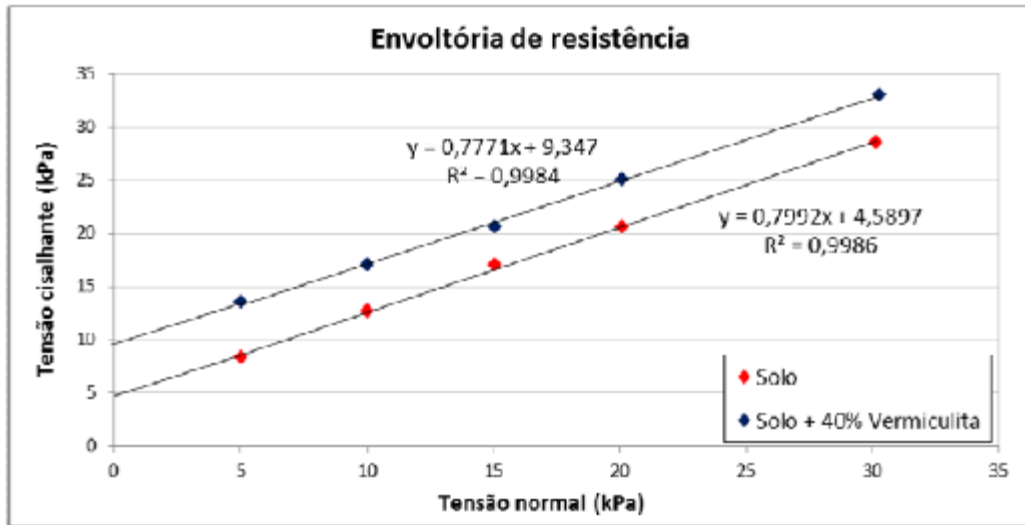
Figura 3.14. Resultado da curva de retenção com ajuste pelo método de Duplo Van Genuchten.



Fonte: Vieira, 2013.

Com relação aos ensaios de resistência ao cisalhamento direto, o autor aplicou tensões normais de 5 kPa, 10 kPa, 15 kPa, 20 kPa e 30 kPa para os teores de 0% e 2,28% de vermiculita expandida em peso (equivalente 40% em volume de solo) para determinar a envoltória de Mohr-Coulomb. A Figura 3.15 apresenta as envoltórias em que o solo com adição de 2,28% de vermiculita expandida apresentou coesão (c') de 9,35 kPa e ângulo de atrito (ϕ') de 38,4°. Para o solo puro foram valores de 4,59 kPa e 38,2°. Segundo Vieira (2013) o comportamento da vermiculita expandida trabalha apenas como reforço no melhoramento da coesão do solo com aplicação de baixas tensões.

Figura 3.15. Envoltórias de resistência ao cisalhamento para o solo com e sem adição de vermiculita expandida.

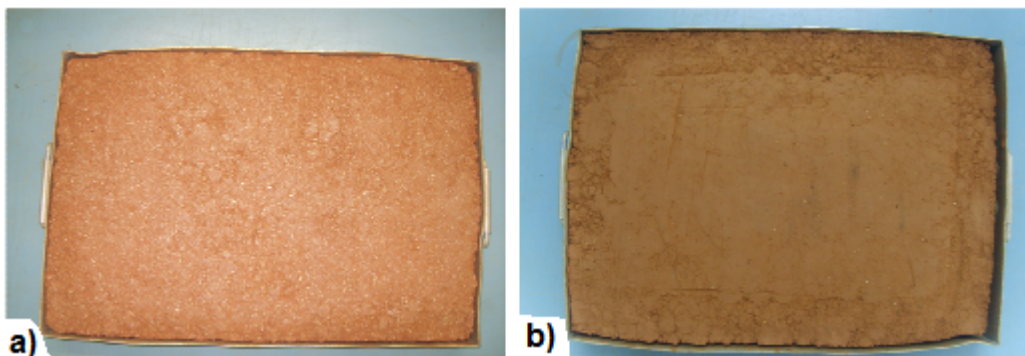


Fonte: Vieira, 2013.

Ao executar os ensaios de permeabilidade, Vieira (2013) relata que o solo misturado com vermiculita expandida apresenta uma permeabilidade maior que o solo puro. Também realizou ensaios para analisar a existência de trincas, onde o solo com vermiculita expandida tem um poder de retenção de umidade maior que o solo puro, chegando a 7% maior que o solo puro.

Em relação às trincas, ambas as misturas ficaram expostas ao ambiente secando ao ar durante 16 dias, desde então, o solo puro apresentou 1 cm de contração, logo o solo com adição de vermiculita expandida apresentou apenas 0,3 cm, conforme a seguir (Figura 3.16). Figura 3.16a apresenta o solo natural no ensaio de contração e a Figura 3.16b exibe o solo-vermiculita.

Figura 3.16. Contração de amostras com e sem adição de vermiculita expandida: a) Solo com adição de 2,28% de vermiculita; b) Solo sem adição de vermiculita.



Fonte: Vieira, 2013.

Segundo Vieira (2013), o solo com presença de vermiculita pode reduzir o risco de abertura de trincas de contração no período de estiagem. E pela característica de expansibilidade, o uso da vermiculita expandida permitirá um fechamento mais acelerado das prováveis trincas que possam surgir durante o período de ressecamento do solo, diminuindo os caminhos preferenciais da percolação d'água no solo.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 MATERIAIS

4.1.1 Solo laterítico

O solo utilizado na pesquisa foi coletado na Chácara do Professor (SINPRO), localizada no Núcleo Rural Alexandre Gusmão em Brazlândia, Brasília – DF. O material foi devidamente ensacado, referenciado e transportado ao laboratório de geotecnia, materiais e topografia no Bloco 11 do campus Asa Norte do UniCEUB. O motivo da escolha desse solo foi devido à facilidade de obter o material. A Figura 4.1 apresenta o local onde o solo foi armazenado a fim de evitar a contaminação do mesmo. A Figura 4.2 apresenta uma porção de amostra de solo.

Foi seguida a norma NBR 6457/86 para a preparação das amostras para os ensaios de compactação e caracterização dos materiais. Os ensaios realizados foram: granulometria, limites de consistência (limites de Atterberg), massa específica dos sólidos, massa específica aparente, compactação, cisalhamento direto, expansão e teste de umedecimento de acordo com as normas NBR 7181/84, NBR 6459/84, NBR 7180/84, NBR 6508/84, NBR 10838/88, ASTM D 3080/98 e NBR 9895/87.

Figura 4.1. Armazenamento do solo para a pesquisa.



Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 4.2. Amostra de solo.



Fonte: Arquivo pessoal.

4.1.2 Vermiculita expandida

A vermiculita expandida utilizada na pesquisa foi submetida à caracterização do material. Foram realizados ensaios de granulometria, massa específica real dos grãos e teste de absorção de água, segundo as normas NBR 7181/84, 6508/84 e 6458/84, respectivamente (adaptadas). A Figura 4.3 ilustra uma porção de vermiculita utilizada na pesquisa e a Figura 4.4 apresenta o saco ao realizar a compra do material.

Figura 4.3. Porção de vermiculita expandida.



Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 4.4. Vermiculita expandida conforme adquirido.



Fonte: Arquivo pessoal.

4.2 MÉTODOS

4.2.1 Caracterização do solo

4.2.1.1 Análise granulométrica

Antes da realização do ensaio, foi realizada a preparação da amostra segundo a NBR 6457/86. O solo foi seco ao ar livre até atingir a umidade higroscópica. Após a secagem prévia, o solo foi passado na peneira 4,8 mm. Posteriormente, foi realizado o ensaio de granulometria por peneiramento grosso e fino, segundo a NBR 7181/84.

A Figura 4.5 apresenta alguns materiais e equipamentos utilizados no ensaio de sedimentação, por exemplo: termômetro, haste para agitação das

partículas, densímetro, proveta de vidro de 1000 ml, cronômetro, Becker de plástico e amostras de solo e vermiculita expandida.

Figura 4.5. Materiais e equipamentos utilizados no ensaio de sedimentação das amostras de vermiculita expandida e solo.



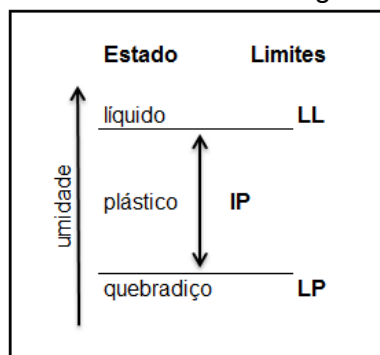
Fonte: Arquivo pessoal.

4.2.1.2 Limites de Atterberg

Os ensaios foram realizados segundo as normas NBR 6459/84 e NBR 7180/84, em que os índices de consistência (Limites de Atterberg) são índices complementares para caracterizar o comportamento (físico e mecânico) dos solos finos.

Realiza-se uma análise através de inserção de água em uma porção de solo, pois o solo apresenta alguns comportamentos diferenciados conforme o teor de água (umidade) em sua mistura. A Figura 4.6 ilustra os estados de um solo argiloso.

Figura 4.6 Limites de Atterberg dos solos.



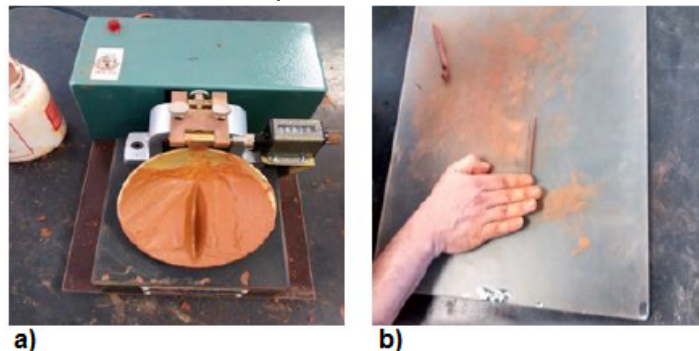
Fonte: Pinto, 2006.

Onde:

- Limite de Liquidez (LL): é o limite que o solo passa do estado líquido para o plástico, segundo a NBR 6459/84;
- Limite de Plasticidade (LP): quando o solo reduz gradualmente a umidade, passando do limite de plasticidade para o estado semissólido, segundo a NBR 7180;
- Índice de Plasticidade (IP): quando o solo reduz a umidade entre os limites LL e LP, isto é, plástico, nessa faixa é possível moldar o solo sem quebrar de acordo com a NBR 7180/84.

A Figura 4.7 apresenta os ensaios de limites de consistência. A Figura 4.7a corresponde ao ensaio de limite de liquidez e a Figura 4.7b apresenta o ensaio de limite de plasticidade.

Figura 4.7. Limites de Atterberg: (a) Ensaio de limite de liquidez; (b) Ensaio de limite de plasticidade.



Fonte: Arquivo pessoal.

4.2.1.3 Massa específica real dos grãos

O ensaio da massa específica real dos grãos foi realizado segundo a NBR 6508/84, que determina a relação entre a massa e o volume dos grãos.

Para a realização do ensaio foram utilizadas três cápsulas contendo 50 g de amostra deixando-as descansar por 24 horas imersas em água destilada. No dia seguinte, foram realizados os seguintes procedimentos:

- Cada amostra foi colocada em um dispersor ligado por 15 minutos;
- Após o tempo no dispersor, foi colocado em um balão volumétrico de 500 cm³, e, posteriormente, foi colocado no banho maria por 15 min. Em seguida, foi colocado na bomba de sucção durante dois intervalos

de 15 min cada e, por fim, colocado novamente no banho maria por 15 min;

Depois dos procedimentos citados anteriormente, deu-se continuação aos procedimentos segundo a NBR 6508/84 para obtenção dos resultados. Para validação dos resultados, foi utilizado o equipamento de última geração Pentapicnômetro 5200E de acordo com a Figura 4.8.

O equipamento utiliza gás hélio para medir a densidade e o volume dos materiais. Este equipamento foi cedido pelo laboratório de geotecnia da Universidade de Brasília – UnB. Utilizando uma balança de precisão com 5 algarismos significativos para pesagem dos materiais, o equipamento possui cinco compartimentos para a realização simultânea (a leitura é feita uma após a outra no sentido horário). Seguindo os seguintes passos:

- Antes da realização do ensaio, foi feita a calibração do equipamento com uma esfera padronizada segundo o manual do equipamento;
- Em seguida, foi realizada a pesagem dos materiais conforme o teor desejado, com peso entre 20 a 30 g (manual do equipamento);
- Após a pesagem, foi inserido o material na cápsula interna do Pentapicnômetro e fechada em seguida;
- Depois o computador pede para informar o número de leituras a serem repetidas para obtenção dos parâmetros dos materiais (solo e/ou vermiculita). Então, foram escolhidas cinco leituras: dessas cinco, o computador faz a média de três leituras, ou seja, os três valores mais próximos seriam utilizados para informar os valores finais dos parâmetros das amostras; e

- O equipamento solicita a pressão em Psi para aplicação do gás hélio, no qual foi determinado 16 Psi, como recomendado pelo manual.

Figura 4.8. Pentapicnometro 5200E.



Fonte: Arquivo pessoal.

4.2.1.4 Massa específica aparente

O ensaio foi realizado segundo a NBR 10838/88 utilizando a balança hidrostática, que determina a massa aparente natural do solo levando em consideração as partes sólidas e não sólidas.

4.2.1.5 Compactação

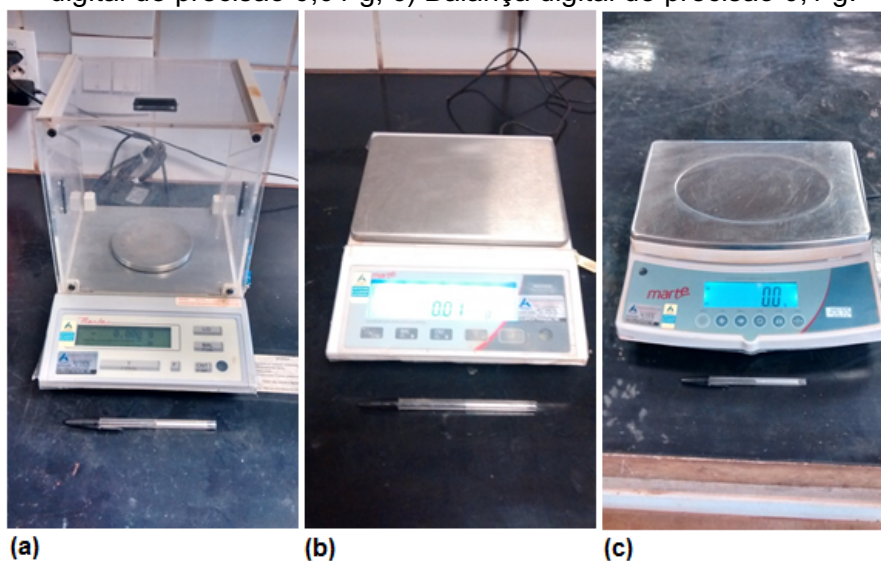
Os ensaios de compactação dinâmica foram executados de acordo com a NBR 7182/86 para determinar a relação entre a umidade ótima e o peso específico aparente seco dos materiais.

Os ensaios foram realizados através da energia Proctor Normal, a montagem das curvas de compactação foi utilizado apenas um cilindro pequeno com 3 camadas de material aplicando 26 golpes cada com soquete pequeno, sem reuso de material.

No entanto, para os corpos de prova para a realização do ensaio de expansão, foram utilizados cilindros grandes com 5 camadas, aplicando 12 golpes cada, com soquete grande e sem reuso de material.

A Figura 4.9 apresenta as balanças digitais de precisão utilizadas na pesagem dos materiais. A balança (Figura 4.9a) foi utilizada para pesar as cápsulas no cálculo de umidade das amostras, apresentando uma precisão de 0,001 g. A segunda balança (Figura 4.9b) apresenta uma precisão de 0,01 g utilizada para pesagem dos materiais, tais como: solo, vermiculita expandida e água de torneira. E a terceira balança (Figura 4.9c) foi utilizada para pesar os corpos de prova mais cilindro, com precisão de 0,1 g.

Figura 4.9. Balanças digitais de precisão. a) Balança digital de precisão 0,001 g; b) Balança digital de precisão 0,01 g; c) Balança digital de precisão 0,1 g.



Fonte: Arquivo pessoal.

A Figura 4.10 apresenta os materiais e equipamentos utilizados na compactação, tais como: soquete pequeno, régua de aço, cilindro pequeno, base para cilindro, colarinho, papel filtro, capsulas metálicas, bandeja metálica, solo, vermiculita expandida, espátula, capsula grande, água da torneira e balança de precisão de 0,1.

Figura 4.10. Materiais e equipamentos utilizados no ensaio de compactação.

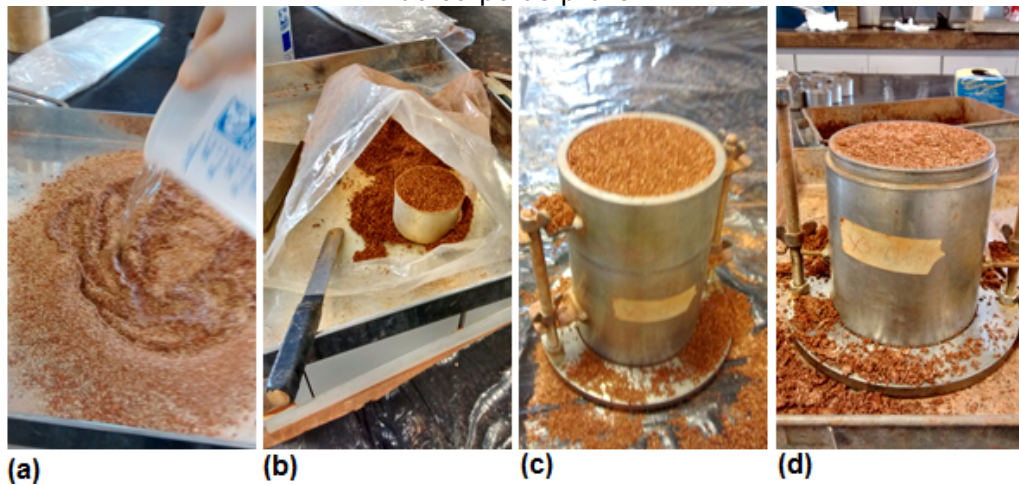


Fonte: Arquivo pessoal.

A Figura 4.11 apresenta como foi realizada a mistura, a molhagem e a preservação da umidade dos materiais na compactação e, no arrasamento pós-compactação:

- Primeiramente, foi realizada a mistura do solo com ou sem adição de vermiculita expandida, posteriormente, foi inserido água em frações a fim de evitar a perda de água no ato da mistura e realizando a mistura com as mãos utilizando luvas de proteção látex (Figura 4.11a);
- Após a homogeneização dos materiais com adição d'água, o composto foi colocado dentro de um saco plástico com o intuito de misturar ainda mais os materiais, agitando o saco plástico por 30 segundos;
- Em seguida foi utilizada uma cápsula média para colocar a mistura no cilindro. Para tal procedimento, foram utilizadas 4 porções arrasadas por camada com uma espátula e, posteriormente, o saco foi fechado até o termino da compactação da camada atual (Figura 4.11b);
- Na última camada, foi colocada a amostra até passar do colarinho, posteriormente, fora arrasado com uma espátula e deu-se prosseguimento na compactação (Figura 4.11c);
- Logo depois de realizar a compactação, foi retirado o colarinho e realizado o arrasamento com a régua de aço (Figura 4.11d) e realizado a extração do corpo de prova para, posteriormente, a realização de ensaios, por exemplo, cálculo de umidade do material, cisalhamento direto e massa específica aparente.

Figura 4.11. Sequência de ensaio de compactação: a) Mistura dos materiais; b) Preservação da umidade dos materiais; c) Arrasamento da ultima camada de solo; d) Arrasamento final do corpo de prova.



Fonte: Arquivo pessoal.

4.2.2 Vermiculita expandida

4.2.2.1 Análise granulométrica

O ensaio foi realizado segundo a norma NBR 7181/84, onde foi separado 120 g de amostra de vermiculita expandida, realizando a avaliação granulométrica do material por peneiramento.

4.2.2.2 Massa específica real dos grãos

Foram utilizados os mesmos procedimentos realizados para o solo segundo a NBR 6508/84, só que adaptados para a vermiculita expandida. Posteriormente, os resultados foram verificados pelo equipamento Pentapicnômetro na UnB.

4.2.2.3 Teste de absorção de água

O teste de absorção permite conhecer a capacidade de absorção de água que o material possui. Logo, foi realizado o teste para a vermiculita expandida segundo a NBR 6458/84.

O teste foi realizado com três porções de vermiculita expandida colocando água destilada para completa imersão do material deixando descansar por 24 horas.

No momento de retirada do excesso de água, foi colocado na peneira #200 e deixando-a com certa inclinação para facilitar o escoamento do excesso de água por gravidade, por 15 minutos cronometrados segundo a Figura 4.12. Posteriormente, foi retirado o excesso de água das amostras com papel toalha e, por fim, realizado o cálculo da umidade do material.

Figura 4.12. Teste de absorção de água para vermiculita expandida.



Fonte: Arquivo pessoal.

4.2.3 Mistura solo-vermiculita expandida

Após a determinação da umidade ótima do solo natural, foram realizadas misturas de solo-vermiculita expandida com distintos teores de vermiculita (6%, 12,5%, 19%, 25%, 30%) e uma curva de 100% de vermiculita expandida sem adição de solo para analisar o comportamento do mesmo, por exemplo, peso específico e umidade ótima. Os teores foram determinados em relação à massa total da mistura.

As porcentagens citadas acima foram escolhidas devido a: tentar reduzir o peso específico do solo-vermiculita até um limite que não prejudique após a compactação do mesmo. Assim, foi determinado um limite de 25% de vermiculita a ser ensaiado, posteriormente, foram escolhidos os teores intermediários entre 0% e 25% de vermiculita para analisar o comportamento dos mesmos, como também, pela carência de estudos semelhantes com a vermiculita expandida. Porém foi encontrado apenas um estudo com adições de 0%, 0,57%, 1,14%, 1,71%, 2,28% e 2,85% em peso. A Tabela 4.1, apresenta os símbolos utilizados na identificação do solo e das adições de vermiculita expandida.

Tabela 4.1. Símbolos dos materiais utilizados na pesquisa.

Material	Vermiculita (%)	Símbolo
Solo natural	0	SN
	6	S+6%V
Mistura	12,5	S+12,5%V
	19	S+19%V
	25	S+25%V
	30	S+30%V
	100	100%V

Fonte: Arquivo pessoal.

Foi realizada a mistura de S+30%V com a finalidade de analisar a tendência das curvas de compactação, ou seja, nessa pesquisa não foram realizados outros ensaios, por exemplo, cisalhamento direto.

4.2.4 Cisalhamento direto

Através do ensaio de cisalhamento direto se obtém a coesão e ângulo de atrito interno das partículas, auxiliando na análise de problemas, por exemplo, capacidade de carga, estabilidade de taludes e pressão lateral em estruturas de contenção de terra. Os ensaios foram realizados segundo a ASTM D 3080/98 na umidade ótima de compactação Proctor Normal.

As tensões normais para se obter as envoltórias de Mohr-Coulomb foram de 50 kPa, 100 kPa e 200 kPa a uma velocidade de 0,030 mm/min com deslocamento estabelecido de 7 mm. O anel metálico para moldagem tem 5,08 cm de lado e 2 cm de altura. Os ensaios duraram aproximadamente 4 horas e meia para cada ponto. Totalizando 21 pontos de cisalhamento direto, tais como:

- Três pontos para os teores de SN e S+25%V após o teste de umedecimento; e
- Três pontos inundados (saturados) para os teores de SN, S+6%V, S+12,5%V, S+19%V e S+25%V.

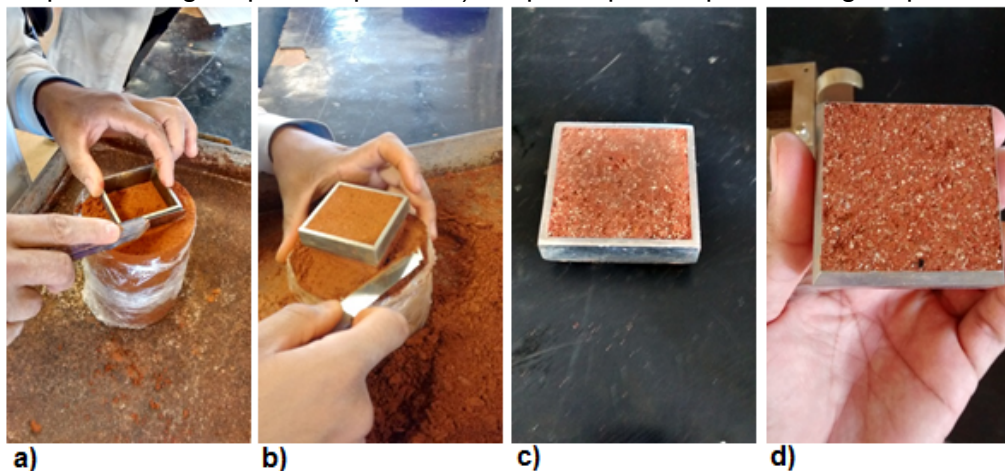
Antes de realizar o ensaio de cisalhamento direto, foi realizado o pré-adensamento da amostra por 30 min conforme o carregamento estabelecido. No caso dos ensaios inundados, foi inserida água destilada deixando o corpo de prova

saturar por aproximadamente 12 horas antes de iniciar o ensaio de cisalhamento. Após esse período iniciou-se o cisalhamento direto saturado.

Foi realizada a moldagem do corpo de prova no meio da amostra utilizando um anel de moldagem, um estilete e uma bandeja de apoio (Figura 4.13). A Figura 4.13a exibe o momento antes da moldagem da amostra. A Figura 4.13b apresenta o instante do corte na base para nivelar a superfície da amostra junto ao nível do anel de moldagem.

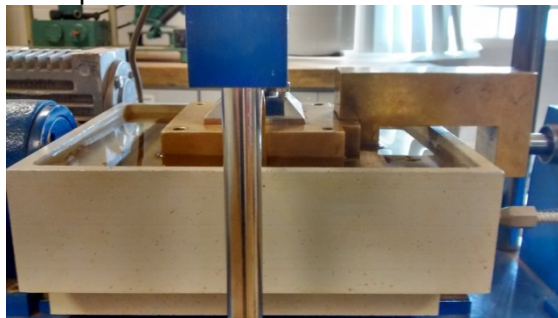
A Figura 4.13c apresenta um corpo de prova moldado e nivelado conforme a altura do anel, pronto para a realização do ensaio de cisalhamento direto (vista superior). Logo, a Figura 4.13d apresenta uma vista inferior da amostra indicando o nivelamento do corpo de prova. A Figura 4.14 apresenta o andamento do ensaio de cisalhamento direto saturado com carregamento aplicado.

Figura 4.13. Moldagem de um corpo de prova para realização do ensaio de cisalhamento direto: a) Centralizando o anel para moldagem; b) Corte do corpo de prova; c) Corpo de prova após moldagem parte superior; d) Corpo de prova após moldagem parte inferior.



Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 4.14. Máquina de ensaio de cisalhamento direto saturado.



Fonte: Arquivo pessoal.

4.2.5 Expansão

O ensaio de expansão foi realizado conforme a NBR 9895/87, para amostra com e sem adição de vermiculita expandida. Os resultados obtidos são de acordo com os métodos de dimensionamento de pavimentos flexíveis.

4.2.5.1 Expansibilidade

Os corpos de prova foram compactados na umidade ótima, referente a cada teor. Cada corpo de prova foi posicionado em uma base perfurada para determinar a expansão do material, em que os corpos de provas foram submetidos à saturação por 96 horas (Figura 4.15).

Figura 4.15. Corpos de prova submersos por 96 horas.



Fonte: Arquivo pessoal.

4.2.6 Teste de umedecimento

O teste de umedecimento foi realizado com seis corpos de prova compactado, sendo dois para cada teor de (SN, S+12,5% e S+25%V) e deixando-os em ambiente úmido por 21 dias (não havendo contato direto com a água). Realizou-se a pesagem uma vez por semana para analisar se houve ou não ganho de umidade. Em seguida, os mesmos foram submetidos ao ensaio de resistência ao cisalhamento direto para verificar a influência do ambiente úmido aos corpos de prova. O teste de umedecimento realizado não possui norma regulamentadora. A seguir são apresentados os corpos de prova dentro da caixa plástica (Figura 4.16), utilizando os seguintes itens:

- Medidor de umidade, horário e temperatura ambiente para conhecer o ambiente local onde o corpo de prova se mantém;
- Tijolo maciço para evitar o contato entre a água e os corpos de prova;
- Bandeja metálica para servir como apoio dos corpos de prova;
- Papel filtro para colocar entre a bandeja e o corpo de prova; e
- Recipiente plástico com tampa.

Figura 4.16. Teste de umedecimento dos corpos de prova.



Fonte: Arquivo pessoal.

4.2.7 Classificação de solos tropicais MCT

O ensaio Miniatura Compactada Tropical é uma metodologia de ensaio rápido no qual se pode realizar in loco ou em laboratório. O ensaio MCT consiste em determinar as propriedades relacionadas à consistência dos solos, como também, a resistência no estado seco assim observando a existência ou não de expansão ou contração. Logo o ensaio não possui norma regulamentadora. Os parâmetros adquiridos nesse ensaio foram: umidade de moldagem, contração, penetração, absorção, plasticidade e resistência ao esmagamento do solo. A Figura 4.17 apresenta à metodologia no qual foi realizada a moldagem de três pastilhas conforme o diâmetro de cada anel. Posteriormente, foi realizada a moldagem de três bolinhas com peso aproximado de 10 g e, por fim, a moldagem de um rolinho com diâmetro de 3 mm conforme o gabarito.

Figura 4.17. Ensaio classificação MCT.



Fonte: Arquivo pessoal.

5 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

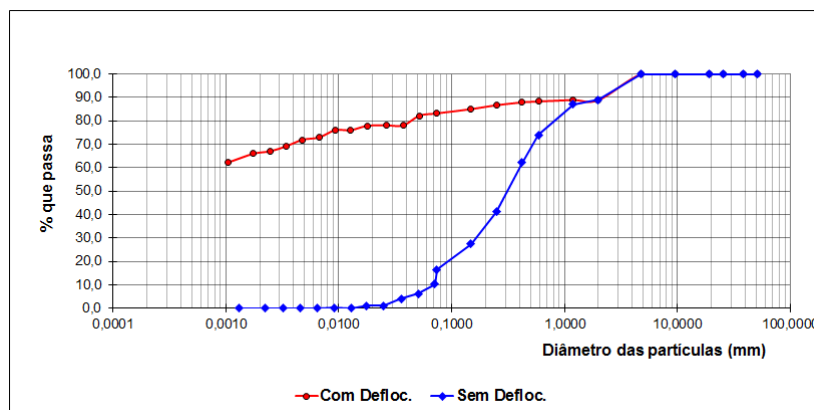
No presente capítulo são apresentados os resultados dos ensaios de caracterização física dos materiais, e os resultados que avaliaram o comportamento mecânico do solo com e sem adição de vermiculita expandida.

5.1 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO

5.1.1 Ensaio de granulometria

A análise granulométrica do solo foi realizada conforme a NBR 7181/84 para as curvas com e sem adição de defloculante (Figura 5.1), pode-se observar que existe uma diferença na distribuição granulométrica para o solo com e sem defloculante. A Tabela 5.1 apresenta os resultados da composição granulométrica das amostras de solo com e sem defloculante.

Figura 5.1. Curvas granulométricas do solo puro com e sem defloculante.



Fonte: Arquivo pessoal.

Tabela 5.1. Análise granulométrica do solo com e sem defloculante.

Propriedades	Amostra	
	Com defloculante	Sem defloculante
Granulometria (%)		
Argila (<0,002 mm)	67,3	0,1
Silte (0,06 - 0,002 mm)	17,3	8
Areia (2,0 - 0,06 mm)	4,4	80,8
Pedregulho (> 2,0 mm)	11,1	11,1

Fonte: Arquivo pessoal.

Foi possível verificar que a solução de defloculante influencia diretamente sobre as partículas dos grãos, facilitando na desagregação das partículas ao realizar o ensaio de sedimentação. Logo, o ensaio sem defloculante apresentam grãos agrupados e a sedimentação ocorre mais rápida conforme citado por Silva *et al.*, (2016).

5.1.2 Limites de Atterberg

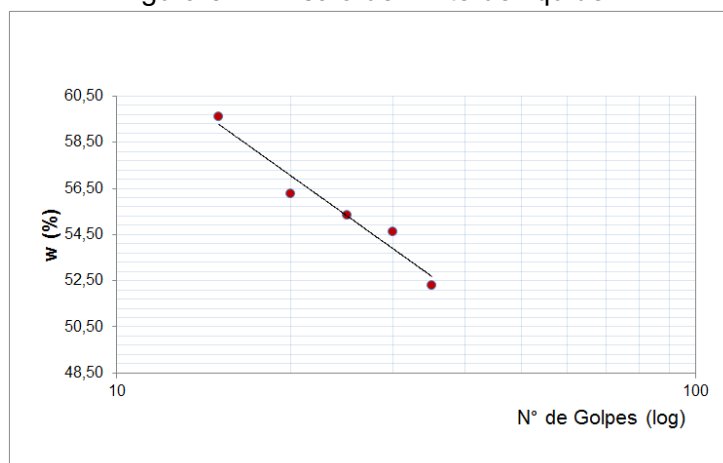
Os resultados adquiridos nos ensaios de limites de consistência, tais como: limite de liquidez, limite de plasticidade e índice de plasticidade da amostra de solo são apresentados na Tabela 5.2 para o solo estudado. A Figura 5.2 apresenta o numero de golpes por umidade para obtenção do limite de liquidez.

Tabela 5.2. Limites de Atterberg para o solo estudado.

Propriedades	Amostra
Limite de Liquidez (%)	55
Limite de Plasticidade (%)	34
Índice de Plasticidade (%)	21

Fonte: Arquivo pessoal.

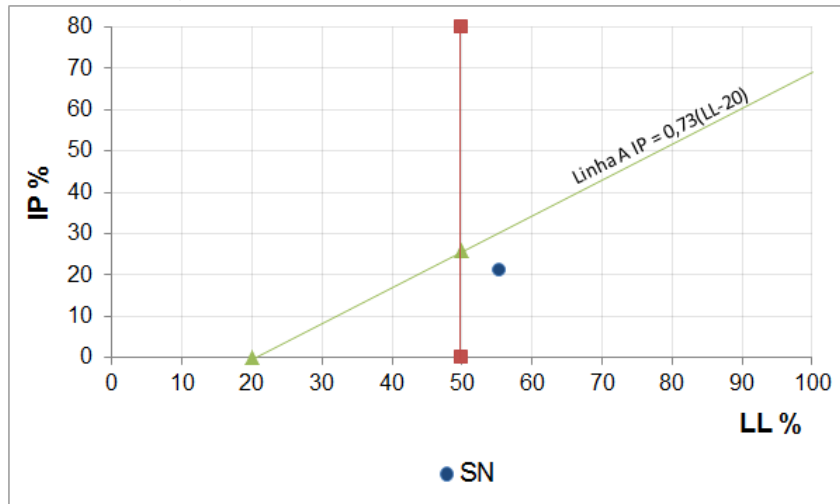
Figura 5.2. Ensaio de limite de liquidez.



Fonte: Arquivo pessoal.

A seguir é apresentada a carta de plasticidade do solo natural (Figura 5.3), onde o solo se apresentou abaixo da linha A com plasticidade alta segundo a tabela de classificação de índice de plasticidade apresentada por Das (2015).

Figura 5.3. Ensaio de limite de plasticidade.



Fonte: Arquivo pessoal.

5.1.3 Massa específica real dos grãos

A gravidade específica real dos grãos (G_s) para solos de Brasília é de $2,6724 \text{ g/cm}^3$ de acordo com a NBR 6508/84 e $2,6796 \text{ g/cm}^3$ pelo uso do equipamento Pentapicnômetro.

5.1.4 Classificação de solos tropicais MCT

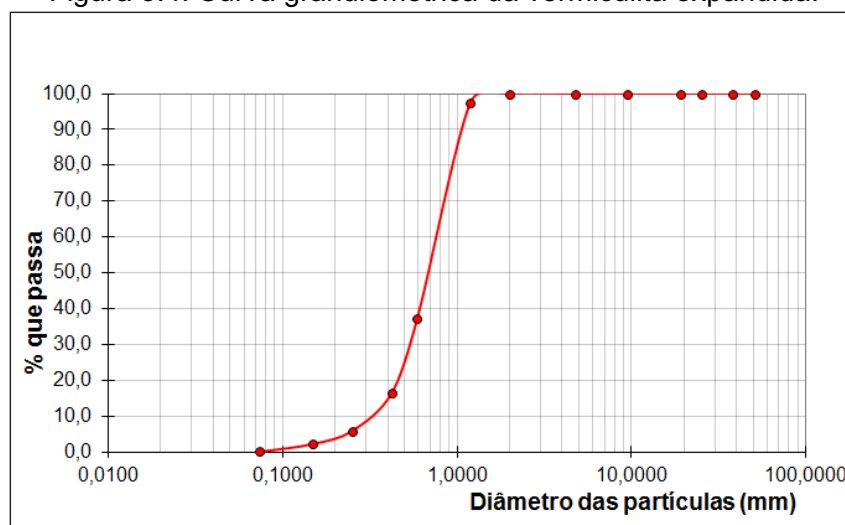
O ensaio foi realizado conforme a metodologia MCT expedita, no qual o solo apresentou uma classificação como Argiloso Laterítico (LG').

5.2 CARACTERIZAÇÃO DA VERMICULITA EXPANDIDA

5.2.1 Granulometria

No ensaio de granulometria a análise foi realizada somente pelo peneiramento fino segundo a NBR 7181/84, sendo que, foram adaptados os procedimentos para a vermiculita expandida, a Figura 5.4 ilustra a curva obtida no ensaio. Observa-se que o diâmetro das partículas fica entre o intervalo de 0,07 e 1,0 mm.

Figura 5.4. Curva granulométrica da vermiculita expandida.



Fonte: Arquivo pessoal.

5.2.2 Massa específica real dos grãos

O ensaio de gravidade específica real dos grãos foi realizado conforme a NBR 6508/84, sendo adaptados os procedimentos para a vermiculita expandida. A vermiculita apresentou uma gravidade específica de 2,2757 g/cm³ pela NBR 6508/84 e 2,2394 g/cm³ pelo equipamento Pentapicnômetro.

5.2.3 Mistura solo-vermiculita

A Tabela 5.3 apresenta os valores correspondentes à massa específica real dos grãos do solo, vermiculita e solo-vermiculita com a utilização da NBR 6508/84, Pentapicnômetro e o método ponderado apresentado por Chrusciak (2013).

Tabela 5.3. Massa específica real dos grãos dos materiais.

Método	Material (g/cm ³)	Pentapicnômetro	Varição (g)	
NBR 6508	Gs SN	2,6724	2,6796	0,0072
	Gs Vermiculita	2,2757	2,2394	-0,0363
Chrusciak, 2013	Gs S+6%V	2,6486	2,6203	-0,0283
	Gs S+12,5%V	2,6228	2,5711	-0,0517
	Gs S+19%V	2,5970	2,5489	-0,0481
	Gs S+25%V	2,5732	2,5249	-0,0483

Fonte: Arquivo pessoal.

Observa-se que o Gs do solo com adição de vermiculita expandida, apresenta redução conforme o aumento do teor de vermiculita. Outra observação seria que as variações do Gs dos materiais são pequenas segundo a metodologia apresentada pela NBR 6508 e por Chrusciak (2013) em relação ao uso do Pentapicnometro.

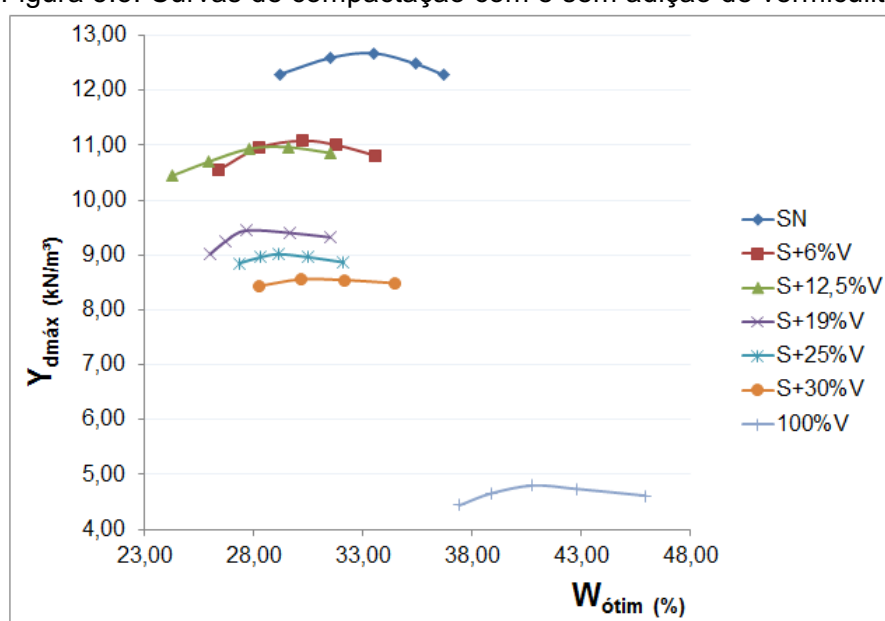
5.2.4 Teste de absorção de água da vermiculita expandida

Após deixar a vermiculita submersa em água destilada por 24 horas, foi realizado o cálculo da umidade com seis amostras representativas, no qual a vermiculita apresentou 100% de absorção de água, isto é, a vermiculita expandida possui grande potencial de absorção de água, podendo chegar a cinco vezes o tamanho do grão.

5.3 COMPACTAÇÃO PROCTOR

Após a caracterização dos materiais, foram plotadas as curvas de compactação do solo com e sem adição de vermiculita expandida na energia de compactação Proctor Normal (Figura 5.5). Os gráficos e tabelas adquiridos podem ser consultados no APÊNDICE-A.

Figura 5.5. Curvas de compactação com e sem adição de vermiculita.

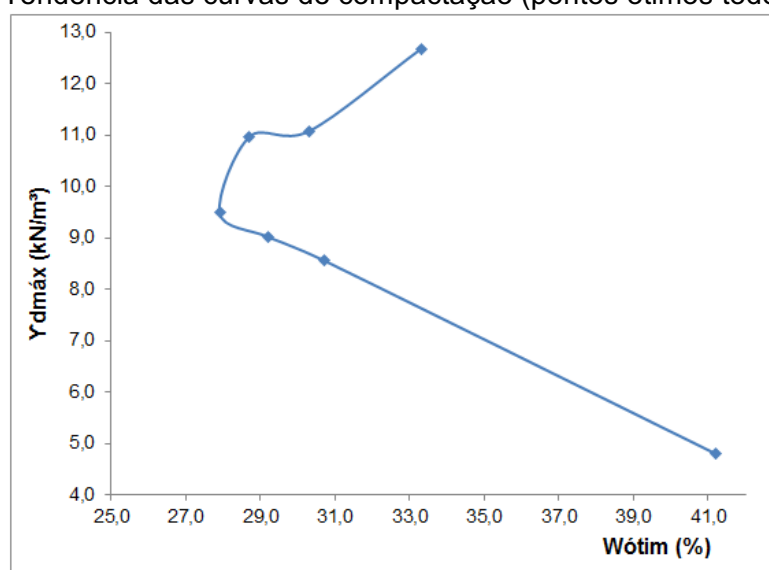


Fonte: Arquivo pessoal.

Ao realizar a compactação do solo com adição de vermiculita pode-se notar reduções no peso específico seco máximo, como também, perda na umidade ótima ao compactar uma nova curva.

As curvas de solo-vermiculita apresentam um comportamento de solos granulares à medida que aumenta o teor de vermiculita (Figura 5.6). No entanto, as curvas de compactação S+25%V, S+30%V e 100%V tendem a reduzir ainda mais o peso específico seco máximo, porém precisam de mais água na mistura, em relação ao teor de S+19%V. Assim tomam a tendência da curva de 100%V.

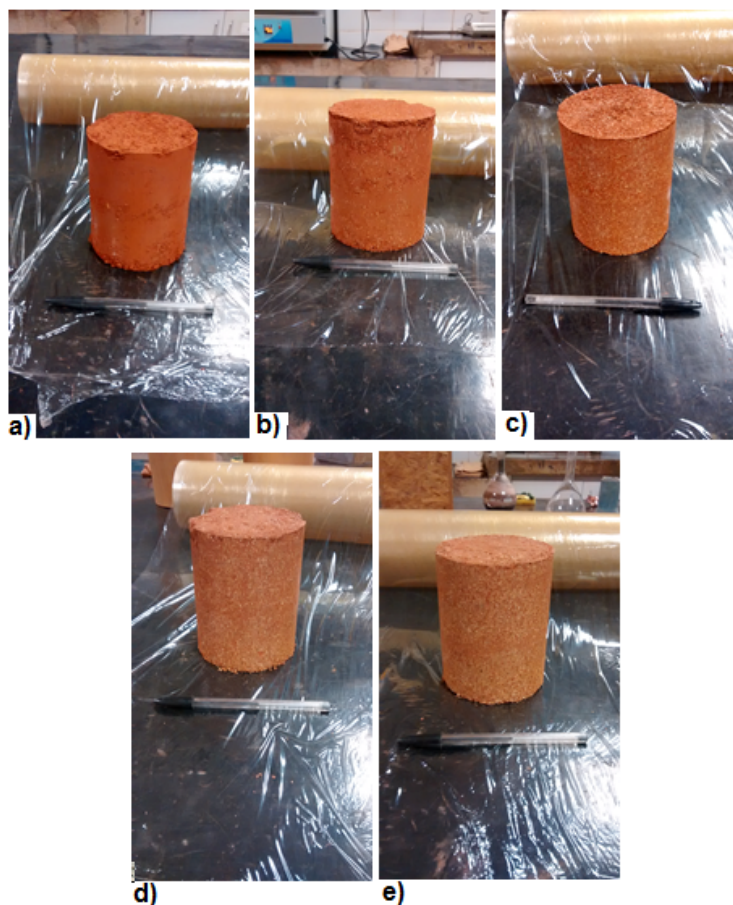
Figura 5.6. Tendência das curvas de compactação (pontos ótimos todos os teores).



Fonte: Arquivo pessoal.

A seguir são apresentados os corpos de provas com e sem adição de vermiculita expandida, compactados com a energia Proctor Normal na umidade ótima de acordo com as curvas de compactação (Figura 5.7). Pode-se observar que os teores trabalhados solo-vermiculita expandida visualmente não apresentam trincas e fissuras.

Figura 5.7. Amostras com e sem adição de vermiculita expandida: a) SN; b) S+6%V; c) S+12,5%V; d) S+19%V; e) S+25%V.



Fonte: Arquivo pessoal.

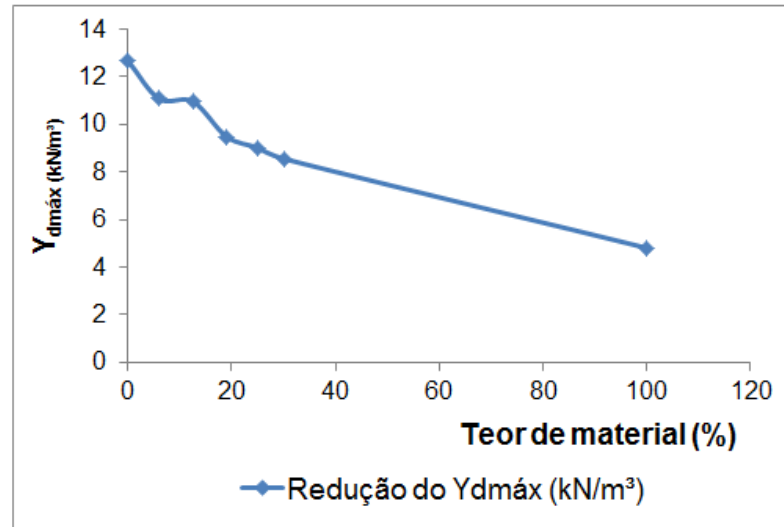
Na Tabela 5.4 são apresentados os valores do peso específico seco máximo ($Y_{dm\acute{a}x}$) e umidade \u00f3tima ($W_{\u00f3tim}$) das amostras segundo suas respectivas curvas de compacta\u00e7\u00e3o. As misturas apresentam uma tend\u00eancia ao reduzir as densidades e varia\u00e7\u00e3o na umidade \u00f3tima conforme a Figura 5.8.

Tabela 5.4. Peso espec\u00edfico seco m\u00e1ximo e umidade \u00f3tima dos materiais.

Material	$Y_{dm\acute{a}x}$ (kN/m³)	$W_{\u00f3tim}$ (%)
SN	12,68	33,3
S+6%V	11,08	30,3
S+12,5%V	10,97	28,7
S+19%V	9,49	27,9
S+25%V	9,02	29,2
S+30%V	8,56	30,7
100%V	4,8	41,2

Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 5.8. Redução do peso específico seco máximo versus o teor de material (todos os teores).



Fonte: Arquivo pessoal.

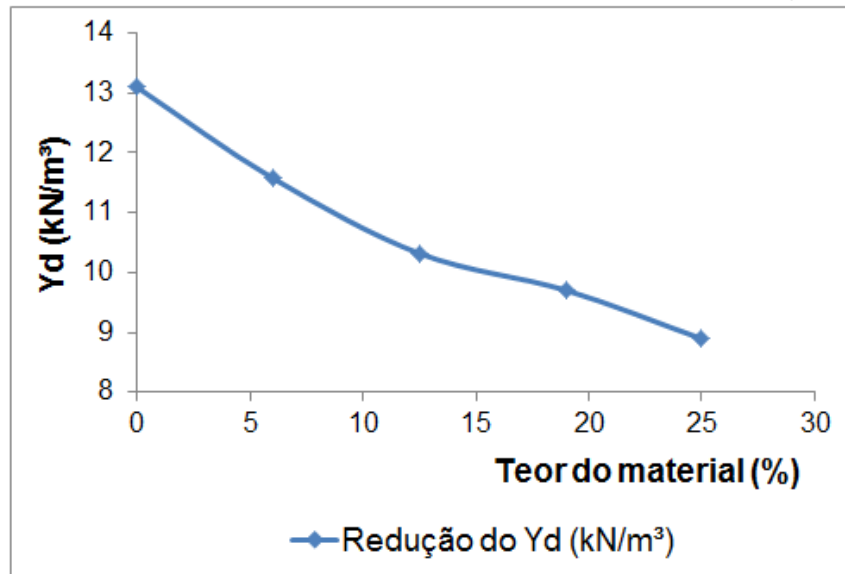
A Tabela 5.5 exibe os resultados do peso específico aparente seco (Y_d) e umidade (W) dos corpos de prova segundo a NBR 10838/88 com emprego da balança hidrostática e a Figura 5.9 mostra a tendência dos pesos conforme a adição de vermiculita expandida no qual reduzem cada vez mais ao adicionar a vermiculita.

Tabela 5.5. Pesos específicos aparentes secos e umidades de compactação com e sem adição de vermiculita.

Material	Y_d (kN/m³)	W (%)
SN	13,10	32,0
S+6%V	11,58	29,1
S+12,5%V	10,32	29,3
S+19%V	9,70	30,1
S+25%V	8,89	28,9

Fonte: Arquivo pessoal.

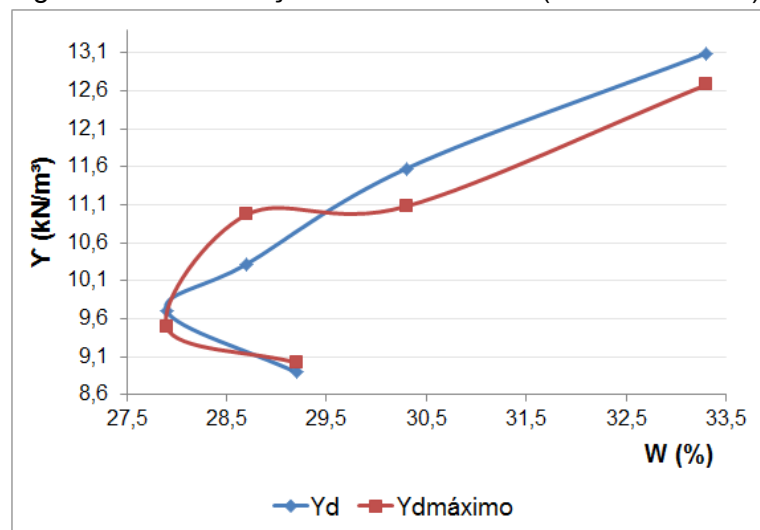
Figura 5.9. Redução do peso específico seco versus o teor de material (todos os teores).



Fonte: Arquivo pessoal.

O ensaio do peso específico aparente seco com o emprego da balança hidrostática foi realizado para validar os valores obtidos do peso específico seco máximo, pois são provenientes do mesmo ensaio de compactação dinâmica, onde foram observadas ao confrontar as duas tendências que são similares devido à redução dos espaços vazios induzidos pela compactação dinâmica (Figura 5.10). Logo, foi observado que as variações foram pequenas, no entanto, o solo com adição de 25% de vermiculita foi o composto que obteve a maior variação entre as densidades.

Figura 5.10. Verificação das densidades (todos os teores).



Fonte: Arquivo pessoal.

Ao confrontar os resultados da pesquisa com alguns resultados alcançados (Guérios, 2013; Cunha, 2014; Silva *et al.*, 2016; Vieira, 2013), ao acrescentar a vermiculita expandida na mistura de solos, o composto solo-vermiculita foi a mistura que mais obteve redução na densidade dos materiais, como também, sem a presença de trincas e fissuras para os teores trabalhados. Assim a mistura apresentou com êxito redução de 29% do peso entre o SN e o S+25%V.

5.4 TESTE DE UMEDECIMENTO

A seguir serão apresentados os resultados dos ensaios do teste de umedecimento dos corpos de prova (SN, S+12,5%V e S+25%V). Foram realizados dois corpos de prova para cada teor. Os corpos de prova foram compactados nas umidades ótimas. Podem-se verificar os parâmetros dos ensaios no APÊNDICE-B.

Nota-se que os corpos de prova apresentam perda e ganho de massa d'água com o passar dos dias de ensaios, como a mesma tendência. Sendo que aos 7 e 21 dias apresentam perda de massa d'água e aos 14 dias apresentam ganho de massa d'água. A Tabela 5.6 apresenta os valores de perda e ganho de massa d'água. Posteriormente, são exibidos os valores correspondentes à temperatura e umidade ambiente no momento da pesagem dos corpos de prova conforme o dia de pesagem (Tabela 5.7).

Observa-se que a temperatura e a umidade do local onde se mantém os corpos de prova apresentam variações, portanto, podem influenciar no ganho ou perda de massa. A Figura 5.11 exibe a oscilação das massas de água dos corpos de prova.

Tabela 5.6. Resultados do ensaio do teste de umedecimento.

Amostra	N° AMOSTRA	Peso 0 dia (g)	Peso 7 dias (g)	Peso 14 dias (g)	Peso 21 dias (g)	W _{inicial} (%)	W _{final} (%)
SN	I	1700,5	1657,02	1663,7	1654,5	32,5	30,95
	II	1661,3	1621,76	1651,3	1631,5	32,81	33,10
S+12,5%V	I	1347,7	1303,57	1308,8	1298,9	29,95	28,10
	II	1337,7	1299,04	1330,7	1327,9	30,41	30,69
S+25%V	I	1179,4	1141,57	1203,9	1194,8	28,42	31,91
	II	1187,5	1150,83	1177,9	1168	29,21	27,30

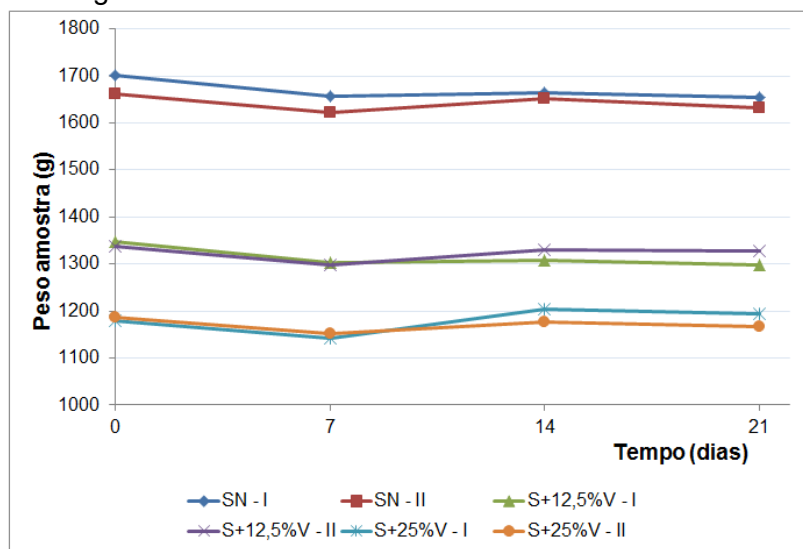
Fonte: Arquivo pessoal.

Tabela 5.7. Controle de temperatura e umidade ambiente.

Tempo (dias)	W _{ambiente-min} (%)	W _{ambiente-máx} (%)	T _{ambiente-min} (°C)	T _{ambiente-máx} (°C)
0	X	X	X	24,56
7	44	81	21,3	26,60
14	42	80	20,6	24,65
21	42	81	22,1	28,70

Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 5.11. Ensaio de umedecimento das amostras.



Fonte: Arquivo pessoal.

Para o primeiro corpo de prova da amostra SN, o composto perdeu aproximadamente 46 g de massa de água, já o segundo perdeu 29,8 g no decorrer dos 21 dias do teste de umedecimento. O primeiro corpo de prova para o teor S+12,%V perdeu 48,8 g de massa de água, logo, o segundo perdeu 9,8 g ao longo dos 21 dias. O primeiro corpo de prova para o teor de S+25%V perdeu 15,4 g, já o segundo perdeu 19,5 g ao decorrer dos 21 dias de ensaio.

Após o teste de umedecimento, os corpos de prova (SN e S+25%V) foram submetidos ao ensaio de resistência ao cisalhamento direto no estado natural de umidade. O objetivo era obter os parâmetros de resistência dos corpos de prova após um período (dias) em contato com o ambiente úmido, apresentados no próximo subitem.

5.5 AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DIRETO

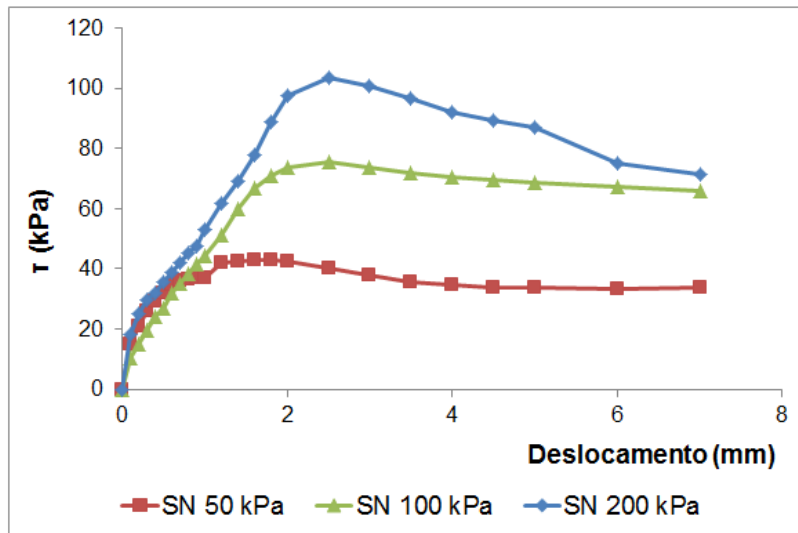
A seguir serão apresentados os resultados dos ensaios de resistência ao cisalhamento direto através das curvas e das envoltórias de Mohr-Coloumb dos corpos de prova para o solo com e sem adição de vermiculita expandida.

5.5.1 Curvas de cisalhamento direto (estado após o teste de umedecimento)

No APÊNDICE-B encontra-se a tabela que apresenta os dados das compactações realizadas para os ensaios de teste de umedecimento que, posteriormente, os corpos de prova foram cisalhados (SN e 25%V).

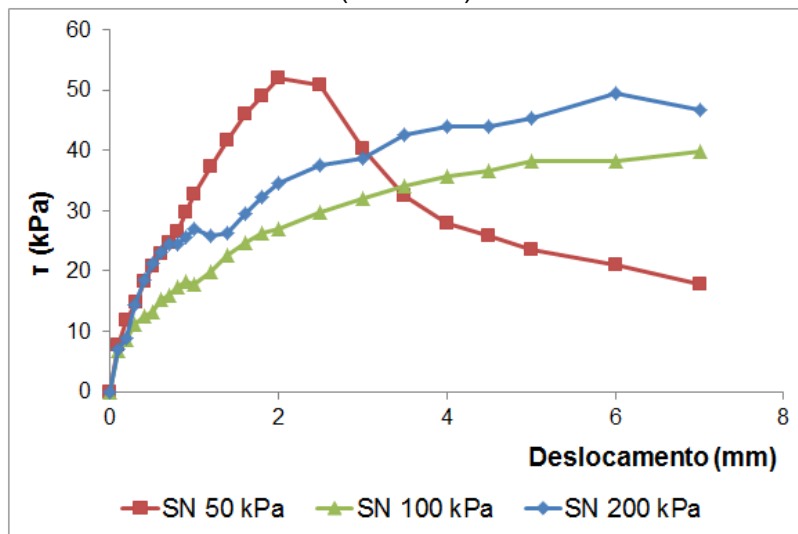
A Figura 5.12 e Figura 5.13 são apresentadas as curvas de resistência ao cisalhamento direto para as amostras (SN e S+25%V) aos 21 dias em ambiente úmido. Observação: no ensaio de resistência ao cisalhamento, foram utilizados os corpos de prova com a *numeração* I informados na tabela do APÊNDICE-B.

Figura 5.12. Curvas de resistência ao cisalhamento após o teste de umedecimento (SN).



Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 5.13. Curvas de resistência ao cisalhamento após o teste de umedecimento (S+25%V).



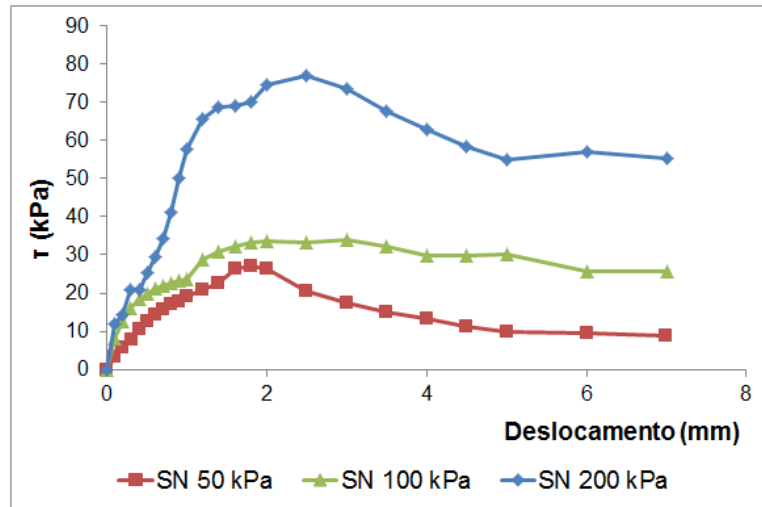
Fonte: Arquivo pessoal.

Observa-se que as curvas de resistência ao cisalhamento direto para o solo sem adição de vermiculita apresentaram as curvas cisalhantes. Logo, ao realizar o ensaio para o solo com adição de 25% de vermiculita, as tensões normais de 100 e 200 kPa apresentaram tensões cisalhantes menores que a tensão normal de 50 kPa. A perda de umidade dos corpos de prova pode influenciar no comportamento do solo-vermiculita, em que se observou a perda de umidade conforme o subitem 5.4, deixando-as frágeis.

5.5.2 Curvas de cisalhamento direto (estado inundado)

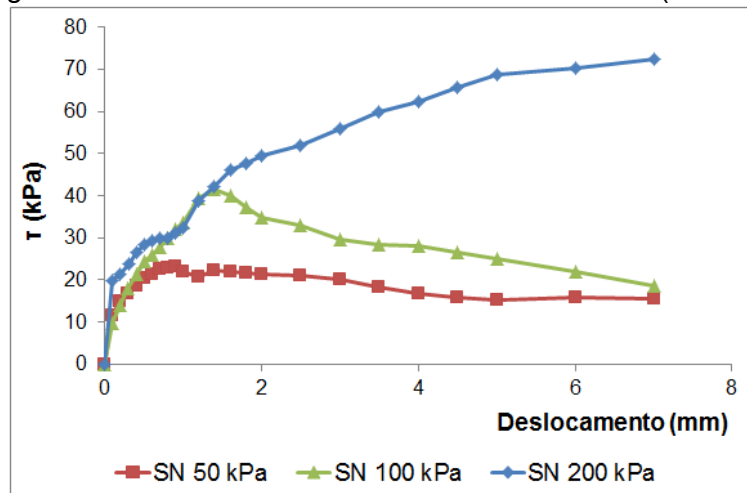
No APÊNDICE-C encontra-se a tabela que apresenta os dados das compactações realizadas para os ensaios de resistência ao cisalhamento direto inundado. As Figuras 5.14 a 5.18 são, respectivamente, as curvas de resistência ao cisalhamento direto inundado das amostras de SN, S+6%V, S+12,5%V, S+19%V e S+25%V.

Figura 5.14. Curvas de resistência ao cisalhamento (SN).



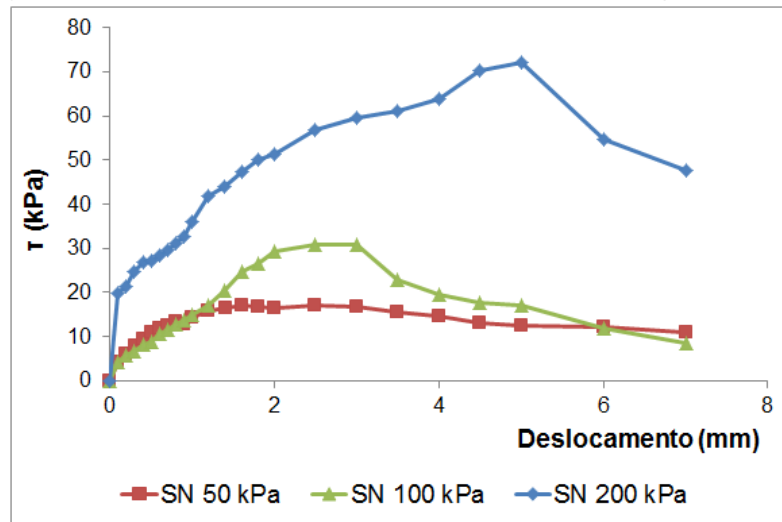
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 5.15. Curvas de resistência ao cisalhamento (S+6%V).



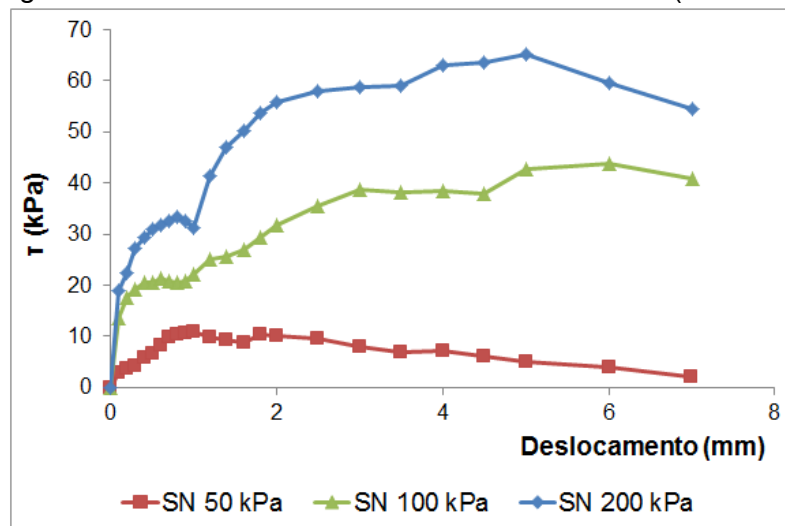
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 5.16. Curvas de resistência ao cisalhamento (S+12,5%V).



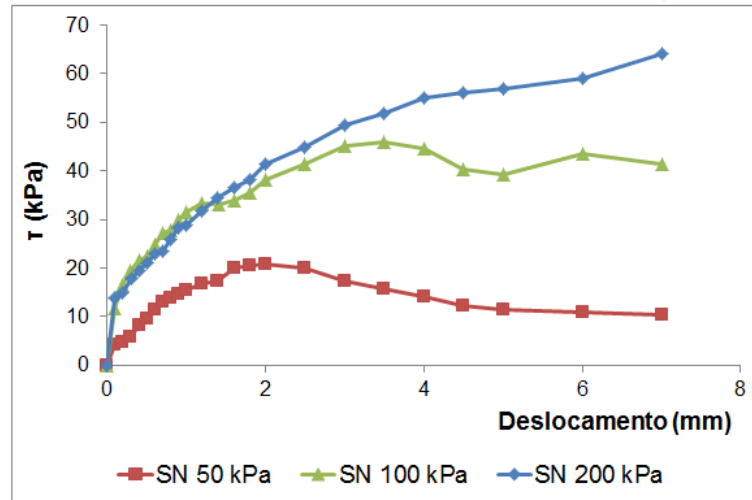
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 5.17. Curvas de resistência ao cisalhamento (S+19%V).



Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 5.18. Curvas de resistência ao cisalhamento (S+25%V).



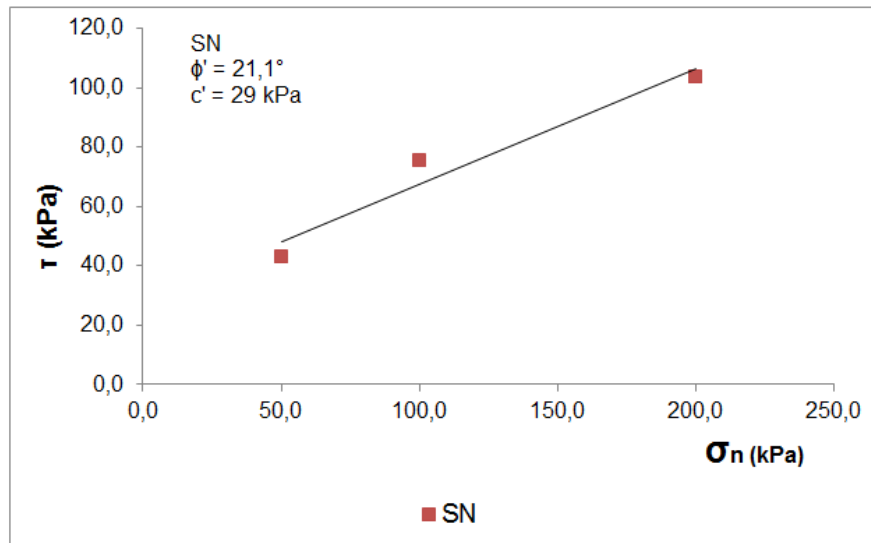
Fonte: Arquivo pessoal.

Observa-se que as curvas SN, S+6%V, S+12,5%V e S+19%V apresentaram tensões cisalhantes de ruptura pico e as curvas S+25%V não apresentaram nitidamente tais tensões.

5.5.3 Envoltórias de Mohr-Coulomb (estado após o teste de umedecimento)

A seguir são apresentadas as envoltórias de Mohr-Coulomb para os ensaios realizados após o teste de umedecimento das amostras (SN e S+25%V). Na Figura 5.19 são apresentadas as envoltórias de resistência ao cisalhamento de Mohr-Coulomb, obtidas para o solo com e sem adição de vermiculita e a **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta os parâmetros obtidos das respectivas envoltórias.

Figura 5.19. Envoltórias de Mohr-Coulomb ensaio após o teste de umedecimento para o solo com e sem adição de vermiculita.



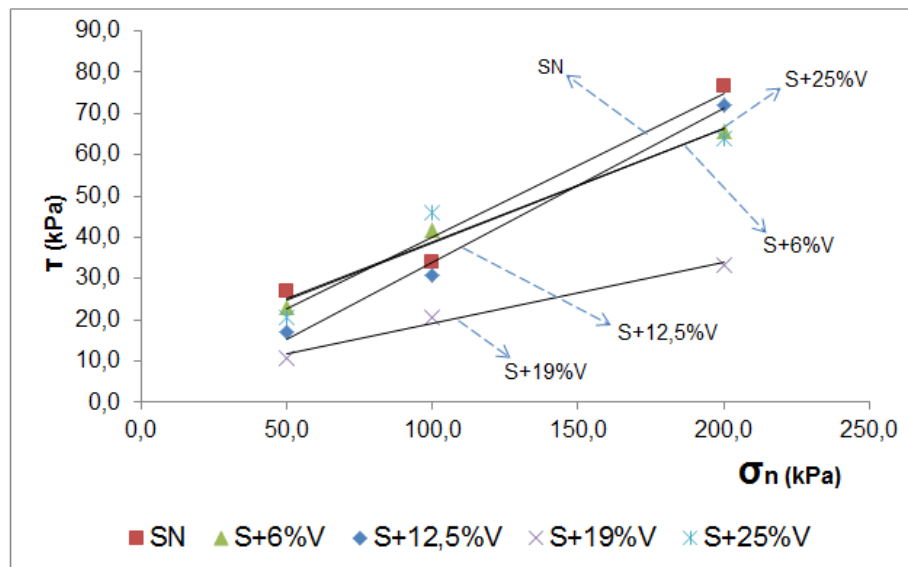
Fonte: Arquivo pessoal.

Não foi possível obter a coesão e ângulo de atrito interno das partículas para os teores de S+12,5%V e S+25%V devido à fragilidade do corpo de prova.

5.5.4 Envoltórias de Mohr-Coulomb (estado inundado)

A Figura 5.20 mostra as envoltórias de Mohr-Coulomb para o solo com e sem adição de vermiculita e a Tabela 5.8 apresenta os parâmetros obtidos das respectivas envoltórias.

Figura 5.20. Envoltórias de Mohr-Coulomb para o solo com e sem adição de vermiculita.



Fonte: Arquivo pessoal.

Tabela 5.8 Parâmetros obtidos de resistência ao cisalhamento direto inundado.

Material	φ' (°)	c' (kPa)
SN	19,1	5,0
S+6%V	15,5	11,0
S+12,5%V	20,5	0
S+19%V	8,4	4,0
S+25%V	15,4	11,0

Fonte: Arquivo pessoal.

Ao comparar tais resultados pode-se notar que ao inserir a vermiculita, existe uma variação na coesão e no ângulo de atrito sem possuir um padrão no qual ao inserir 6% de vermiculita, o composto reduz o ângulo de atrito, porém aumenta a coesão.

Agora, ao inserir 12,5% de vermiculita o comportamento é outro, em que apresenta aumento no ângulo de atrito e a coesão apresenta-se negativa. O resultado negativo da coesão pode ser devido aos valores obtidos para as tensões cisalhantes, realizando a mudança da inclinação da reta, assim ao interceptar o eixo da ordenada, a coesão obtém valor negativo. Portanto, devem-se realizar novamente as curvas de cisalhamento direto para o composto S+12,5%V para nova análise.

Observa-se que o teor de 19% de vermiculita foi à mistura que apresentou os menores valores de ângulo de atrito interno e coesão. E para a adição de 25% de vermiculita, a mistura apresenta o mesmo comportamento que o solo com adição de

6%, apresentando valores bem próximos, ou seja, ao inserir 6% ou 25% de vermiculita, os compostos podem adquirir as mesmas resistências ao serem cisalhados.

Ao analisar a coesão dos materiais, pode-se verificar que houve aumento significativo de 6 kPa para as amostras de S+6%V e S+25%V em relação ao solo puro. Vecili (2003) explica que o aumento da coesão é independente da tensão efetiva atuante, pois é conhecida como sucção (coesão aparente), em que se aumenta a resistência proporcionalmente à diminuição do teor de umidade do corpo de prova.

5.5.5 Índice de vazios, grau de saturação e porosidade

Os dados a seguir servem como registro dos ensaios realizados, auxiliando as análises dos resultados. A Tabela 5.9 apresenta o índice de vazios, o grau de saturação e a porosidade das amostras antes de realizar o ensaio de cisalhamento direto.

Tabela 5.9. Índice de vazios, grau de saturação e porosidade.

Situação	Amostra	σ_n (kPa)	e	Sr	n
INUNDADOS	SN	50	0,66	126,75	0,4
		100	0,84	101,84	0,46
		200	1,22	70,29	0,55
	S+6%V	50	0,69	116,73	0,41
		100	0,5	164,53	0,33
		200	1,1	72,81	0,52
	S+12,5%V	50	0,87	88,35	0,46
		100	1,02	71,88	0,51
		200	1,21	62,98	0,55
	S+19%V	50	0,94	79,64	0,48
		100	1,42	52,8	0,59
		200	1,04	71,82	0,51
	S+25%V	50	1,05	69,56	0,51
		100	1,15	63,43	0,53
		200	1,6	46,73	0,62
21 DIAS	SN	50	0,61	139,18	0,38
		100	0,75	109,62	0,43
		200	0,61	137,54	0,38
	S+25%V	50	1,06	75,68	0,52
		100	1,56	52,09	0,61
		200	1,07	76,04	0,52

Fonte: Arquivo pessoal.

Percebe-se que o índice de vazios (**e**) é variado e mantém uma tendência em aumentar conforme a adição de vermiculita no solo, do mesmo modo, pelo aumento da tensão normal, aplicada.

O grau de saturação (**Sr**) apresenta uma redução linear conforme a adição de vermiculita, pois o solo-vermiculita precisa de menos adição de água em relação ao solo puro para se obter o ponto ótimo e a porosidade (**n**) aumenta

segundo o índice de vazios presente em cada amostra, tais valores podem influenciar diretamente na resistência ao cisalhamento direto.

Verifica-se que o ângulo de atrito do solo-vermiculita para qualquer adição reduziu em relação ao solo puro, devido a influência dos parâmetros e , S_r e n serem menores para o solo puro, pois tais parâmetros indicam maior facilidade de percolação da água entre os poros das amostras (solo-vermiculita).

Viecili (2003) relata que, se a amostra estiver com alguma descontinuidade e/ou possuir excesso de vazios, estes poderão provocar fragilidade na amostra acarretando uma redução na resistência ao cisalhamento direto, por exemplo, a redução do ângulo de atrito.

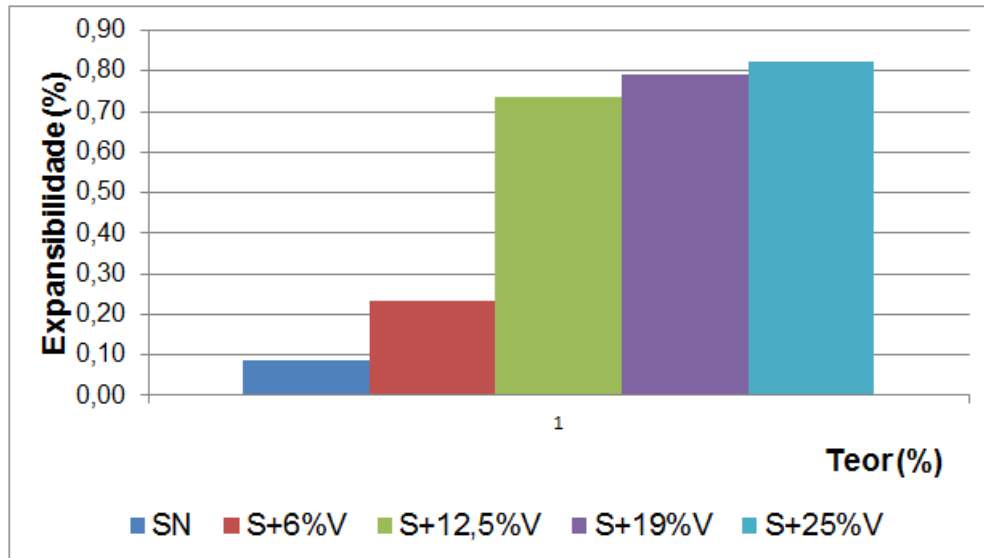
Lambe & Whitman (1979) apud Silva & Carvalho (2007) relatam que à medida que aumenta a porcentagem de água no solo, ela trabalha como lubrificante entre os grãos do solo reduzindo o ângulo de atrito entre elas.

Chrusciak (2013) relata que regiões menos compactadas podem influenciar diretamente nos resultados de resistência ao cisalhamento direto. Werlang e Piccolo (2013) documentaram que a aproximação e o entrosamento entre as partículas influenciam diretamente na resistência ao cisalhamento, como também, na redução do índice de vazios.

5.6 AVALIAÇÃO DA EXPANSÃO

Foram realizados ensaios de expansão apenas para os corpos de provas obtidos no ponto ótimo de cada teor. A Figura 5.21 exibe o comportamento do solo com e sem adição de vermiculita no ensaio de expansão no qual as amostras permaneceram imersas no tanque com água por 96 horas.

Figura 5.21. Ensaio de expansibilidade das amostras.



Fonte: Arquivo pessoal.

Ao analisar as colunas verticais pode-se observar que o solo com adição de 25% de vermiculita foi o que apresentou maior porcentagem de expansão em contato com a água, ou seja, à medida que adicione vermiculita, a porcentagem de expansibilidade aumentaria de forma linear.

Em relação à diferença de expansão do solo natural com adição de 25% de vermiculita expandida, o material expande aproximadamente 0,73%, pois o aumento de expansão dos corpos de prova com adição de vermiculita está relacionado com a propriedade de absorver e expandir ao entrar em contato com a água, como foi observado no subitem 5.2.4.

Segundo o manual do DNIT (2006), estruturas de aterros podem apresentar até 4 % de expansão. Então, o solo com adição de 25% de vermiculita expandida está na faixa admissível para a recomposição.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

6.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Através dos resultados obtidos na presente pesquisa é possível concluir que:

- Para as condições de compactação da energia Proctor Normal, todos os teores designados podem ser moldados (6%, 12,5%, 19%, 25% e 30%) e, visualmente, não apresentam trincas e fissuras.
- Ao se realizar a compactação com adição de vermiculita expandida, houve redução significativa do peso específico seco máximo de 29%, para o solo com adição de 25% de vermiculita expandida em peso com relação ao solo em estado natural.
- Ao comparar as reduções de peso específico seco máximo na presente pesquisa, com valores obtidos pelos autores citados, mesmo que as porcentagens não sejam próximas, o composto solo-vermiculita proporcionou reduções extraordinárias como material alternativo para preenchimento de cavas.
- Ao realizar o ensaio de expansão no tanque d'água, o solo-vermiculita apresentou expansibilidade de 0,73% maior que o solo em estado natural. Portanto, se houver presença de lençol freático ou umidade próxima de regiões reaterradas, sugere-se realizar um sistema de drenagem. Pois o líquido poderá influenciar desfavoravelmente na durabilidade das misturas.
- O solo-vermiculita expandida apresentou uma redução de até 20% no ângulo de atrito interno das partículas, e dobrou o valor na coesão nos ensaios inundados para o teor de 25% de vermiculita expandida em peso com relação ao solo em estado natural.
- Por fim, conclui-se que a mistura de solo-vermiculita, com o solo laterítico e proporções estudados neste trabalho, apresenta efeitos benéficos, gerando camadas mais leves como material de preenchimento de cavas urbanas, sendo recomendado na proporção de 25% de vermiculita expandida em peso com relação ao solo em estado natural.

6.2 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

- Estudar o comportamento de solo-vermiculita diferentes teores de umidade e energia de compactação.
- Estudar o comportamento de outros tipos de solo com adição de vermiculita expandida.
- Avaliar o comportamento de solo-vermiculita com adição de materiais cimentantes como cal hidratada ou cimento.
- Realizar ensaios de resistência triaxial para determinar o comportamento mecânico do solo com adição de vermiculita.
- Realizar ensaios com microscópio eletrônico de varredura.
- Realizar ensaios para analisar as propriedades químicas dos materiais.
- Realizar ensaios de cisalhamento direto com o tempo estipulado pela norma ASTM D 3080.

7 REFERÊNCIAS

ABNT- Associação Brasileira de Normas Técnicas.

_NBR 6457: Amostra de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 1986.

_NBR 6458: Grãos e pedregulho retidos na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro, 1984.

_NBR 6459: Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 1984.

_NBR 6508: Solo – Grãos de solos que passam na peneira 4,8 mm – Determinação da Massa Específica. Rio de Janeiro, 1984.

_NBR 7180: Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 1984.

_NBR 7181: Solo - Análise Granulométrica. Rio de Janeiro, 1984.

_NBR 7182: Solo - Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 1986.

_NBR 9895: Solo - Índice de Suporte Califórnia. Rio de Janeiro, 1987.

_NBR 10838: Solo – Determinação da massa específica aparente de amostras indeformadas, com o emprego da balança hidrostática. Rio de Janeiro, 1988.

ASTM – American Society for Testing Materials.

_ASTM D 3080-98: Standard test Method for Direct Shear Test of Soil Under Consolidated Drained Condition.

BUDHU, M. Fundações e estruturas de contenção. 1 ed. Rio de Janeiro: LTC, p. 2-20, 2015.

CARVALHO, J. C. Livro comemorativo dos vinte anos do programa de pós-graduação em geotecnia da universidade de Brasília. Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Coordenação de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, DF, 1 vol, p. 136, 2009.

CHIOSSI, N. J. Geologia de engenharia. 3 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2013.

CHRUSCIAK, M. R. Análise da Melhoria de Solos Utilizando Frangmentos de Borracha. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-221/13, Departamento de Engenharia Civil. Universidade de Brasília, Brasília-DF, 2013.

CUNHA, V. M. Avaliação experimental da mistura solo-cimento para aplicação em camadas de base de pavimentação. Monografia, Faculdade de Tecnologia e Ciências Sociais aplicadas, Centro Universitário de Brasília. Brasília – DF, 2014.

DAS, B. M. Fundamentos de Engenharia Geotécnica. 6 ed. São Paulo: Thomson Learning, 2015.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte. Manual de Pavimentação. 3 ed. Rio de Janeiro: DNIT, 2006.

GUÉRIOS, E. M. Estudo do melhoramento de solo com adição de cal hidratada para uso em pavimento urbano. Trabalho de conclusão de curso em engenharia de produção civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

LIMA, M. C. Degradação físico-química e mineralógica de maciços junto às voçorocas. Tese de Mestrado, Publicação G. TD-17A/03, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2003.

SILVA, A. J. N; CARVALHO, F. G. Coesão e resistência ao cisalhamento relacionadas a atributos físicos e químicos de um latossolo amarelo de tabuleiro costeiro. R. Bras. Ci. Solo, 31:853-862, p. 853-862, 2007.

SILVA, S. A. A.; VILLANOVA, C. E. D.; ANTE, J. R. O. Avaliação do comportamento mecânico do solo laterítico de Brasília misturado com a fração fina de pneu de borracha. Projeto de Iniciação Científica, Departamento de Engenharia Civil, Centro Universitário de Brasília, Brasília, DF, 2016.

SZNELWAR, J. J.; SCALABRIN, R. Desenvolvimento de estudos para elaboração do plano duodecenal 2010-2030 de geologia, mineração e transformação mineral. Projeto de assistência técnica ao setor de energia, Ministério de Minas e Energia. 2009.

PINTO, C. de S. Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 Aulas. 3 ed. São Paulo: Oficina de textos. p. 9-61, 2006.

VIECILI, C. Determinação dos parâmetros de resistência do solo de Ijuí a partir do ensaio de cisalhamento direto. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Regional do Noroeste, Rio Grande do Sul, 2003.

VIEIRA, K. S. Propriedades geomecânicas de um solo compactado com vermiculita para fins de cobertura em aterro de resíduos de resíduos. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2013.

WERLANG, M. K.; PICCOLO. A. Propriedades mecânicas de resistência ao cisalhamento, compressibilidade, permeabilidade e a conformação do relevo no sudoeste do município de São Pedro do Sul – RS. Revista do Centro de Ciências Naturais e Exatas, UFSM. Santa Maria – RS, 2013.

APÊNDICE

A - Parâmetros obtidos para montar as curvas de compactação

A seguir são apresentados os resultados referentes aos ensaios de compactação Proctor Normal para obtenção do peso específico seco máximo e umidade ótima para o solo com e sem adição de vermiculita expandida (Pág. 41). Observação: os valores que estiverem grifados de laranja são valores que não entraram no cálculo na média da umidade.

Tabela 1. Resultados do ensaio de compactação Proctor Normal (SN).

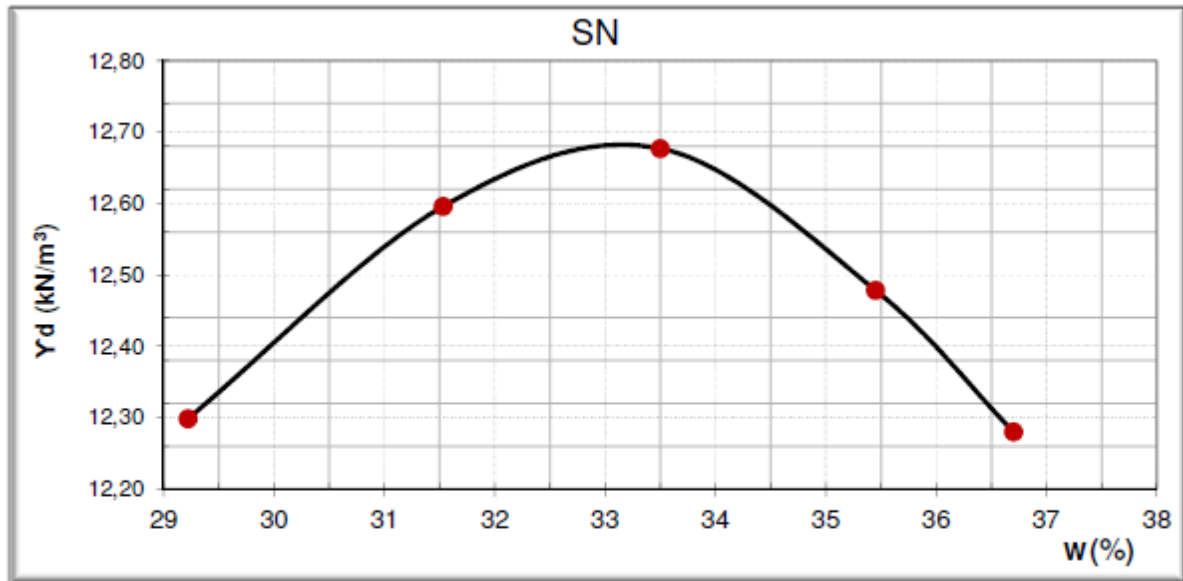
NBR 7182

ENSAIO DE COMPACTAÇÃO					
Aluno: Sonny Albert			Energia de Compactação: NORMAL - 3/26		
Amostra: SN			<i>Todo material passou na peneira 4,8 mm</i>		
<i>Ensaio realizado sem reuso de material</i>			<i>Todo material passou na peneira 4,8 mm</i>		
Molde N°	Altura (cm)	Diâmetro (cm)	Volume (cm³)	Peso (g)	Cilindro
x3	12,70	10,01	999,45	2313,9	pequeno

Amostra Compactada e molde (g)	cap. n°	Ph + T (g)	Ps + T (g)	T (g)	Umidade (%)	Umidade Média (%)	γ_d (kN/m³) (kN/m³)	Umidade prevista (%)	Variação (%)
3933,0	5	76,10	62,10	14,08	29,15	29,22	12,30	30,5	-1,28
	2	65,87	54,41	13,75	28,17				
	H106	60,42	50,50	16,66	29,29				
4001,8	34	66,27	53,61	13,29	31,40	31,53	12,60	32,5	-0,97
	9	68,57	55,52	14,34	31,68				
	50	68,95	55,79	14,04	31,51				
4038,1	32	81,56	64,72	14,39	33,47	33,50	12,68	34,5	-1,00
	40	72,76	58,03	14,09	33,53				
	12	62,13	50,12	13,52	32,82				
4035,9	28	68,12	54,02	14,35	35,53	35,45	12,48	36,5	-1,05
	42	66,26	52,19	12,63	35,56				
	35	70,23	55,34	13,09	35,26				
3823,2	H107	66,86	55,99	16,52	27,52	36,70	12,28	38,5	-1,80
	17	59,52	49,46	12,82	27,45				
	7	55,26	46,23	13,27	27,38				

Fonte: Arquivo pessoal.

Gráfico 1. Curva de compactação (SN).



W ótimo	33,3 %	
Yd máx.	12,68 KN/m³	1,29 g/cm³

Fonte: Arquivo pessoal.

Tabela 2. Resultados do ensaio de compactação Proctor Normal (S+6%V).

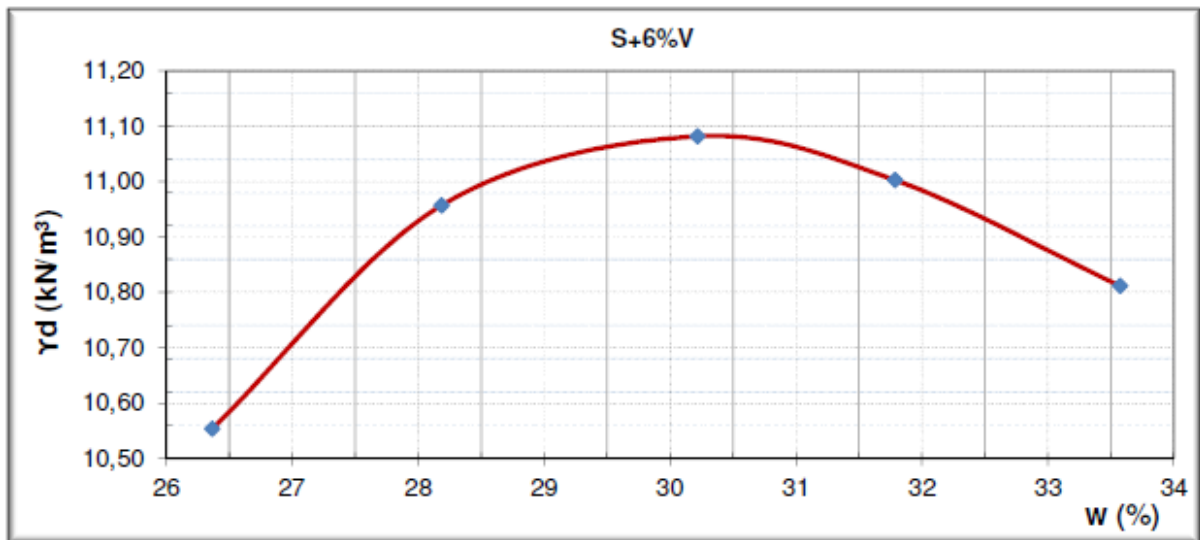
NBR 7182

ENSAIO DE COMPACTAÇÃO					
Aluno: Sonny Albert			DATA: 05/10/17		
Amostra: S+6%V			Energia de Compactação:		NORMAL - 3/26
Ensaio realizado sem reuso de material			Todo material passou na peneira 4,8 mm		
Molde N°	Altura (cm)	Diâmetro (cm)	Volume (cm³)	Peso (g)	Cilindro
x3	12,70	10,01	999,45	2313,9	pequeno

Amostra Compactada e molde (g)	cap. n°	Ph + T (g)	Ps + T (g)	T (g)	Umidade (%)	Umidade Média (%)	Yd(kN/m³) (kN/m³)	Umidade prevista (%)	Variação (%)
3672,6	H104	54,07	46,35	16,97	26,27	26,37	10,55	26,5	-0,13
	47	52,15	44,04	13,35	26,43				
	H100	58,68	49,75	16,03	26,46				
3744,9	2	49,72	41,78	13,74	28,30	28,19	10,96	28,5	-0,31
	D6	66,48	55,41	16,05	28,12				
	3	49,38	41,82	15,07	28,25				
3784,1	34	51,93	42,92	13,28	30,36	30,22	11,08	30,5	-0,28
	D2	74,18	60,96	17,06	30,09				
	1003	66,47	54,76	15,97	30,20				
3791,2	D8	76,99	62,25	16,03	31,88	31,79	11,00	32,5	-0,71
	H108	68,58	55,84	16,38	32,29				
	H1002	69,38	56,59	16,26	31,70				
3785,2	2	69,37	55,19	13,74	34,21	33,57	10,81	34,5	-0,93
	0	73,53	59,45	17,40	33,49				
	H114	59,16	48,19	15,61	33,66				

Fonte: Arquivo pessoal.

Gráfico 2. Curva de compactação (S+6%V).



W ótimo	30,3 %	
γd máx.	11,08 KN/m ³	1,13 g/cm ³

Fonte: Arquivo pessoal.

Tabela 3. Resultados do ensaio de compactação Proctor Normal (S+12,5%V).

NBR 7182

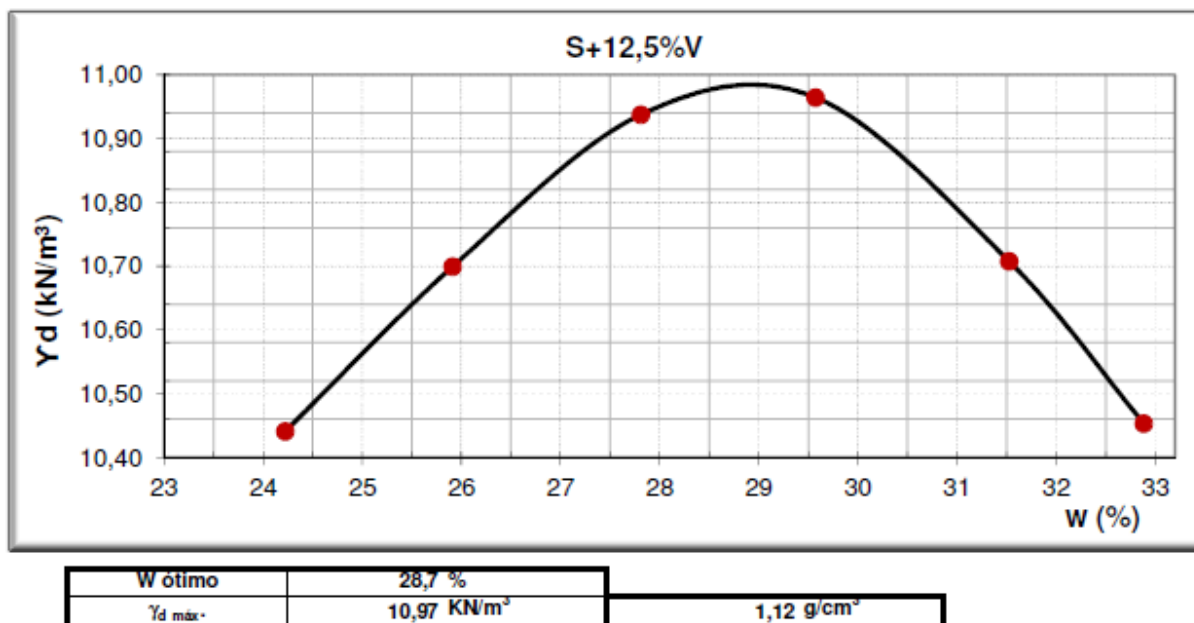
ENSAIO DE COMPACTAÇÃO

Aluno: Sonny Albert			DATA: 28/09/17		
Amostra: S+12,5%V			Energia de Compactação:		NORMAL - 3/26
Ensaio realizado sem reuso de material			Todo material passou na peneira 4,8 mm		
Molde N°	Altura (cm)	Diâmetro (cm)	Volume (cm ³)	Peso (g)	Cilindro
x3	12,70	10,01	999,45	2313,9	pequeno

Amostra Compactada e molde (g)	cap. n°	Ph + T (g)	Ps + T (g)	T (g)	Umidade (%)	Umidade Média (%)	γd(kN/m ³) (kN/m ³)	Umidade prevista (%)	Variação (%)
3635,3	211	105,08	89,87	26,59	24,03	24,22	10,44	26,5	-2,28
	205	114,29	97,08	26,30	24,30				
	1011	122,83	105,49	34,25	24,34				
3696,4	1013	97,39	84,86	36,19	25,75	25,91	10,70	28,5	-2,59
	1015	91,89	79,69	32,85	26,05				
	1010	118,04	100,73	34,02	25,94				
3738,1	1007	147,59	122,71	34,16	28,09	27,81	10,94	30,5	-2,69
	1023	124,76	105,41	35,06	27,51				
	1017	139,95	116,73	33,33	27,84				
3761,3	10171	116,20	97,67	34,82	29,48	29,57	10,96	32,5	-2,93
	206	139,28	113,67	27,61	29,76				
	224	134,22	110,08	28,19	29,48				
3748,7	1022	155,87	126,09	31,69	31,55	31,52	10,71	34,5	-2,98
	1024	168,73	136,47	33,63	31,38				
	1018	181,04	145,19	31,91	31,65				
3729,1	H14	76,26	60,94	14,27	32,84	32,88	10,45	36,5	-3,62
	H15	68,80	55,32	14,37	32,90				
	H16	61,67	49,61	12,95	32,91				

Fonte: Arquivo pessoal.

Gráfico 3. Curva de compactação (S+12,5%V).



Fonte: Arquivo pessoal.

Tabela 4. Resultados do ensaio de compactação Proctor Normal (S+19%V).

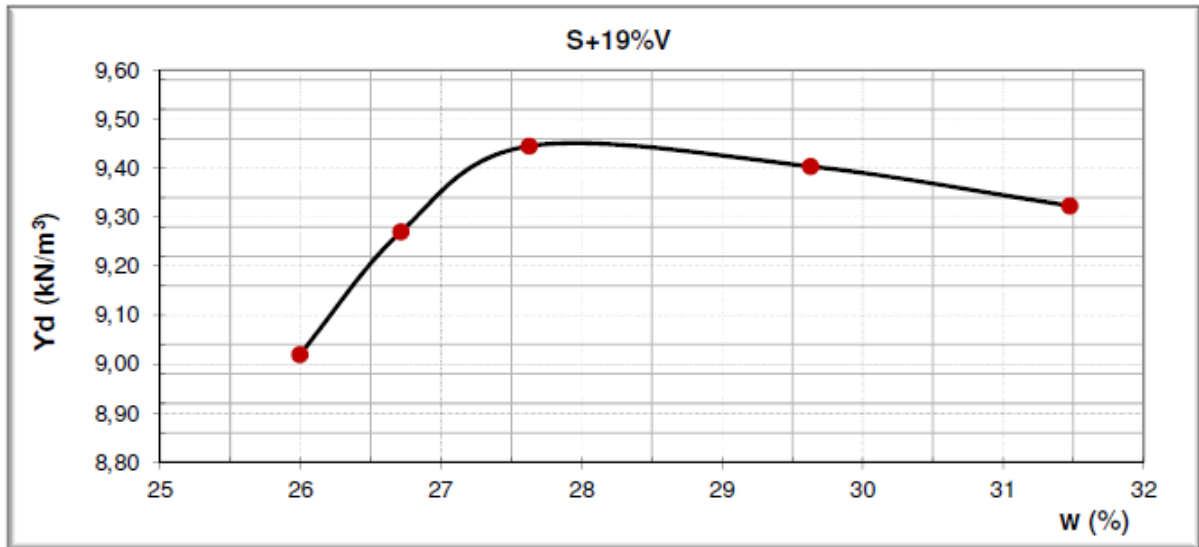
NBR 7182

ENSAIO DE COMPACTAÇÃO					
Aluno: Sonny Albert			DATA: 29/09/17		
Amostra: S+19%V			Energia de Compactação:		NORMAL - 3/26
Ensaio realizado sem reuso de material			Todo material passou na peneira 4,8 mm		
Molde N°	Altura (cm)	Diâmetro (cm)	Volume (cm³)	Peso (g)	Cilindro
x3	12,70	10,01	999,45	2313,9	pequeno

Amostra Compactada e molde (g)	cap. n°	Ph + T (g)	Ps + T (g)	T (g)	Umidade (%)	Umidade Média (%)	γd(kN/m³)	Umidade prevista (%)	Variação (%)
3471,7	H100	46,63	40,30	16,03	26,09	26,00	9,02	26,5	-0,50
	28	50,96	43,41	14,36	25,96				
	H103	55,27	47,15	15,86	25,94				
3510,6	22	61,82	51,60	13,67	26,94	26,71	9,27	27,5	-0,79
	1	67,27	56,00	13,50	26,51				
	15	59,62	49,75	12,79	26,70				
3542,0	H113	45,40	38,82	15,11	27,73	27,63	9,44	28,5	-0,87
	D2	55,85	47,49	17,06	27,47				
	D8	55,15	46,67	16,03	27,68				
3555,8	27	62,99	51,90	14,34	29,51	29,63	9,40	30,5	-0,87
	22	56,24	46,50	13,67	29,67				
	D1	62,02	51,44	15,80	29,71				
3562,7	1000	48,11	40,49	16,31	31,56	31,47	9,32	32,5	-1,03
	1003	56,46	46,79	15,96	31,36				
	H108	60,00	49,55	16,38	31,51				

Fonte: Arquivo pessoal.

Gráfico 4. Curva de compactação (S+19%V).



W ótimo	27,9 %	
Yd máx.	9,49 kN/m³	0,97 g/cm³

Fonte: Arquivo pessoal.

Tabela 5. Resultados do ensaio de compactação Proctor Normal (S+25%V).

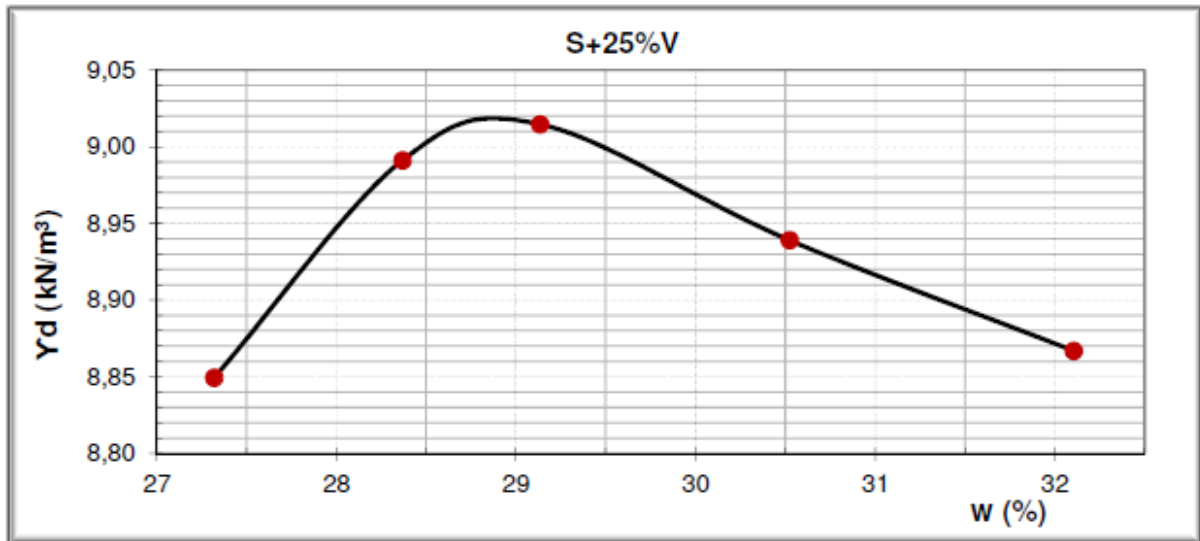
NBR 7182

ENSAIO DE COMPACTAÇÃO					
Aluno: Sonny Albert			DATA: 28/09/17		
Amostra: S+25%V		Energia de Compactação:		NORMAL - 3/26	
<i>Ensaio realizado sem reuso de material</i>			<i>Todo material passou na peneira 4,8 mm</i>		
Molde N°	Altura (cm)	Diâmetro (cm)	Volume (cm³)	Peso (g)	Cilindro
x3	12,70	10,01	999,45	2313,9	pequeno

Amostra Compactada e molde (g)	cap. n°	Ph + T (g)	Ps + T (g)	T (g)	Umidade (%)	Umidade Média (%)	Yd (kN/m³)	Umidade prevista (%)	Varição (%)
3461,8	0	54,46	46,46	17,40	27,52	27,32	8,85	29,5	-2,18
	48	40,73	34,89	13,36	27,11				
	31	42,73	36,33	12,89	27,33				
3489,8	D2	71,61	59,64	17,06	28,13	28,37	8,99	30,5	-2,13
	46	57,06	47,53	13,07	27,67				
	H108	74,94	61,91	16,38	28,61				
3499,9	116	17,91	15,19	5,82	28,98	29,13	9,01	31,5	-2,37
	95	17,26	14,67	5,79	29,22				
	90	16,29	13,96	5,98	29,20				
3502,6	39	60,33	49,48	13,97	30,55	30,52	8,94	33,5	-2,98
	27	70,90	57,68	14,35	30,50				
	H114	68,33	56,22	15,61	29,80				
3507,3	64	17,89	14,94	5,76	32,15	32,10	8,87	34,5	-2,40
	110	17,55	14,68	5,71	32,01				
	84	15,58	13,22	5,89	32,16				

Fonte: Arquivo pessoal.

Gráfico 5. Curva de compactação (S+25%).



W ótimo	29,2 %	
Yd máx.	9,02 kN/m³	0,92 g/cm³

Fonte: Arquivo pessoal.

Tabela 6. Resultados do ensaio de compactação Proctor Normal (S+30%V).

NBR 7182

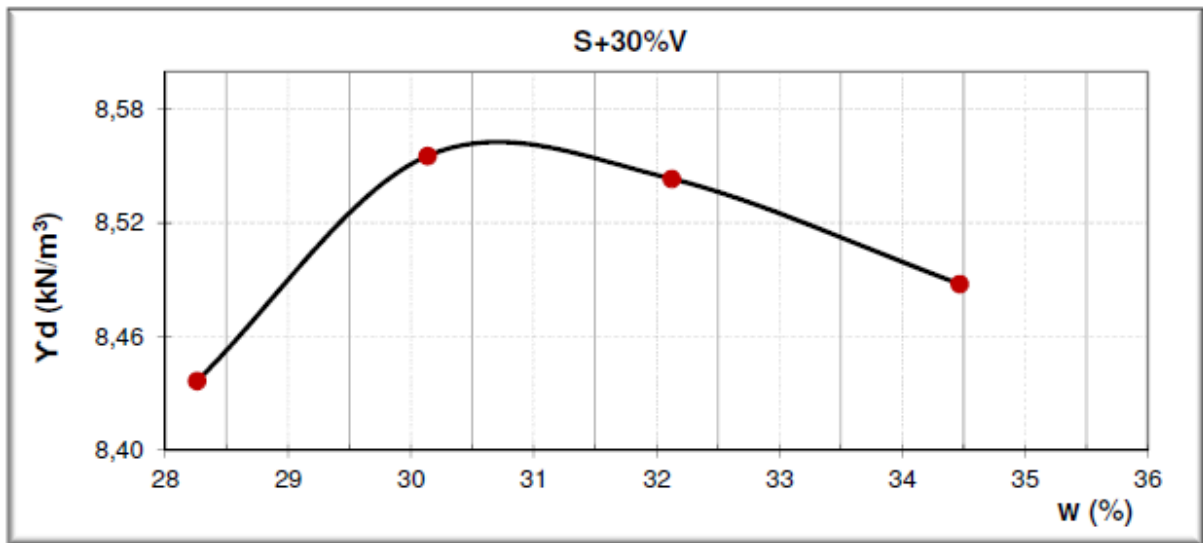
ENSAIO DE COMPACTAÇÃO

Aluno: Sonny Albert			DATA: 28/09/17		
Amostra: S+30%V			Energia de Compactação:		NORMAL - 3/26
<i>Ensaio realizado sem reuso de material</i>			<i>Todo material passou na peneira 4,8 mm</i>		
Molde N°	Altura (cm)	Diâmetro (cm)	Volume (cm³)	Peso (g)	Cilindro
x3	12,70	10,01	999,45	2313,9	pequeno

Amostra Compactada e molde (g)	cap. n°	Ph + T (g)	Ps + T (g)	T (g)	Umidade (%)	Umidade Média (%)	Yd(kN/m³) (kN/m³)	Umidade prevista (%)	Variação (%)
3416,3	D2	44,06	38,14	17,06	28,11	28,26	8,44	30,5	-2,24
	21	43,14	36,83	14,54	28,27				
	H113	43,70	37,37	15,10	28,40				
3448,2	31	47,58	39,54	12,88	30,17	30,14	8,56	32,5	-2,36
	46	38,69	32,75	13,07	30,18				
	D8	42,38	36,29	16,03	30,05				
3463,9	41	56,83	46,14	12,97	32,23	32,12	8,54	34,5	-2,38
	39	50,56	41,52	13,31	32,03				
	7	48,11	40,24	15,72	32,11				
3476,7	44	57,21	45,98	13,25	34,31	34,47	8,49	36,5	-2,03
	H105	62,69	50,67	16,02	34,70				
	H1002	51,09	42,17	16,26	34,39				

Fonte: Arquivo pessoal.

Gráfico 6. Curva de compactação (S+30%V)



W ótimo	30,7 %	
γd máx.	8,56 KN/m³	0,87 g/cm³

Fonte: Arquivo pessoal.

Tabela 7. Resultados do ensaio de compactação Proctor Normal (100%V).

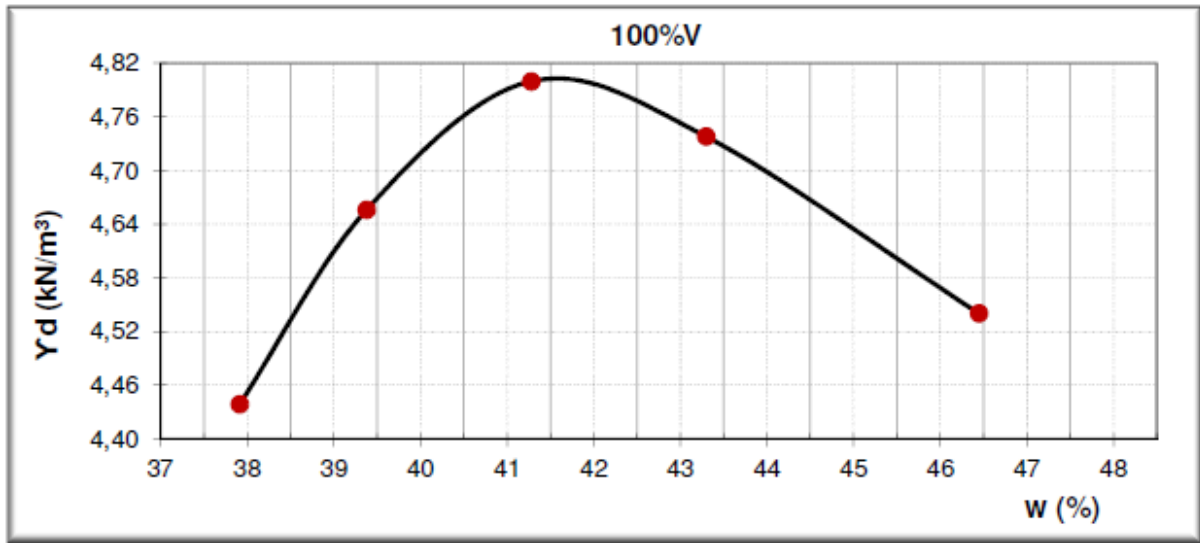
NBR 7182

ENSAIO DE COMPACTAÇÃO					
Aluno: Sonny Albert			DATA: 07/10/17		
Amostra: 100%V		Energia de Compactação:		NORMAL - 3/26	
<i>Ensaio realizado sem reuso de material</i>			<i>Todo material passou na peneira 4,8 mm</i>		
Molde N°	Altura (cm)	Diâmetro (cm)	Volume (cm³)	Peso (g)	Cilindro
x3	12,70	10,01	999,45	2313,9	pequeno

Amostra Compactada e molde (g)	cap. n°	Ph + T (g)	Ps + T (g)	T (g)	Umidade (%)	Umidade Média (%)	γd(kN/m³)	Umidade prevista (%)	Variação (%)
2935,3	22	37,36	30,91	13,67	37,38	37,41	4,44	38,5	-1,09
	45	35,54	29,52	13,39	37,33				
	1	40,77	33,96	15,79	37,53				
2972,7	210	85,42	68,99	26,53	38,71	38,88	4,66	40,5	-1,62
	1023	75,25	63,99	35,06	38,94				
	1020	74,15	63,04	34,55	38,99				
3002,3	7000	65,24	55,96	33,26	40,86	40,78	4,80	42,5	-1,72
	1014	69,65	59,67	35,18	40,70				
	1006	64,32	55,45	33,70	40,77				
3003,2	H18	41,64	33,58	14,68	42,64	42,80	4,74	44,5	-1,70
	H22	41,95	33,52	13,87	42,91				
	H24	36,30	29,43	13,40	42,85				
2989,0	1020	82,99	67,73	34,56	46,00	45,95	4,54	46,5	-0,55
	1023	101,88	80,86	35,06	45,89				
	202	76,98	61,93	26,83	42,85				

Fonte: Arquivo pessoal.

Gráfico 7. Curva de compactação (100%V)



W ótimo	41,2 %	
γd máx.	4,80 KN/m³	0,49 g/cm³

Fonte: Arquivo pessoal.

Onde:

Ph = peso da amostra úmida;

Ps = peso da amostra seca;

T = peso da capsula;

Cap n° = número da capsula

Varição = cálculo da umidade ótima menos a umidade média.

B - Parâmetros de compactação obtidos para o teste de umedecimento e cisalhamento aos 21 dias

A seguir são apresentados os resultados adquiridos nos ensaios de compactação para as amostras SN, S+12,5%V e S+25%V no qual foram compactados dois corpos de prova para cada teor. Em seguida foram realizados: ensaios de umedecimento e, posteriormente, ensaios de resistência ao cisalhamento direto. Observação: os valores que estiverem grifados de laranja são valores que não entraram no cálculo na média da umidade.

Tabela 8. Resultados obtidos no ensaio de compactação para o teste de umedecimento e cisalhamento direto.

NBR 7182

ENSAIO DE COMPACTAÇÃO					
Alunos: Sonny			DATA: 06/11/17		
Amostra:		Energia de Compactação:		NORMAL - 3/26	
Ensaio realizado sem reuso de material			Todo material passou na peneira 4,8 mm		
Molde N°	Altura (cm)	Diâmetro (cm)	Volume (cm³)	Peso (g)	Cilindro
x3	12,70	10,01	999,45	2313,9	pequeno

Amostra compactada + molde (g)	capsula n°	Ph + T (g)	Ps + T (g)	T (g)	Umidade (%)	Umidade média (%)	γd(kN/m³)	Wótím (%)	N° AMOSTRA	Amostra tipo	σn (kPa)	Variação (%)
4014,4	9	50,70	41,80	14,34	32,42	32,50	12,60	33,30	I	SN	50	0,80
	19	51,42	42,51	15,10	32,51						100	
	46	49,70	40,70	13,06	32,58						200	
3975,2	H7	71,36	58,47	19,14	32,76	32,81	12,28	33,30	II	SN	X	0,49
	H1	64,83	53,60	19,45	32,90						X	
	H11	69,06	56,71	19,00	32,76						X	
3661,6	15	48,44	40,23	12,74	29,85	29,95	10,18	28,70	I	S+12,5%V	X	-1,25
	H103	46,92	39,76	15,85	29,97						X	
	4	53,08	44,51	15,98	30,03						X	
3651,6	H8	47,25	40,40	17,79	30,28	30,41	10,07	28,70	II	S+12,5%V	X	-1,71
	H5	55,16	47,03	20,27	30,41						X	
	H6	53,00	44,83	18,07	30,54						X	
3493,3	7	30,48	26,65	13,26	28,57	28,42	9,01	29,20	I	S+25%V	50	0,78
	H110	35,43	31,05	15,82	28,72						100	
	D1	30,85	27,56	15,79	27,99						200	
3501,4	H10	35,80	33,18	24,30	29,54	29,21	9,02	29,20	II	S+25%V	X	-0,01
	H3	30,04	28,30	18,99	18,75						X	
	H4	40,70	35,79	18,76	28,88						X	

Fonte: Arquivo pessoal.

C - Parâmetros de compactação obtidos para os ensaios de resistência ao cisalhamento direto inundado

A seguir serão exibidos os resultados adquiridos para os corpos de prova que foram submetidos aos ensaios de resistência ao cisalhamento direto inundado.

Tabela 9. Parâmetros obtidos no ensaio de compactação para o ensaio de cisalhamento direto inundado.

Amostra compactada + molde (g)	capsula n°	Ph + T (g)	Ps + T (g)	T (g)	Umidade (%)	Umidade média (%)	γd(kN/m³)	Wótím (%)	Amostra tipo	σn p/ cisalhar (kPa)	Variação (%)
3983,4	H9	80,09	65,49	19,00	31,41	31,42	12,47	33,3	SN	50	1,88
	H2	85,87	70,05	19,89	31,52					X	
	H12	87,28	71,32	20,40	31,34					X	
3980,9	119	25,56	20,72	5,77	32,30	32,20	12,38	33,3	SN	X	1,10
	66	28,06	22,63	5,71	32,12					100	
	86	20,87	17,18	5,71	32,18					200	
3759,9	46	59,87	48,83	13,07	30,87	30,92	10,84	30,3	S+6%V	50	-0,62
	28	53,81	44,54	14,35	30,69					X	
	38	58,35	47,64	13,31	31,20					X	
3804,4	H108	55,60	46,29	16,38	31,10	31,12	11,16	30,3	S+6%V	X	-0,82
	H114	58,91	48,67	15,60	30,97					100	
	H106	53,61	44,80	16,65	31,30					200	
3643,8	D3	37,50	32,35	15,08	29,78	27,56	10,23	28,7	S+12,5%V	50	1,14
	H108	47,11	40,78	16,38	25,96					X	
	7	46,23	39,23	13,26	26,95					200	
3643,8	D3	49,47	41,57	15,07	29,82	29,80	10,06	28,7	S+12,5%V	X	-1,10
	H108	48,52	41,13	16,38	29,83					100	
	1000	50,61	42,74	16,31	29,76					X	
3564,4	D7	51,71	43,57	15,72	29,22	29,37	9,49	27,9	S+19%V	50	-1,47
	H6	45,58	39,33	18,06	29,34					100	
	H9	46,25	40,03	19,00	29,54					200	
3503,5	H2	31,23	28,56	19,88	30,78	29,97	8,98	29,2	S+25%V	50	-0,77
	H9	30,08	27,54	19,00	29,67					100	
	H12	34,26	31,10	20,39	29,46					200	

Fonte: Arquivo pessoal.