

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**USO DE BIOTECNOLOGIA NA MELHORIA DE SOLOS
PARA FINS DE PAVIMENTAÇÃO RODOVIÁRIA.**

CLAUDIA MARICELA GÓMEZ MUÑETÓN

ORIENTADOR: JOSÉ CAMAPUM DE CARVALHO, Ph.D.
CO-ORIENTADOR: FERNANDO ARARIPE G. TORRES, Ph.D.

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM GEOTECNIA

BRASÍLIA / DF: MARÇO/2009

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**USO DE BIOTECNOLOGIA NA MELHORIA DE SOLOS
PARA FINS DE PAVIMENTAÇÃO RODOVIÁRIA.**

CLAUDIA MARICELA GÓMEZ MUÑETÓN

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE.**

APROVADA POR:

**JOSÉ CAMAPUM DE CARVALHO, Ph.D. (UnB)
(ORIENTADOR)**

**NEWTON MOREIRA DE SOUZA, Ph.D (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)**

**MARCOS MASSAO FUTAI, Ph.D (USP)
(EXAMINADOR EXTERNO)**

DATA: BRASÍLIA/DF, 17 de Março de 2009.

FICHA CATALOGRÁFICA

GÓMEZ MUÑETÓN, CLAUDIA MARICELA.

Uso de biotecnologia na melhoria de solos para fins de pavimentação rodoviária
[Distrito Federal] 2009

xii, 98 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Geotecnia, 2009)

Dissertação de mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil

1. Pavimentação

2. Biotecnologia

3. Solos tropicais

4. Biomineralização

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

GÓMEZ MUÑETÓN, C.M. (2009) **Uso de biotecnologia na melhoria de solos para fins de pavimentação rodoviária**. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-174/09, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 98 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Claudia Maricela Gómez Muñetón

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Uso de biotecnologia na melhoria de solos para fins de pavimentação rodoviária.

GRAU / ANO: Mestre / 2009

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta monografia de Projeto Final e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de Projeto Final pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Claudia Maricela Gómez Muñetón

CLN 407 Bloco C Apto 211

70855-530 – Brasília/DF – Brasil

“Sé firme en tus actitudes y perseverante en tu ideal, pero sé paciente, no pretendiendo que todo te llegue de inmediato. Haz tiempo para todo, y todo lo que es tuyo, vendrá a tus manos en el momento oportuno. Aprende a esperar el momento exacto para recibir los beneficios que reclamas. Espera con paciencia a que maduren los frutos para poder apreciar debidamente su dulzura. El éxito en la vida no se mide por lo que has logrado, sino por los obstáculos que has tenido que enfrentar en el camino.”

Anónimo

DEDICATÓRIA

A Deus, por ter me dado o privilegio de ter esta experiência que, além de me aportar conhecimentos profissionais, me deu crescimento pessoal e fortaleza para continuar.

A minha família pelo grande apoio e a companhia que me ofereceram para conseguir esta conquista.

As todas as pessoas que estiveram do meu lado me apoiando.

AGRADECIMENTOS

A Deus por me manter firme para não desistir na procura dos meus objetivos.

A meus pais Marina e Eduardo, e a minhas irmãs que sempre me deram um grande apoio, compreensão e confiança para não renunciar durante os momentos difíceis neste mestrado. Também porque sempre estiveram torcendo por meu sucesso.

A meus tios e tias, primos e primas, a Paola minha grande amiga, pelo apoio e preocupação para terminar com sucesso esta etapa.

Ao professor José Camapum de Carvalho por sua vontade de me orientar e pelo grande interesse de me ajudar a crescer como profissional e como pessoa.

A todos os professores da pós-graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília, pelos conhecimentos transmitidos durante o transcurso do meu mestrado.

Aos técnicos do laboratório de Geotecnia da UnB, pela sua ajuda durante a etapa experimental desta pesquisa. Igualmente, agradeço a Nararubia do laboratório de microbiologia dos alimentos da FAV, UnB, por sua paciência e ajuda, e aos técnicos dos laboratórios de DRX e FTIR por a rápida ajuda na realização dos ensaios.

Um especial agradecimento a Yamile Valencia pela presença e grande ajuda durante todo o transcurso do meu mestrado, especialmente durante o desenvolvimento da minha pesquisa.

Igualmente, um grande agradecimento para meus grandes amigos e amigas Sandra, Jimmy, Jorge, Diana Alejandra, Sonia, Diego, Nelson, Carolina Sánchez, Augusto, Carlos, Juan Fernando, Sergio, Sebastian, Juliana, Victoria, Edcelio e Janier. Especialmente, a Diana Paola, Liudy, Laura, Carolina e Wladimir, que estiveram sempre me acompanhando e me dando carinho, alegria e apoio nos momentos mais difíceis durante estes dois anos em Brasília.

Ao programa de pós-graduação em Geotecnia da UnB pela oportunidade de estudar e obter conhecimentos inesquecíveis que me fizeram crescer tanto como pessoa quanto como profissional.

A minha família geotécnica por me receber de braços abertos, também por me dar a alegria e companhia necessárias para superar todos os obstáculos durante meu mestrado.

Ao CNPq pelo apoio econômico

A Wisley, à professora Inês do programa de química, aos professores Ângela Patrícia e Fernando Araripe pelos grandes aportes que fizeram para melhorar meu trabalho.

A meus grandes amigos da Colômbia que sempre me apóiam para alcançar minhas metas. Especialmente a César que confiou em mim e me deu o apoio para conseguir estudar em Brasil.

E a todos aqueles que não sendo citados contribuíram de alguma forma para a finalização desta etapa, MUITO OBRIGADA! – MUCHAS GRACIAS!

RESUMO

USO DE BIOTECNOLOGIA NA MELHORIA DE SOLOS PARA FINS DE PAVIMENTAÇÃO RODOVIÁRIA

Esta dissertação apresenta o estudo da variação de algumas propriedades físicas e mecânicas de um solo laterítico proveniente da cidade satélite de Santa Maria na região do Planalto Central, Distrito Federal, por meio do uso de processos biotecnológicos, que consistiram na indução da precipitação de carbonato de cálcio (CaCO_3) mediante adição de um meio nutriente ao solo e do processo de hidrólise de uréia usando a enzima uréase proveniente do feijão de porco (*Canavalia Ensiformis*).

Para o desenvolvimento da pesquisa utilizou-se o solo natural e tratado compactado nas condições ótimas das energias Proctor normal e Proctor intermediário. Em seguida, para avaliação da influência das condições de cura quanto à umidade, uma parte dos corpos de prova foi mantida na condição de compactação, outra parte foi conduzida ao ramo seco ($w_{\text{ótimo}} - 3\%$) e uma última parte foi conduzida ao ramo úmido ($w_{\text{ótimo}} + 3\%$).

Os ensaios foram realizados sob condições de trabalho similares, para assim determinar as variações das propriedades do solo devidas ao tratamento. Apenas quanto à resistência à tração foram marcantes as melhorias no comportamento mecânico do solo com a adição do meio nutritivo. No caso dos ensaios de compressão simples e CBR não houve qualquer ganho. A viabilidade de uso do meio nutritivo como indutor de precipitação de carbonato de cálcio, e, portanto, como agente estabilizador do solo, deve ser analisado para outros solos regionais antes de se formar uma opinião mais concreta sobre o assunto.

ABSTRACT

USE OF BIOTECHNOLOGY IN THE SOIL FOR IMPROVEMENT OF ROAD PAVIMENTAÇÃO

This thesis presents the study of variation of some physical and mechanical properties of soil laterítica from the satellite city of Santa Maria in the Central Plateau, Distrito Federal, by the use of biotechnological processes, which consisted in the induction of precipitation of calcium carbonate (CaCO_3) by adding a nutrient medium to soil and the process of hydrolysis of urea by the enzyme uréase from jack bean (*Canavalia Ensiformis*).

For the development of the research it was used the natural and treated soil compacted under optimal conditions of normal proctor energy and intermediary Proctor energy. Then, to evaluate the influence of cure conditions on the humidity, some of the test bodies were kept in the condition of compactation, another part was carried to the humidity less than the optimal ($w_{\text{optimal}} - 3\%$) and a last part was conducted to wet humidity ($w_{\text{optimal}} + 3\%$).

The tests were performed under similar working conditions in order to determine changes in soil properties due to treatment. Mechanical performance had significant improvements only on the tensile strength with the addition of nutrient medium. In the case of simple compression tests and CBR there was no gain. The feasibility of using the nutrient medium as inducer of calcium carbonate precipitation and, therefore, as a soil stabilizer, should be analysed for other regional soil before forming an opinion on the matter more concrete.

RESUMEN

USO DE BIOTECNOLOGIA EN LA MEJORIA DE SUELOS COM FIENES DE PAVIMENTACIÓN VIAL

Esta disertación presenta El estudio de la variación de algunas propiedades físicas y mecánicas de un suelo laterítico proveniente de la ciudad satélite de Santa María en la región del Planalto Central, Distrito Federal, por medio del uso de procesos biotecnológicos, que consistieron en la inducción de la precipitación de carbonato de calcio (CaCO_3) mediante la adición de un medio nutriente en el suelo y del proceso de hidrólisis de urea usando la enzima urease proveniente del FEIJÃO DE PORCO (*Canavalia Ensiformis*).

Para el desarrollo de la investigación se utilizó el suelo natural y tratado compactado en las condiciones óptimas de las energías Próctor normal y Próctor intermedio. Para la evaluación de la influencia de las condiciones de cura refiriéndose a la humedad, una parte de los cuerpos de prueba fue mantenida en la condición de compactación, otra parte fue conducida al ramo seco ($w_{\text{ótimo}} - 3\%$) e una última parte fue conducida al ramo húmedo ($w_{\text{ótimo}} + 3\%$).

Los ensayos fueron realizados sobre condiciones de trabajo similares para así determinar las variaciones de las propiedades del suelo debidas al tratamiento. Las mejorías más marcadas en el comportamiento mecánico con adición de medio nutritivo fueron presentadas por los ensayos de tracción indirecta. En el caso de los ensayos de compresión simple y CBR no hubo ninguna ganancia mecánica. La viabilidad del uso del medio nutritivo como inductor de precipitación de carbonato de calcio, por tanto, como agente estabilizador del suelo, debe ser analizado su uso para otros suelos regionales antes de formar una opinión más concreta sobre el asunto.

ÍNDICE

1.	INTRODUÇÃO	1
1.1	JUSTIFICAÇÃO DA PESQUISA	2
1.2	OBJETIVOS	3
1.2.1	OBJETIVO GERAL	3
1.2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO	3
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1	SOLO LATERÍTICO	5
2.2	BIOTECNOLOGIA	7
2.3	BIOMINERALIZAÇÃO	8
2.3.1	BIO-ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS MEDIANTE PRECIPITAÇÃO DE CARBONATO DE CÁLCIO (CaCO₃).....	13
2.3.2	BIO-ESTABILIZAÇÃO EM RODOVIAS.....	18
3.	MATERIAIS E MÊTODOS.....	21
3.1	MATERIAIS	21
3.1.1	SOLO.....	21
3.1.2	AGENTES PRECIPITADORES	22
3.2	METODOLOGIA	23
3.2.1	AMOSTRAGEM E ARMAZENAMENTO DO SOLO NATURAL.....	23
3.2.2	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO SOLO SEM TRATAMENTO.....	23
3.2.2.1	LIMITES DE CONSISTÊNCIA.....	23
3.2.2.2	ANÁLISES GRANULOMÉTRICAS	24
3.2.2.3	CARACTERIZAÇÃO MCT EXPEDITA	25
3.2.2.4	MINI-COMPACTAÇÃO	26
3.2.2.5	COMPACTAÇÃO MINI-MCV	27

3.2.3	CARACTERIZAÇÃO ESTRUTURAL DO SOLO NATURAL	27
3.2.4	CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA E QUÍMICA DO SOLO NATURAL	27
3.2.5	CARACTERIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DO SOLO NATURAL	28
3.2.5.1	ENSAIO DE COMPRESSÃO SIMPLES	29
3.2.5.2	ENSAIO DE MINI-CBR.....	30
3.2.5.3	CURVA CARACTERÍSTICA DE RETENÇÃO DE ÁGUA.....	30
3.2.5.4	ENSAIO DE COMPRESSÃO DIAMETRAL	32
3.2.6	CARACTERIZAÇÃO DO SOLO COM TRATAMENTO	33
3.2.6.1	FASE PREPARATÓRIA PARA A AÇÃO BIOLÓGICA	33
3.2.6.2	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA, MINERALÓGICA E MECÂNICA DO SOLO COM ADIÇÃO DO MEIO NUTRITIVO B4.....	35
3.2.6.3	DETERMINAÇÃO DA ATIVIDADE UREASICA DO EXTRATO DE FEIJÃO DE PORCO	35
3.2.6.4	ENSAIOS DE COMPRESSÃO SIMPLES DO SOLO COM ADIÇÃO DE FEIJÃO DE PORCO.....	36
4.	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	38
4.1	MEIO NUTRIENTE B4	38
4.1.1	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA.....	38
4.1.1.1	LIMITES DE ATTERBERG	38
4.1.1.2	COMPACTAÇÃO.....	42
4.1.1.3	ANÁLISES GRANULOMÉTRICAS.....	44
4.1.2	CARACTERIZAÇÃO ESTRUTURAL	47
4.1.3	CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA	52
4.1.4	CARACTERIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO.....	54
4.1.4.1	CURVA CARACTERÍSTICA DE RETENÇÃO DE AGUA.....	54

4.1.4.2	COMPRESÃO SIMPLES	58
4.1.4.3	COMPRESÃO DIAMETRAL	66
4.1.4.4	MINI-CBR	73
4.2	FEIJÃO DE PORCO (<i>Canavalia Ensiformis</i>).....	74
4.2.1	VERIFICAÇÃO DE ATIVIDADE UREASICA	75
4.2.2	ENSAIO DE COMPRESSÃO SIMPLES	75
5.	CONCLUSÕES	79
6.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	82
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	83
A.	APÊNDICE A	88
B.	APÊNDICE B	95
C.	APÊNDICE C	98
D.	APÊNDICE D	101

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Curva de crescimento típica para uma população bacteriana (Gómez, 2006).....	10
Figura 1.2 Esquematização do principio de formação de <i>Biograout</i> e <i>Biosealing</i> (Meurs <i>et al.</i> , 2006).....	19
Figura 3.1 Voçoroca de Santa Maria.....	22
Figura 3.2 Feijão de porco (<i>Canavalia ensiformes</i>).....	23
Figura 3.3 Ensaio de granulometria por sedimentação	24
Figura 3.4 Granulômetro laser existente no Laboratorio de Geotecnia - UnB	24
Figura 3.5 Carta de classificação da metodologia MCT expedita.....	26
Figura 3.6 Montagem do ensaio de sucção matricial	31
Figura 3.7 Ensaio de Compressão diametral.....	33
Figura 3.8 Processo de preparação do extrato de feijão de porco	34
Figura 4.1 Limite de liquidez (a) Ramo úmido (b) Ramo Seco (c) Umidade ótima.....	39
Figura 4.2 Correlações do w_L (a) com S_r (%) (b) com w (%) (c) com “e”	40
Figura 4.3 Correlações do w_P (a) com S_r (%) (b) com w (%) (c) com “e”	41
Figura 4.4 Carta de plasticidade	42
Figura 4.5 Curvas de compactação miniatura	43
Figura 4.6 Família de curvas Mini-MCV (a) Energia Intermediaria (b) Energia Normal	44
Figura 4.7 Estrutura do solo para umidade ótima	49
Figura 4.8 Estrutura do solo para umidade no ramo seco	50
Figura 4.9 Estrutura do solo para umidade no ramo úmido	51
Figura 4.10 Difratograma de raios X para amostra SN.....	52
Figura 4.11 Espectro de FTIR para a amostra SN.....	53
Figura 4.12 Influência do pH na plasticidade do solo.....	54
Figura 4.13 Curvas características na umidade ótima (a) Sucção-w (b) Sucção-Sr (c) e^*pF-S_r	56
Figura 4.14 Curvas características no ramo úmido (a) Sucção-w (b) Sucção-Sr (c) e^*pF- S_r	57
Figura 4.15 Curvas características no ramo seco (a) Sucção-w (b) Sucção-Sr (c) e^*pF-S_r	58
Figura 4.16 Resistência à compressão simples (a) SNO. (b) B4O.....	59

Figura 4.17 Relação $\sigma_r - w\%$	60
Figura 4.18 Relação $\sigma_r - w\%$ (a) B4. (b) SN.....	60
Figura 4.19 Relação $\sigma_r - w\%$ (a) energia normal. (b) energia intermediaria.....	61
Figura 4.20 Relação $w\% - e$ (SN – B4).....	62
Figura 4.21 Relação $\sigma_r - e$ (SN-B4)	62
Figura 4.22 Relação $\sigma_r - S_r \%$ (SN – B4)	63
Figura 4.23 Relação $\sigma_r - S_r \%$ (a) energia normal (b) energia intermediaria.....	63
Figura 4.24 Relação Sucção - σ_r (SN – B4)	64
Figura 4.25. Relação sucção normalizada - σ_r (SN – B4)	65
Figura 4.26 Falhas dos corpos de prova em compressão simples (a) SNIO (b) B4IO.....	66
Figura 4.27 Relação $w\% - \sigma_t$ (SN – B4).....	67
Figura 4.28 Variação $\sigma_t - w\%$ (a) energia normal (b) energia intermediária.....	67
Figura 4.29 Relação $w\% - \sigma_t$ (a) B4 (b) SN.....	68
Figura 4.30 Relação $e - \sigma_t$ (SN - B4)	68
Figura 4.31 Relação $w\% - e$ (SN-B4)	69
Figura 4.32 Variação $\sigma_t - S_r \%$ (SN – B4)	69
Figura 4.33 Variação $\sigma_t - S_r \%$ (a) energia normal (b) energia intermediaria	70
Figura 4.34 Relação sucção matricial – σ_t (SN – B4)	70
Figura 4.35 Relação sucção matricial - σ_t (a) Energia normal (b) Energia intermediaria	71
Figura 4.36 Relação sucção - σ_t (a) B4 (b) SN.....	71
Figura 4.37 Relação $pF/e - \sigma_t$ (SN-B4).....	72
Figura 4.38 Relação $pF/e - \sigma_t$ (a) energia normal (b) energia intermediaria	72
Figura 4.39 Relação $pF/e - \sigma_t$ (a) B4 (b) SN.....	73
Figura 4.40 Corpo de prova após o rompimento.....	73
Figura 4.41 Mini – CBR com $w\%$ (a) umidade ótima (b) ramo seco (c) ramo úmido	74
Figura 4.42 Ensaio de atividade ureasica do extrato de feijão de porco	75
Figura 4.43 Corpo de prova com adição de extrato de feijão de porco.....	76
Figura 4.44 Imagens da precipitação de $CaCO_3$ para o solo com extrato de feijão de porco (a) F5I-400x (b) F5I-200x (c) F5I-100x (d) F5N-400x (e) F5N-200x (f) F5N-100x.....	76
Figura 4.45 Comparação entre as resistências dos tratamentos (a) Sucção matricial – σ_r (b) $pF/e - \sigma_r$	78

Figura A.1 Curvas Granulométricas para umidade ótima (a) Energias unificadas (b) Energia intermediária (c) Energia normal	89
Figura A.2 Curvas Granulométricas para umidade ótima (a) Energias unificadas (b) Energia intermediária (c) Energia normal	90
Figura A.3 Curvas Granulométricas para o Ramo Úmido (a) Energias unificadas (b) Energia intermediária (c) Energia normal	91
Figura B.1 Teores granulométricos para a fração areia	93
Figura B.2 Teores granulométricos para a fração silte.....	93
Figura B.3 Teores granulométricos para a fração argila	94
Figura C.1 Difratoograma de raios X para amostra B4IO	96
Figura C.2 Difratoograma de DRX para o B4IS.....	96
Figura C.3 Difratoograma de raios X para amostra B4IU	96
Figura C.4 Difratoograma de raios X para amostra B4NO	97
Figura C.5 Difratoograma de raios X para amostra B4NS	97
Figura C.6 Difratoograma de raios X para amostra B4NU.....	97
Figura D.1 Espectro de FTIR para a amostra B4NU	99
Figura D.2 Espectro de FTIR para a amostra B4NS	99
Figura D.3 Espectro de FTIR para a amostra B4NO	99
Figura D.4 Espectro de FTIR para a amostra B4IU.....	100
Figura D.5 Espectro de FTIR para a amostra B4IS.....	100
Figura D.6 Espectro de FTIR para a amostra B4IO	100
Figura E.1 Resistência à compressão simples (a) SNS. (b) B4S.....	102
Figura E.2 Resistência à compressão simples (a) SNS. (b) B4S.....	102

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 4.1 Resumo resultados de ensaios de limites de Atterberg	42
Tabela 4.2 Teores das frações granulométricas	45
Tabela 4.3 Resumo de ensaios de caracterização física para todas as amostras	47
Tabela 4.4 Teor de agregação das amostras	48
Tabela 4.5 Valores de pH para todos os solos.....	53
Tabela 4.6 Resistência para todos os solos	77

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACÕES

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASSHO	<i>American Society of State Highway Officials</i>
ATG	Análise termo gravimétrica
B4	Solo tratado com o meio nutritivo denominado de B4
B4IO	Solo tratado com meio B4 compactado na energia intermediaria com umidade ótima
B4IS	Solo tratado com meio B4 compactado na energia intermediaria com umidade inferior à ótima
B4IU	Solo tratado com meio B4 compactado na energia intermediaria com umidade superior à ótima
B4NO	Solo tratado com meio B4 compactado na energia normal com umidade ótima
B4NS	Solo tratado com meio B4 compactado na energia normal com umidade inferior à ótima
B4NU	Solo tratado com meio B4 compactado na energia normal com umidade superior à ótima
CBR	<i>California bearing ratio</i>
DRX	Difractometria de raios X
e	Índice de vazios
F2I	Solo com adição de feijão de porco em concentração 2/5 compactado com a energia intermediaria
F2N	Solo com adição de feijão de porco em concentração 2/5 compactado com a energia normal
F3I	Solo com adição de feijão de porco em concentração 3/1 compactado com a energia intermediaria
F3N	Solo com adição de feijão de porco em concentração 3/1 compactado com a energia normal

F4I	Solo com adição de feijão de porco em concentração 4/5 compactado com a energia intermediária
F4N	Solo com adição de feijão de porco em concentração 4/5 compactado com a energia normal
F5I	Solo com adição de feijão de porco em concentração 1/1 compactado com a energia intermediária
F5N	Solo com adição de feijão de porco em concentração 1/1 compactado com a energia normal
FTIR	Espectroscopia de Infravermelho com transformada de Fourier
g/cm ²	Gramas por centímetro quadrado
g/cm ³	Gramas por centímetro cúbico
Gs	Peso específico dos grãos
IP	Índice de plasticidade do solo
km ²	Quilômetro quadrado
LA'	Solo arenoso laterítico
LG'	Solo argiloso laterítico
MCT	Miniatura compactado tropical
ML	Silte de baixa compressibilidade
ml	Mililitro
mm/min	Milímetro por minuto
pF	Logaritmo da sucção em centímetros de coluna de água
pH	Potencial hidrogeniônico
SN	Solo sem tratamento
SNIO	Solo sem tratamento compactado na energia intermediária com umidade ótima
SNIS	Solo sem tratamento compactado na energia intermediária com umidade inferior à ótima
SNIU	Solo sem tratamento compactado na energia intermediária com umidade superior à ótima

SNNO	Solo sem tratamento compactado na energia normal com umidade ótima
SNNS	Solo sem tratamento compactado na energia normal com umidade inferior à ótima
SNNU	Solo sem tratamento compactado na energia normal com umidade superior à ótima
Sr %	Grau de saturação
USCS	Sistema unificado de classificação de solos
T.A.	Teor de agregação
UnB	Universidade de Brasília
w	Umidade do solo
w _L	Limite líquido do solo
w _P	Limite plástico do solo
γ _d	Peso específico aparente
σ _r	Resistência a compressão na ruptura
σ _t	Resistência a tração na ruptura

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, os problemas ambientais em engenharia geotécnica representam uma grande preocupação devido à escassez de materiais com boas qualidades para construção de obras civis.

Na indústria rodoviária, a procura por materiais que atendam às características físicas e mecânicas exigidas pelas normas técnicas vem sendo um problema maior, pois o desenvolvimento da legislação ambiental e o acréscimo das cargas produzidas pelo tráfego, entre outros fatores, geram limitações na utilização desses materiais.

Tanto no Brasil quanto no resto do mundo, os inconvenientes produzidos pela deficiência de materiais e a dificuldade para transportar os materiais aptos para uso rodoviário são refletidos em acréscimo de custos e tempo. Dessa forma, é necessário se focar no estudo de novas técnicas para adaptar os materiais a fim de que sejam usados sem dificuldades nas obras nos quais são requeridos.

Além da deficiência de materiais, existem outras preocupações referentes ao tipo de solo usados na fundação das estruturas sendo, no caso da engenharia rodoviária, o solo de subleito. Este comumente origina as falhas apresentadas nos pavimentos, refletindo em perdas econômicas e, em alguns casos, de vidas humanas.

Desde a antiguidade têm-se procurado adequar os materiais para que melhorem seu desempenho em obra. Uma das possibilidades é a estabilização de solos, que apresenta bons resultados na melhoria das qualidades dos solos.

Atualmente, a busca de alternativas inovadoras que apresentem vantagens técnicas, econômicas e ambientais conduzem ao desenvolvimento de pesquisas com o objetivo de produzir materiais com essas características.

Os solos no Distrito Federal, devido às suas características lateríticas, podem ser colapsíveis, portanto, não são completamente aptos para o uso rodoviário. Deste modo, apresenta-se a necessidade de desenvolver trabalhos que permitam o melhor aproveitamento dos mesmos, visando melhorar a resistência e as propriedades mecânicas nas obras de

pavimentação.

Os procedimentos de estabilização de solos mais usados no Distrito Federal são realizados mediante a estabilização granulométrica. No entanto, é preciso considerar a possibilidade de encontrar alternativas que permitam maior eficiência e economia na realização de obras de infra-estrutura rodoviária, com o intuito de obter estradas com maior vida útil e menor risco de deterioração durante tal período.

A biomineralização induzida tem despertado grande interesse nos últimos anos, porque produz um mineral mediante a estimulação da população bacteriana, para que seja produzido um precipitado que pode ser utilizado para vários fins. Na engenharia geotécnica, essa prática tem mostrado grandes benefícios, mas estes devem ser estudados mais profundamente para determinar os benefícios específicos que são obtidos.

Mundialmente estão sendo avaliadas metodologias de biomineralização, entre elas a bioestabilização, que apresenta uma boa possibilidade para processos de estabilização de solos. Esta tecnologia gera grandes benefícios ambientais e econômicos, devido à utilização eficiente dos recursos. Por causa desses benefícios, surgiu o interesse em avaliar o desempenho da bioestabilização de solos em obras de pavimentação, a qual poderia ser muito vantajosa para ser desenvolvida em grande escala no Distrito Federal.

1.1 JUSTIFICAÇÃO DA PESQUISA

Em locais cujos solos não são aptos para fazer parte da estrutura de um pavimento, é indispensável aumentar a espessura das camadas ou realizar uma melhoria dos materiais constitutivos dessas. Essas modificações podem implicar em um acréscimo considerável nos custos, inviabilizando a obra, além de gerar atrasos e danos ambientais.

Dessa forma, é de fundamental importância melhorar as características mecânicas dos materiais, mediante um tratamento de baixo custo e ambientalmente adequado, a fim de viabilizar projetos de pavimento em regiões inadequadas.

Dentre as técnicas de melhoria de solos utilizadas para reforço de pavimento, a biomineralização oferece benefícios econômicos e ambientais quando comparada às outras técnicas, uma vez que, além de não inserir nenhum componente novo ao solo, é uma técnica de fácil aplicabilidade.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho teve como objetivo geral estudar a influência da variação da umidade e do índice de vazios na precipitação induzida de carbonato de cálcio (CaCO_3), e desta no comportamento mecânico do solo para fins de pavimentação rodoviária.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos para o trabalho são:

- Determinar a viabilidade do uso da enzima uréase proveniente do feijão de porco, como agente indutor da hidrólise de uréia para a precipitação de carbonato de cálcio.
- Determinar as propriedades mecânicas mais afetadas quando adicionado um meio nutriente, denominado B4, para gerar a precipitação de carbonato de cálcio.
- Determinar para qual parte da estrutura de pavimento pudesse ser apto o solo quando tratado biotecnologicamente.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho encontra-se dividido em capítulos conforme descrito a seguir:

Capítulo 1 – Introdução

Apresenta o problema e justifica a realização da pesquisa. Além de descrever o objetivo geral e os objetivos específicos do trabalho.

Capítulo 2 – Revisão bibliográfica

Neste capítulo é apresentado o marco teórico, com a finalidade de familiarizar ao leitor com o tema, mediante conceitos básicos referentes o tema.

Apresenta uma definição de biomineralização e dos processos pelos quais é gerada e usos que são dados para ela. Igualmente, descreve-se como é produzida a precipitação de carbonato de cálcio e as reações que durante essa acontecem.

Capítulo 3 – Materiais

Este capítulo refere-se à descrição dos materiais usados na execução da pesquisa e a maneira como eles eram utilizados.

Capítulo 4 – Metodologia

Apresenta os procedimentos e metodologias que foram utilizadas para a execução de cada uma das etapas desenvolvidas durante o trabalho experimental da pesquisa.

Capítulo 5 – Apresentação e análise de resultados

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos durante a etapa experimental no laboratório. Também são realizadas as discussões relativas à modificação do comportamento mecânico do solo quando tratados e a eficácia deste tratamento.

Capítulo 6 – Conclusões

Refere-se às conclusões obtidas a partir dos dados e discussões apresentadas no capítulo 5, além de apresentar sugestões para pesquisas futuras.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 SOLO LATERÍTICO

Solos lateríticos são aqueles que ocorrem predominantemente entre os trópicos e apresentam propriedades de engenharia particulares, diferentes daquelas características dos solos de regiões temperadas (Camapum de Carvalho, 2007). Algumas das características típicas dos solos lateríticos são:

- ✓ Grau de alteração (elevado);
- ✓ Sua gênese (pouco dependente);
- ✓ Propriedades químicas e mineralógicas (fruto de grande alteração);
- ✓ Características estruturais (presença de cimentações e de micro e macroporos);
- ✓ Umidade / Grau de saturação (geralmente não saturado);

Os solos lateríticos são resultantes do intemperismo e suas características típicas são influenciadas pelo modo de formação da rocha mãe, características morfológicas e grau de intemperização, sendo a composição química e mineralógica influenciada pelas condições topográficas e de drenagem (Gidigas, 1976). Com o avanço do processo de intemperização as propriedades e comportamentos dos solos tropicais vão se tornando independentes de sua origem. Cardoso (1995) abordou esse tema ao estudar a colapsibilidade de solos do Distrito Federal.

Ribeiro (1999), afirma que um solo laterítico se caracteriza por ser ou não residual, intemperizado e rico em minerais de argila e sesquióxidos que formam uma camada superficial.

Schellmann (1982) *apud* Delgado (2002) define a laterita como sendo acumulações superficiais ou subsuperficiais de produtos provenientes do intenso intemperismo de rochas, desenvolvidos sob condições favoráveis a uma maior mobilidade dos elementos alcalinos, alcalino-terrosos e sílica, além de imobilização de ferro e alumínio.

As lateritas são caracterizadas pelo alto teor de sesquióxidos de alumínio, ferro, titânio e

manganês em relação aos outros constituintes. Nogami & Villibor (1995), afirmam que também são características típicas dos solos lateríticos a coloração vermelha, amarela ou marrom, camadas de grande espessura, elevada porosidade aparente e permeabilidade, além de apresentarem uma granulometria que varia desde uma argila até areia argilosa.

É necessário lembrar que as lateritas constituem um estágio mais avançado do processo de laterização, não necessariamente com maior tempo de alteração, mas quase sempre em condições mais favoráveis de alteração e acumulação que os solos lateríticos. Não é raro os solos lateríticos serem resultantes de um processo de lixiviação acoplado às alterações químico-mineralógicas, enquanto a formação das lateritas encontra-se quase sempre associada ao processo de acumulação de sesquióxidos de alumínio, ferro, titânio e manganês. Tem-se então, que no primeiro caso a acumulação desses compostos é na maioria das vezes relativa, por perda de sílica e bases solúveis, enquanto no segundo é absoluta, ou seja, pelo aporte de sesquióxidos.

Nogami & Villibor (1995) ainda afirmam que os solos lateríticos sofrem pequena diminuição do índice de suporte pela imersão em água nas condições ótimas de compactação, onde é possível observar que o valor da expansão é relativamente pequeno. Entretanto, nas amostras compactadas no ramo seco poderá ser apreciável a expansão e quando o solo é compactado no ramo úmido pode apresentar expansão de até 1% ou mais.

Vargas (1994) *apud* Ribeiro (1999) afirma que a importância dos solos lateríticos como material de construção rodoviária no Brasil foi reconhecida no fim da década 30, e desde então foram realizadas muitas pesquisas visando à obtenção de metodologias que permitam a melhor utilização desses solos.

Os valores de CBR (*California Bearing Ratio*) dos solos lateríticos dependem de fatores de composição, especialmente das características e tamanho de partículas, grau de intemperismo e plasticidade de finos. Assim, é possível constatar que o CBR é muito sensível às condições de moldagem, ou seja, ao índice de vazios e teor de umidade (Gidigas, 1976). Quando se trabalha com solos lateríticos, dada a grande variação de densidade que eles podem apresentar dentro de um mesmo depósito, é sempre recomendável analisar o seu comportamento em termos de índice de vazios e não de peso específico como geralmente é feito na prática da engenharia.

Gidigas (1976) afirma ainda que muitos estudos realizados para determinar as

características de compactação dos solos lateríticos, levaram à conclusão que para esses são determinantes o conteúdo de finos, sua graduação e as características de plasticidade, assim, como o conteúdo de argila.

Segundo Camapum de Carvalho (2007), um solo laterítico natural com um grau de saturação superior a 60% pode apresentar deformabilidade considerável com baixo valor de CBR sendo ainda pouco susceptível de colapso por inundação. Mas fatores como o grau de cimentação podem fazer com que isto seja modificado. Essa peculiaridade de comportamento está ligada à presença de macroporos e à sua quantidade, sendo que na maioria dos solos do Distrito Federal a entrada de ar neles, só se completa ao atingir graus de saturação dessa ordem.

Para Gidigas (1976), os solos lateríticos são apropriados para compor sub-base, mas não para base, pois esses têm mostrado que sob condições adversas de tráfego e umidade não apresentam uma boa resposta mecânica. No entanto, de forma geral, os solos lateríticos têm um bom comportamento em trechos com um nível de tráfego leve até médio mesmo em camadas de base como mostram vários estudos realizados por Nogami e Villibor (1995).

Outra utilização dos solos lateríticos que vem sendo estudada, é a mistura desses com outros materiais para fins rodoviários, tais como: cal, cimento, betume, brita descontínua, material fresado e fibras sintéticas e orgânicas, apresentando bons resultados na melhoria das propriedades mecânicas (Ribeiro, 1999).

Aproximadamente 75% do território brasileiro apresenta-se recoberto por um manto de solo laterítico com composição rica em Fe, Mn, Al, Ni, Nb e fosfatos (Teixeira *et al.*, 2000). Devido a este fato e ao desenvolvimento de procedimentos de caracterização apropriados para estes tipos de solos, tem sido possível a utilização dos solos tropicais como fonte de matéria prima para a construção rodoviária, pois se observou que esses são de baixo custo e apresentam bom comportamento estrutural na constituição de reforço do subleito, sub-base e base (Delgado, 2002).

2.2 BIOTECNOLOGIA

Várias são as definições dadas para o termo biotecnologia, algumas apresentadas a seguir:

- ✓ É o estudo da aplicação da biologia em diferentes áreas de trabalho, exemplos disso é a utilização na agricultura, na medicina e atualmente na engenharia;

- ✓ Uma definição mais específica de biotecnologia consiste na aplicação dos princípios científicos e da engenharia para o processamento de materiais, por meio de agentes biológicos, para prover bens e assegurar serviços;
- ✓ Segundo o Convênio sobre Diversidade Biológica de 1992, a biotecnologia pode ser definida como "toda aplicação tecnológica que utilize sistemas biológicos e organismos vivos ou derivados para a criação ou modificação de produtos e processos para usos específicos" (CSDB, 2009).

Os estudos com microorganismos começaram aproximadamente no século XVII com Leeuwenheek, mas estes ganharam impulso com os estudos de Pasteur em 1857 (Zilli *et al.*, 2003).

O crescente interesse pelo estudo da função das bactérias no ecossistema e a preocupação por obter processos tecnológicos mais eficientes, motivaram a realização de pesquisas sobre a aplicação de microorganismos no desenvolvimento de novos materiais e metodologias de produção.

Atualmente o uso da biotecnologia está sendo estudado pelas indústrias para melhorar os processos produtivos desenvolvidos nelas. Na engenharia o estudo visa a aperfeiçoar a exploração petroleira, disposição de rejeitos orgânicos e otimização de processos químicos, entre outros.

As dificuldades que se apresentam para o desenvolvimento da biotecnologia na engenharia são fundamentalmente devido ao pouco ou quase nenhum conhecimento dos engenheiros civis sobre os processos biológicos que são gerados durante o desenvolvimento de técnicas biotecnológicas.

2.3 BIOMINERALIZAÇÃO

Embora sejam relativamente poucos os trabalhos de pesquisa sobre o assunto, os avanços no entendimento dos processos de vida dos microorganismos têm mostrado grande importância para o desenvolvimento do uso da biotecnologia com fins de melhorar os processos tecnológicos, tanto para a indústria como para a engenharia civil, mas esses ainda estão longe de serem cientificamente explicados.

Na natureza a biomineralização é muito comum e consiste na precipitação de um mineral proveniente da atividade celular de um ser vivo. Na engenharia, a biomineralização pode ser

utilizada em diversas aplicações, como por exemplo, na proteção de superfícies pétreas e de concreto.

A biomineralização está relacionada com as funções fisiológicas dos microorganismos, dando como resultado minerais benéficos para os mesmos e para o meio onde eles vivem. A habilidade das bactérias de alterar seu meio natural é função de determinadas condições ambientais que favorecem a precipitação de minerais. Em outros termos, a principal função das bactérias nos processos de biomineralização é criar um ambiente alcalino (Fitolito, 2009).

Outra definição para biomineralização consiste no processo onde os organismos vivos têm a capacidade de produzir sólidos inorgânicos mediante duas maneiras: induzida de forma biológica e mediada por uma matriz extracelular que ordena os cristais mineralizados. Assim, substâncias geradas nos processos de biomineralização podem ser liberadas durante a atividade do organismo produtor em vida ou após a morte. (RedBi, 2001)

Em resumo, biomineralização é um processo mediante o qual os organismos são capazes de produzir sólidos inorgânicos ou ainda minerais.

Muitas bactérias obtêm nutrientes e energia por degradação de minerais e outros compostos, estas atividades são facilitadas quando as bactérias aderem-se a sedimentos e superfícies de rochas.

Um problema para o estudo da precipitação de CaCO_3 é o reconhecimento dos organismos e dos processos envolvidos, além da escala dos ensaios para descrever os micro-processos gerados durante a precipitação, o que têm gerado dificuldades para interpretação dos resultados devido ao fato que as microfábricas são heterogêneas (Riding, 2000).

Whiffin *et al.* (2007), revelam que uma das possíveis aplicações do uso de bactérias seria para melhorar as propriedades de permeabilidade do solo, mediante uma camada orgânica composta por microorganismos, embebidos em uma matriz polimérica produzida pelas próprias bactérias.

No entanto, para poder aproveitar favoravelmente os processos de biomineralização, é preciso fazer um estudo exaustivo de fatores de grande relevância tais como a microbiota, visando ter um bom entendimento do desenvolvimento dos microorganismos e suas comunidades dentro do ambiente em que estão presentes. Isso representa uma grande dificuldade devido ao fato que ela, a microbiota, é muito complexa, dinâmica e heterogênea.

Segundo Cardoso (1992) *apud* Valencia (2007), existem cinco grupos principais de microorganismos no solo, são eles: fungos, bactérias, actinomicetos, algas e protozoários. Desses, as bactérias representam a maior população e diversidade, aproximadamente 10^8 a 10^9 organismos por grama. Peña (1980) *apud* Valencia (2007) afirma que as bactérias do solo podem-se dividir em dois grupos: nativas ou *autóctones* que são os residentes verdadeiros e os *alóctones* ou invasores.

Gómez (2006) descreve que a vida das bactérias por sua vez, está dividida em etapas: latência, exponencial, estacionária e morte. Essas etapas são definidas a seguir:

- ✓ A latência é aquela fase na qual as bactérias se adaptam ao meio em que se encontram. Para isso, devem sintetizar enzimas para metabolizar os compostos presentes no meio;
- ✓ A etapa exponencial corresponde àquela onde se apresenta o crescimento da população;
- ✓ Na fase estacionária o aumento de bactérias estabiliza-se;
- ✓ A morte é a etapa na qual há escassez de alimento e as bactérias morem numa maior velocidade que a multiplicação.

Na Figura 1.1 é possível observar um gráfico onde são apresentadas as etapas de crescimento típicas da população bacteriana.

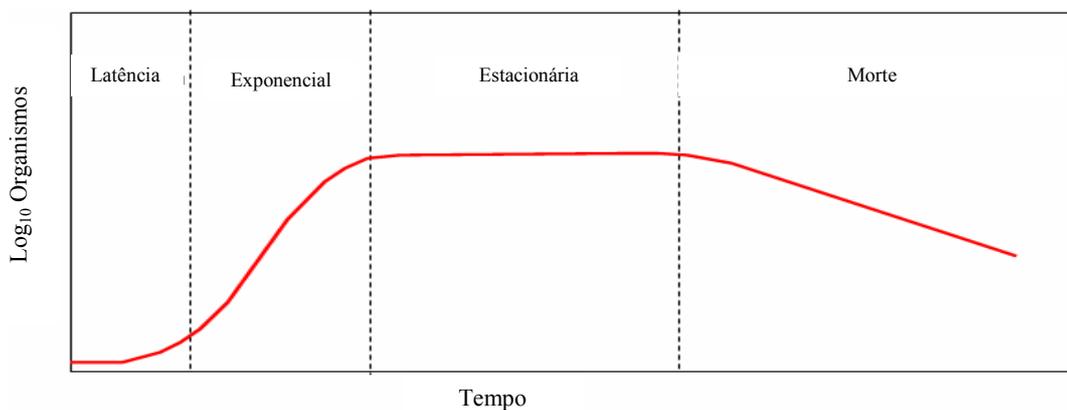


Figura 1.1 Curva de crescimento típica para uma população bacteriana (Gómez, 2006)

Zilli *et al.* (2003), assegura que os microorganismos por estarem intimamente associados aos processos ecológicos, apresentam grande potencial como indicadores da qualidade do solo, e por este motivo é necessário realizar uma identificação das espécies microbianas nele presentes.

Os autores ainda afirmam que as variáveis que ajudam a determinar a utilização da

biodiversidade são a composição mineralógica, radiação solar, transformação de massa, a temperatura e a matéria orgânica.

Peña *et al.*(1980) *apud* Valencia (2007) afirma que as principais variáveis que influem sobre as bactérias do solo são a umidade, aeração, temperatura, matéria orgânica, acidez e fornecimento de nutrientes inorgânicos, além dos plantios, a estação sazonal e a profundidade.

Cardoso *et al.* (1992) *apud* Valencia (2007), afirma que o pH tem grande influência sobre a forma de atuação das bactérias nos processos de biomineralização. Assim, a biomineralização ocorre por reações químicas entre íons específicos ou compostos, como resultado das atividades metabólicas de um organismo em certas condições ambientais.

A atividade das bactérias depende do tipo de solo, especialmente da estrutura. Assim, frações de argila presentes no solo podem se ligarem às bactérias formando pontes de união entre elas, pois tanto as bactérias como as partículas argilosas são de tamanho similar. A natureza dessa ligação é principalmente química e mediada por substâncias cimentantes. O diâmetro das partículas e o tipo de mineral argiloso também afeta a adesão, pois quanto menor, maior será a possibilidade de se apresentar uma ligação (Valencia, 2007).

Zilli *et al.* (2003) afirmam que os solos tropicais apresentam duas dificuldades para serem tratados biologicamente, uma é a degradação que eles têm sofrido, e o outro é a carência de nutrientes para serem aproveitados pelas bactérias.

Um exemplo de biomineralização é o da precipitação de carbonato de cálcio. Esse processo consiste na aspersão de bactérias, desenvolvidas em suspensão dentro de um meio de cultura apropriado, sobre a superfície porosa, seguido de alimentação das mesmas em intervalos determinados para a precipitação de calcita *in situ* (Lee, 2003).

A carbonatogenesis, nome também dado ao processo de precipitação de carbonato de cálcio, ocorre durante a etapa exponencial do crescimento bacteriano e termina depois do início do estado estacionário (Valencia, 2007). Os cristais formados como resultado da precipitação não tem a mesma estrutura, pois esta depende do tipo de microorganismo e das condições do meio onde é produzido o processo de biomineralização.

Gómez (2006), afirma que a biomineralização no ramo da engenharia civil pode ser dividida em várias metodologias, são elas:

✓ Bio-induração: tem sido a mais estudada e consiste na selagem dos poros do solo mediante

a adição de microorganismos, para que estes produzam um biofilme (película constituída por uma matriz de polímeros extracelulares produzida por organismos que estão embebidos dentro da mesma), para produzir uma redução da permeabilidade;

- ✓ Bio-remediação: consiste em usar a precipitação de carbonato de cálcio para restauração de concretos e de monumentos de pedra;
- ✓ Bioestabilização: visa à melhoria das propriedades geotécnicas dos solos por meio da secreção ou precipitação de substâncias cimentantes como o carbonato de cálcio.

Atualmente, são relativamente poucos os estudos realizados neste âmbito, sendo necessária a realização de trabalhos interdisciplinares que permitam difundir o conhecimento dos processos microbiológicos e das metodologias que se devam desenvolver.

Outras aplicações estão sendo avaliadas na engenharia geotécnica. Atualmente, está sendo desenvolvida uma pesquisa na Universidade de Brasília (UnB), cujo objetivo é a avaliação da mitigação de processos erosivos mediante a melhoria das propriedades físicas e mecânicas do solo proporcionadas pela aplicação na microflora nativa de nutrientes precipitadores de carbonato de cálcio (Valencia, 2007).

Hammes & Vestraete (2002) afirmam que a bactéria tem um papel muito importante durante o processo de biomineralização, o qual está associado a sua habilidade de criar ambientes alcalinos (alto pH e incremento da concentração da dissolução do carbono inorgânico (DIC)) por meio de várias atividades fisiológicas. Montoya *et al.* (2005) afirmam que o papel dos microorganismos nos processos de precipitação ainda não está claro.

A precipitação pode ser o resultado de um processo metabólico microbiano como a fotossíntese, hidrólise de uréia e redução de sulfatos, entre outros. Segundo Donald Gray (2001) *apud* Martínez *et al.* (2003), existe uma ampla variedade de microorganismos aptos a realizar processos utilizando as características próprias para secretar substâncias derivadas de seus metabolismos, as quais possuem propriedades cimentantes.

Montoya *et al.*, (2005), afirmam que esses processos afetam a alcalinidade do solo dissolvendo o carbono inorgânico do meio ambiente, o que favorece a precipitação.

Donald Gray (2001) *apud* Gómez (2006) assinala que existem muitas vantagens ao usar microorganismos em processos de melhoria de solos, pois, com eles se consegue uma maior tolerância destes frente à mudança de umidade e ambientes tóxicos, mesmo frente a condições

anaeróbicas e temperaturas extremas. Além disso, eles conseguem se desenvolver em ambientes com porosidade muito pequena.

Apesar das pesquisas relatadas na literatura, a biomineralização requer um estudo detalhado das condições que governam o sistema biológico de interesse, assim como a composição e a estrutura dos biominerais produzidos.

2.3.1 BIO-ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS MEDIANTE PRECIPITAÇÃO DE CARBONATO DE CÁLCIO (CaCO₃)

Como mencionado anteriormente, a bio-estabilização consiste na melhoria das propriedades geotécnicas dos solos mediante precipitação de carbonato de cálcio. Este processo é simples e é governado por quatro principais fatores (Valencia, 2007):

- ✓ A concentração de cálcio (Ca²⁺);
- ✓ A concentração da dissolução do carbono inorgânico (DIC);
- ✓ O pH ;
- ✓ A disponibilidade de nucleação do local.

Pesquisas na Colômbia revelam que o uso da bactéria *Bacillus pasteurii* para obter carbonato de cálcio por meio desse processo é eficiente para melhorar algumas propriedades físicas e mecânicas dos solos. Esses estudos revelaram que o uso de bactérias ureásicas pode gerar certo grau de cimentação no solo.

Existem vários grupos de pesquisa reconhecidos mundialmente os quais estão focados no estudo dos processos de bio-estabilização. Esses grupos estão realizando pesquisas visando determinar métodos que beneficiam as propriedades mecânicas do solo, tais como permeabilidade, rigidez e resistência. Na maioria dos casos, os resultados mais satisfatórios foram obtidos realizando a estimulação dos microorganismos naturais presentes no solo (López, 2008).

As plantas e os animais podem sintetizar carbonatos como produtos secundários do seu metabolismo. Nesse processo químico, os cátions de cálcio se unem aos íons de carbonato para formar carbonato de cálcio, como pode ser observado na seguinte equação de equilíbrio químico.



Segundo Stocks-Ficher *et al.* (1999) a solubilidade do CaCO_3 é afetada pela concentração iônica em meio aquoso. A produção do íon Carbonato (CO_3^{2-}) é governada pelo equilíbrio mostrado nas seguintes reações:



Nas equações anteriores, os íons de bicarbonato (HCO_3^-) se equilibram liberando íons de carbonato (CO_3^{2-}) e hidrogênio.

Segundo Gómez (2006), o processo de nucleação ou formação dos cristais começa em condições ácidas.

Muitos são os processos biológicos que conduzem à precipitação de carbonato de cálcio, dentre eles a fotossíntese, a degradação de uréia, redução de sulfato, entre outros. No entanto, esta pesquisa dará ênfase maior aos dois primeiros.

Uma das formas de precipitação de carbonato de cálcio mais comum é a fotossíntese. Esse processo é baseado na metabolização de dióxido de carbono (CO_2) dissolvido, que se equilibra com o HCO e CO no entorno da bactéria, como apresentado na equação 4. Quando ocorre essa reação, é induzida uma mudança no equilíbrio do bicarbonato, que gera um acréscimo de pH na maior parte do meio (Equações 5 e 6). A precipitação de CaCO_3 seja dada íons de cálcio solúvel estão presentes (Valencia, 2007).



Outra forma de gerar precipitação de carbonato de cálcio é a hidrólise ou degradação de uréia por meio da ação da enzima uréase. Para que o processo seja completo devem ocorrer duas reações: a primeira envolve a hidrólise da uréia e, a segunda, a geração do carbonato (equações 7 e 8).

A uréia é um catalisador para produzir CO_2 e amoníaco, o que provoca um aumento de pH onde há precipitação de carbonato de cálcio (CaCO_3) (Martínez *et al.*, 2003).

A hidrólise de uréia, $\text{CO}(\text{OH})_2$, via enzima uréase é um modelo simples e é comumente usado para induzir precipitação de CaCO_3 . A reação ocorre de acordo com as equações 7 e 8.

A uréia em presença de água (H₂O) reage produzindo dióxido de carbono (CO₂) metabólico e amoníaco (NH₃). Como essa reação apresenta-se em meio aquoso acontece uma geração de amônia (NH₄) e carbonato (CO₃). O aumento do pH é propiciado por causa do NH₃, como se segue:



Bang *et al.* (2001), relatam que no momento em que as bactérias metabolizam a uréia são formados cristais de carbonato de cálcio ao redor das células, que se interligam com cada um dos grãos de solo, aumentando a resistência ao cisalhamento.

A enzima uréase decompõe a uréia gerando um aumento do pH. A precipitação de CaCO₃ depende da concentração da enzima. Quando é gerada a precipitação, inicialmente são formados precipitados amorfos que posteriormente se cristaliza em calcita (Sondi & Matijevic, 2001).

Para que a precipitação de carbonato de cálcio seja efetiva, é preciso que o meio seja preferivelmente básico (López, 2008). Isso explica porque os microorganismos utilizados para avaliar a produção de calcita sejam geralmente alcalófilos, ou seja, crescem em pH maior que 8,0, já que em pH inferiores o crescimento é muito lento ou nulo.

É importante que, no uso da biotecnologia com fins de estabilização de solos, os engenheiros tenham um bom conhecimento da bioquímica e da microbiologia dos microorganismos, além da química do solo, pois estes fatores são os mais importantes durante a realização dos processos de melhoria das propriedades mecânicas do solo. O conjunto desses fatores é o princípio básico para determinar como seria a interação solo-bactéria.

Durante a carbonatogênese existem variáveis que controlam o processo, como: i) concentração de íons de cálcio (Ca²⁺), ii) pH do meio, e iii) agentes externos, como quantidade de dióxido de carbono (CO₂) e concentração de bactérias.

É preciso salientar que uma boa disponibilidade de íons de Ca e CO₃ num ambiente calcino gênico é o fator mais importante para favorecer a precipitação de CaCO₃ (Lee, 2003). No entanto, também se deve levar em conta a população bacteriana.

Stock – Fischer *et. al.*, (1999) afirmam que num ambiente com uma grande quantidade de

bactérias se restringe a precipitação de CaCO_3 , pois elas limitaram a disponibilidade de uréia dentro do solo, e como consequência, a produção de amônia.

Whiffin (2007), afirma que do ponto de vista geotécnico, o potencial da precipitação de CaCO_3 por meios biológicos tem sido identificado como uma importante maneira de adaptar as propriedades do solo para os fins que se desejam.

Bang & Ramakrishnan (2001), trabalharam com bactérias uréase como *Escherica coli* e *Bacillus pasteurii*, para remediação de trincas em concretos obtendo como resultado um aumento importante na resistência a compressão simples.

Matínez *et al.* (2003), trabalharam com *Bacillus subtilis* adicionados a um meio nutritivo em três concentrações diferentes, e logo esse meio foi colocado no solo. Durante a pesquisa verificaram que esses microorganismos induzem a precipitação de CaCO_3 , e que essa melhora as propriedades físicas e o comportamento mecânico do solo.

Gómez (2006) verificou a variação do módulo de rigidez de um solo grosso mediante a adição de *Bacillus pasteurii* e *Bacillus subtilis*, onde cada espécie foi colocada separadamente em um meio nutritivo B4 e para evitar a interferência de bactérias nativas, o solo foi seco em estufa. Nos resultados obtidos concluíram que os *Bacillus pasteurii* são mais adequados para melhorar propriedades como a resistência ao cisalhamento.

Ismail *et al.* (2002), utilizaram um sistema de precipitação in-situ, que consiste na injeção ou molhagem com uma solução baseada em água com baixa viscosidade, com pH neutro e não tóxica. O resultado obtido foi uma precipitação de CaCO_3 que envolvem os grãos e formam pontes de união entre eles, cimentando a matriz de solo e melhorando sua resistência.

Flórez (2007) adicionou separadamente um meio nutriente e uma mistura do meio com bacillus a um solo arenoso. Ao comparar os resultados inferiu que houve uma melhora com qualquer um dos procedimentos, especialmente com a adição das bactérias junto com o meio nutritivo.

Schmittner & Girese (1999) realizaram um estudo adicionando diferentes concentrações de cálcio (Ca^{2+}) e de fosfato (PO_4^{3-}) em solução a um solo arenoso com três tamanhos de grão e avaliaram o tempo de precipitação de calcita e de hidroxy apatita. Concluíram que material fino com grande área superficial é um excelente meio para envolver as bactérias. Também observaram que a temperatura não é tão importante para a precipitação, quanto o pH.

Sondi & Matijevic (2001), realizaram um trabalho com enzima uréase e observaram que a precipitação foi mais rápida em temperatura ambiente quando o pH está entre 7 e 9. Nesse trabalho formaram-se cristais de vaterita e posteriormente de calcita. Observaram que a taxa de mudança nos cristais depende da concentração de enzima.

Stocks-Ficher *et al.* (1999), realizaram experimentos para precipitar CaCO_3 . Na pesquisa eles adicionaram um meio nutritivo composto de 20 g de uréia, 3 g de Ágar nutriente, 5,6 g de Cloreto de cálcio (CaCl_2), 10 g de Cloreto de amônio (NH_4Cl), 2,12 g de Bicarbonato de sódio (NaHCO_3), e 12g de Agar para 1 litro de água destilada com cultivos de *Bacillus pasteurii* a um solo arenoso. Os resultados obtidos revelaram que a precipitação de CaCO_3 foi gerada em um intervalo de pH entre 8 e 9.

Trabalhos como os desenvolvidos por Whiffin *et al.* (2007) mostram que é possível gerar uma precipitação de carbonato de cálcio com uma conseqüente cimentação entre os grãos de areia. Para conseguir tal cimentação foi aplicada uma solução de uréia e cloreto de cálcio a velocidade constante numa coluna de solo com a finalidade de iniciar a cimentação.

Durante este trabalho também foi determinado que a capacidade das bactérias para degradar uréia decresce durante o tempo de reação. Algumas causas para isso podem ser: redução de volume de poros, aumento da quantidade de CaCO_3 precipitado, diminuição na concentração de uréia ou degeneração da viabilidade das bactérias nas condições de cimentação. O resultado geral foi uma redução da permeabilidade do solo.

Como o Brasil possui solos muito intemperizados, cujas propriedades mecânicas são limitadas para serem utilizados em estruturas de pavimento, faz-se necessário a realização de estudos com intuito de melhorá-lo por meio de métodos inovadores que permitam um comportamento aceitável.

Como pode ser observado dessa revisão sobre a bio-estabilização do solo, geralmente as condições de pH ideais se situam entre 7 e 9. Nos solos tropicais profundamente intemperizados, se o pH natural encontrar-se acima do correspondente ao ponto iso-elétrico. Tal elevação não geraria, em princípio, danos aos agregados já formados, no entanto, encontrando-se abaixo, os agregados já existentes tenderiam a serem destruídos com reflexos no comportamento, reflexos estes que poderiam ser negativos ou positivos. Assim, por exemplo, se o objetivo for reduzir a permeabilidade o aspecto será positivo, porém se for melhorar a resistência e diminuir a deformabilidade ele poderá ser negativo. No âmbito dessa

pesquisa não se chegou a analisar esse aspecto relativo ao ponto iso-elétrico do solo.

2.3.2 BIO-ESTABILIZAÇÃO EM RODOVIAS

Atualmente, poucos são os trabalhos de pesquisa focados unicamente na melhoria das propriedades mecânicas dos solos com fins de pavimentação rodoviária, mediante o uso de biotecnologia. No entanto, algumas empresas lançam no mercado produtos enzimáticos naturais, os quais geram uma melhoria nas características dos solos, levando a uma minimização de custos pela diminuição da espessura das camadas do pavimento.

Algumas das melhorias oferecidas pelas empresas são o aumento do CBR, o acréscimo na resistência à compressão simples, entre outros. Esses produtos agem como catalisadores, gerando uma melhoria no subleito e produzindo um material mais denso, coesivo e estável, além de apresentarem facilidade de aplicação no solo (Terrazyme, 2009)

Produtos como o permazyme, são utilizados para materiais presentes na própria rodovia, permitindo uma diminuição dos custos de transporte e obtenção de materiais de empréstimo a princípio inapropriados. Entretanto, os materiais aptos para serem estabilizados com permazyme têm limitações na granulometria e no índice de plasticidade. (SECSASA, 2008)

Na Colômbia têm sido realizadas várias pesquisas pelo grupo de pesquisa BACEST, focadas na avaliação da resposta mecânica de solos de subleito tratados com precipitação de carbonato de cálcio. Segundo Álvarez *et al.* (2004) não é possível identificar melhorias nas propriedades devido ao tratamento. No entanto, revelam que algumas amostras apresentaram uma melhora no CBR após a precipitação de carbonato de cálcio.

Gómez (2006) afirma que todas as pesquisas não apresentam resultados satisfatórios, mas para as amostras do solo caracterizado como areia-siltosa os resultados apresentaram uma melhora bastante significativa.

López (2008) verificou que a quantidade de ar dentro dos vazios do solo afeta consideravelmente a precipitação de carbonato de cálcio, pois quanto menor a percentagem de ar, maior o incremento de precipitação de carbonato de cálcio.

Echeverri & Santander (2003) *apud* Flores (2007), realizaram ensaios para facilitar o crescimento das bactérias calcificantes nativas do solo, onde observaram um aumento do CBR após o tratamento.

Fonseca *et al.* (2004), empregaram bactérias calcificantes, o meio nutritivo B4 e a mistura

desse em solo siltoso e caulim. Os resultados obtidos foram aproximadamente a duplicação do CBR, além de não apresentarem diferenças representativas de expansão. Os maiores acréscimos no CBR foram apresentados quando foi adicionado unicamente o meio B4.

Segundo Whiffin (2005), nos Países Baixos, GeoDelft apóia trabalhos com dois processos para modificar as propriedades do solo in-situ. Tais processos são denominados *Biosealing* e *Biogrout* (Figura 1.2). O primeiro se refere à selagem da filtração e fluxo da água retida nas estruturas, sejam estas naturais ou feitas pelo homem. A técnica consiste na aplicação de um nutriente ao solo para estimular as bactérias endógenas para que produzam uma barreira para evitar a filtração e o fluxo que é duradouro sob condições saturadas.

O procedimento *Biogrout* é definido como uma técnica para melhorar a resistência e a rigidez do solo sem fechar os espaços entre poros mediante a indução da precipitação de CaCO_3 . Essa técnica pode ser aplicada in-situ em materiais permeáveis tais como areia, e algumas aplicações podem ser em fundações para ferrovias, reforço de solo de fundação para edifícios e infra-estrutura, melhoria de aterros, entre outros.

Meurs *et al.* (2006) afirmam que o *BioGrout* visa à melhoria da resistência e da rigidez do solo e que pode ser aplicado em distancias de 10 metros ou até mais. Uma das principais aplicações é a melhoria da resistência à erosão, reforço em dunas, entre outros.

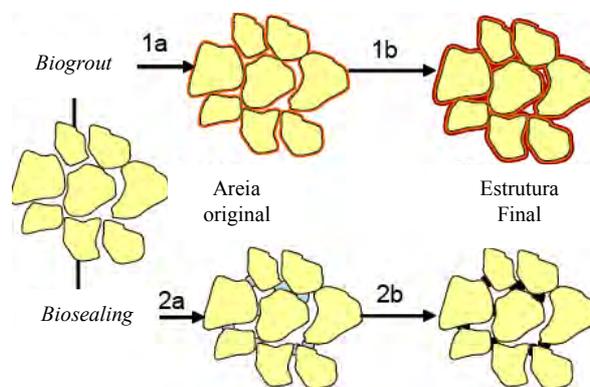


Figura 1.2 Esquematização do princípio de formação de *Biogrout* e *Biosealing* (Meurs *et al.*, 2006)

Lo Bianco & Madonia (2007) estudaram uma técnica para melhorar a capacidade de suporte de camadas de pavimento mediante tratamento biológico denominada *Bacteria Method for Unbound Layers* (B.U.L.M.). Eles trabalharam com três tipos de material de origem diferente: basalto, calcário e sílica. Compararam os resultados de CBR de uma mistura de projeto usada para a construção de camadas de pavimento, com os obtidos para o material tratado

biologicamente, e concluíram que com o tratamento foi possível aumentar o CBR em até 42% em só 10 dias.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS

3.1.1 SOLO

O Distrito Federal está situado no Planalto Central, na região Centro-Oeste do Brasil, cobrindo 5814 km², localizado entre os Rios Descoberto e Rio Preto. Faria (1993), citado por Lima (2003), afirma que o Distrito Federal apresenta uma cobertura detrito-laterítica que possui uma espessura maior que 10 m em algumas regiões, com um comportamento bastante variável e características muito peculiares.

Tal cobertura é constituída basicamente por solos detrito-lateríticos sobre as rochas Pré-Câmbricas, predominantemente ardósias, quartzitos, meta-arenitos e metarritmitos do Grupo Paranoá. Esse grupo é o mais importante e cobre quase toda a área do Distrito Federal, constituídos de Latossolo Vermelho-Escuro (LE), Latossolo Vermelho-Amarelo (LV) e Cambisolo, os quais recobrem aproximadamente 86% do território no Distrito Federal (Lima, 2003).

O solo estudado forma parte de uma voçoroca localizada na Cidade de Santa Maria, no Distrito Federal (Figura 3.1). Valencia (2007) vem estudando aspectos biotecnológicos dessa voçoroca. Para tal, ela retirou amostras a 20m da parede da voçoroca em um perfil de solo dividido em cinco camadas. Para esta pesquisa, optou-se por trabalhar com a camada de solo correspondente à profundidade entre 3,5 m e 4,5 m que tem apresentado, segundo essa autora, bons resultados de melhoria de comportamento ao se adicionar o nutriente precipitador B4.

Durante sua pesquisa, Valencia (2007) encontrou a presença de muitas bactérias na camada em menção e, entre elas, a *Bacillus* sp., que favorece a precipitação de carbonato de cálcio mediante a adição de nutrientes ricos em uréase.

Valencia (2007) observou também que a utilização de um meio que induz a precipitação de carbonato de cálcio em bactérias cujo nome é B4 gera melhorias no comportamento mecânico do solo e na sua resistência a fatores erosivos.



Figura 3.1 Voçoroca de Santa Maria

As amostras usadas na pesquisa foram coletadas com um trado manual. Foram coletadas amostras deformadas, que foram compactadas em forma de corpos de prova cilíndricos, com alturas que variaram segundo o tipo de ensaio.

3.1.2 AGENTES PRECIPITADORES

Duas metodologias foram empregadas para favorecer a elevação do pH do solo com a conseqüente precipitação de carbonato de cálcio. Na primeira, um meio nutritivo, denominado B4, composto de 15g de acetato de cálcio, 4g de extrato de levedura e 5g de glicose, para 1000 ml de água destilada (Lee, 2003), foi adicionado ao solo de estudo para induzir a atividade microbiana nativa. A atividade microbiana leva a um aumento de pH, o que favorece a precipitação de CaCO_3 . A preparação do agente precipitador B4 foi realizada no Laboratório de Microbiologia da Faculdade de Alimentos e Medicina Veterinária (FAV) na UnB.

A segunda metodologia consistiu na adição direta de enzima uréase ao solo. A uréase era oriunda do extrato de feijão de porco (*Canavalia ensiformes* (Figura 3.2), que é uma fonte rica desta enzima. Esse meio era composto por uma solução de 1 mol de acetato de cálcio e 1 mol de uréia pura sendo esta misturada com o extrato de feijão de porco.

A preparação do agente precipitador B4 foi realizada no Laboratório de Microbiologia da Faculdade de Alimentos e Medicina Veterinária (FAV) na UnB.

A elaboração do meio com enzima uréase foi dividida em duas etapas, uma executada no laboratório da FAV na UnB, e a outra no laboratório de Geotecnia da UnB.

A descrição dos processos de preparação e adição dos agentes precipitadores será apresentada no item 3.2.6.1.



Figura 3.2 Feijão de porco (*Canavalia ensiformes*)

3.2 METODOLOGIA

Com a finalidade de otimizar a metodologia de trabalho desenvolvida durante a pesquisa, os ensaios de laboratório foram divididos em duas etapas, as quais serão descritas a seguir.

3.2.1 AMOSTRAGEM E ARMAZENAMENTO DO SOLO NATURAL

O solo objeto de estudo foi coletado com trado manual e colocado em sacos plásticos. Posteriormente foi levado ao laboratório de Geotecnia da UnB e armazenado em um local apropriado para evitar a contaminação do mesmo com outros solos.

3.2.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO SOLO SEM TRATAMENTO

A caracterização do solo sem tratamento permitiu a obtenção de todos os dados necessários para estabelecer um padrão de comparação entre as propriedades do solo natural e do solo modificado devido à precipitação de carbonato de cálcio, permitindo a avaliação da eficiência do tratamento.

3.2.2.1 LIMITES DE CONSISTÊNCIA

O limite de liquidez (w_L) foi obtido pela norma ABNT NBR 6459/84 e o limite de plasticidade (w_p) pela norma ABNT NBR 7180/84.

3.2.2.2 ANÁLISES GRANULOMÉTRICAS

Os solos lateríticos finos são constituídos por micro-agregações que se ligam mediante pontes de argila ou cimentos de óxidos e/ou hidróxidos de ferro e/ou alumínio (Lima, 2003). Para determinar a distribuição granulométrica dessas micro-concreções realizaram-se ensaios de granulometria mediante vários métodos.

No primeiro ensaio utilizou-se a metodologia ABNT NBR 7181/84, que se baseia no ensaio de dispersão das partículas, com e sem uso de defloculante (Figura 3.3).

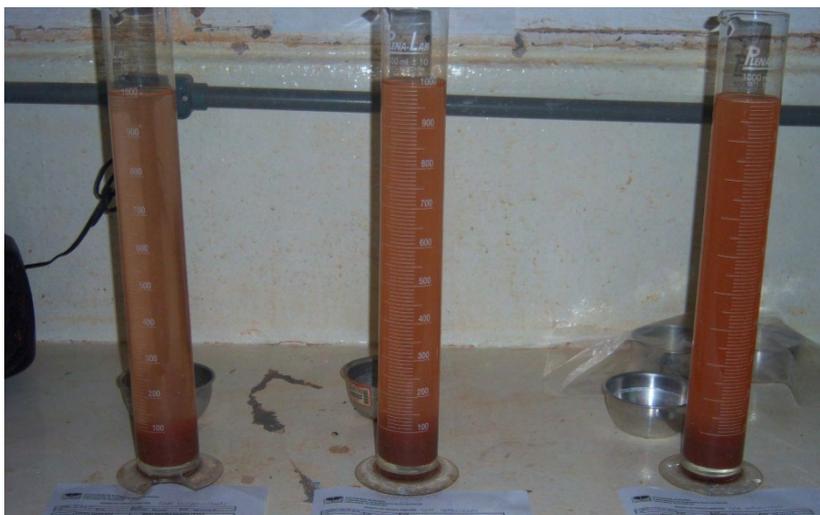


Figura 3.3 Ensaio de granulometria por sedimentação

Paralelamente aos ensaios de granulometria por sedimentação realizou-se o ensaio para determinar o peso específico dos grãos (Gs) regido pela norma ABNT NBR 6508/84.

O segundo método adotado na análise granulométrica consistiu no uso do granulômetro a laser do Laboratório de Geotecnia da UnB, modelo MASTERIZER S STANDARD BENCH produzido pela Malvern Instruments Ltda da Inglaterra (Figura 3.4).



Figura 3.4 Granulômetro laser existente no Laboratório de Geotecnia - UnB

A amostra utilizada para realizar os ensaios no granulômetro a laser é preparada da mesma forma que a amostra para os ensaios de limites de consistência. Existem varias formas de realizar o ensaio, mas no presente estudo adotou-se as formas com e sem ultra-som sem defloculante, e com e sem ultra-som com defloculante. O ensaio realizado com ultra-som objetiva, como no caso do uso de defloculante, a desagregação do solo. Já o ensaio realizado sem ultra-som tem por objetivo a preservação da textura do solo como no caso do ensaio de sedimentação feito sem o uso de defloculante. A grande diferença entre o ultra-som e o defloculante é que enquanto no primeiro a ação desagregadora é física, no segundo ela é química. Portanto, o solo pode responder de modo parcialmente ou totalmente distinto aos dois agentes.

3.2.2.3 CARACTERIZAÇÃO MCT EXPEDITA

O método de classificação MCT foi apresentado por Nogami & Villibor (1980, 1985) com a finalidade de obter uma identificação mais apropriada dos solos tropicais, pois nenhuma das propostas tradicionais teve o desejável desempenho para estes solos. Desde então, varias modificações ao método têm sido desenvolvidas para realizar a caracterização dos solos tropicais. Em 1991 foi observado que classificação MCT expedita ou método dos anéis, devido a sua simplicidade, permitia uma determinar adequadamente a classe MCT dos solos (Nogami & Villibor, 1995).

A classificação MCT do solo foi obtida segundo a metodologia que regula o procedimento. O método consiste na moldagem de três pastilhas de solo espatulado, dentro de anéis de 20 mm de diâmetro e 5 mm de altura. Previamente à moldagem dos corpos de prova deve ser ajustada e determinada a umidade de moldagem. O ajuste é atingido quando um penetrômetro de 10 g com diâmetro de 1,3 mm colocado na superfície do solo penetra 1 mm na amostra.

Também são moldadas bolinhas com a finalidade de determinar a resistência seca e de desagregação em água. A secagem das pastilhas e das bolinhas é feita ao ar ou em estufa a 60°C, durante um tempo mínimo de 6 horas. Salienta-se que as bolinhas são pesadas antes da secagem para possibilitar a determinação de suas umidades iniciais.

Após a secagem das pastilhas, essas são medidas e depositadas sobre um papel filtro colocado em cima de uma pedra porosa saturada. O tempo mínimo de repouso das pastilhas é de duas horas para a absorção capilar da água das pastilhas. Terminado esse período avalia-se a expansão das pastilhas e a resistência à penetração das mesmas com o supracitado

penetrômetro. Com respeito às bolinhas, essas são pesadas e logo após determinada a resistência seca e a desagregação em água.

A classificação de solos lateríticos pelo procedimento MCT expedito utiliza-se a Figura 3.5. Segundo essa metodologia, os solos podem ser classificados como solos lateríticos ou não lateríticos, com a nomenclatura LA' (arenoso laterítico), LG' (argiloso laterítico), NA (areia não laterítica), NA' (arenoso não laterítico), NG' (argiloso não laterítico) e NS' (siltoso não laterítico). Para poder dar uso da figura, é necessário locar os dados da penetração e da contração diametral do solo dentro dos anéis, os quais são determinados como descrito anteriormente. Devem-se localizar estes dois dados na figura e verificar sobre qual intervalo de classificação cortam-se para definir a classificação do solo.

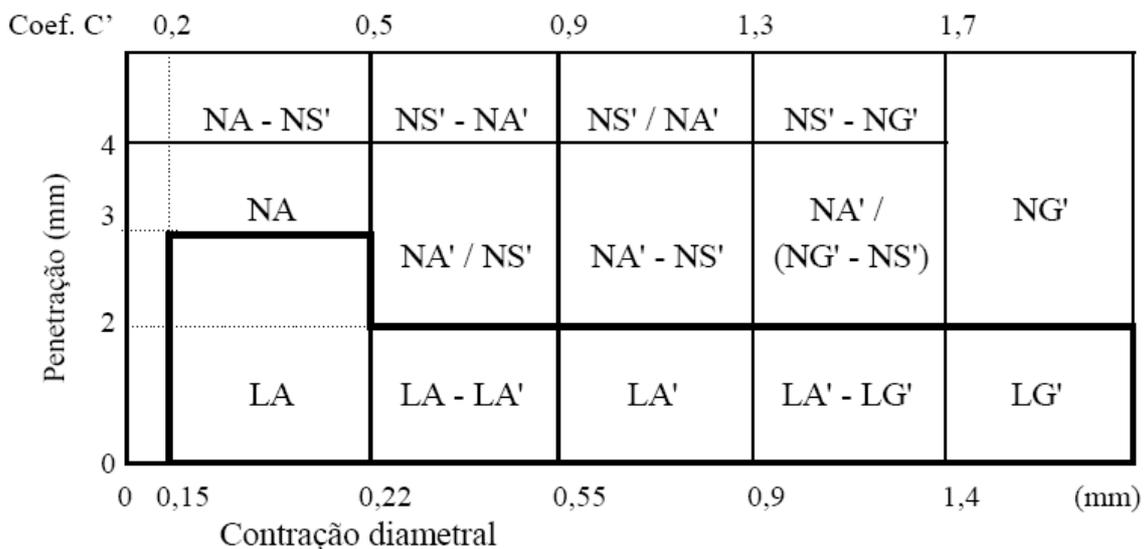


Figura 3.5 Carta de classificação da metodologia MCT expedita

3.2.2.4 MINI-COMPACTAÇÃO

Os ensaios de mini-compactação foram realizados conforme a norma DNER-ME 228/94, para a energia normal (5 golpes com soquete leve) e a energia intermediária (6 golpes com o soquete pesado) de cada lado.

A finalidade dos ensaios foi obter a curva de compactação do solo para as duas energias, e assim, poder determinar as umidades ótimas e o peso específico aparente seco máximo do solo natural. Obtidos estes valores, realizou-se o cálculo da quantidade de solo seco necessário para obter o peso específico seco máximo para os corpos de prova na condição ótima.

3.2.2.5 COMPACTAÇÃO MINI-MCV

Optou-se por executar ensaios tipo mini MCV devido às características físicas do solo, pois estas permitem trabalhar com corpos de prova de menores dimensões, apresentando bons resultados.

Esses ensaios foram realizados para complementar os resultados obtidos nos ensaios de mini-compactação e foram executados seguindo a norma DENER-ME 258/94.

3.2.3 CARACTERIZAÇÃO ESTRUTURAL DO SOLO NATURAL

O solo é formado por micro-concreções que influenciam a estrutura interna e a granulometria, o qual se reflete no comportamento mecânico e nas características físicas. Portanto, é de grande importância observar a estrutura do solo para entender melhor às variações que possam ser geradas.

A caracterização estrutural do solo foi realizada usando uma lupa eletrônica “ProScope de alta resolução HR” da Avantgarde. Foram obtidas, para fins de comparação, imagens do solo tratado e imagens do solo natural.

3.2.4 CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA E QUÍMICA DO SOLO NATURAL

O conhecimento da composição mineralógica do solo é muito importante para o melhor entendimento das propriedades físicas e do comportamento que ele apresenta. Os métodos mais empregados nesse estudo são: difração de raios-x, análise termodiferencial e gravitacional, microscopia eletrônica e os métodos químicos (Lima, 2003).

A difração de raios-x é amplamente usada para determinar a mineralogia do solo devido à facilidade do ensaio, ao seu pequeno custo e a precisão que apresenta. Foram realizados ensaios de Difração de Raios – X (DRX), no Laboratório de DRX do Instituto de Geociências – UnB, com a finalidade de determinar a composição mineralógica do solo antes de adicionar algum agente precipitador.

As amostras foram pulverizadas e compactadas a seco em lâmina com cavidade. A análise foi procedida em equipamento RIGAKU D/MAX – 2/C operando com tubo de cobre e filtro de Ni, sob voltagem de 40 kv e 20 mA, velocidade de varredura de 2°/minuto, no intervalo de 2 a 70° - ângulo 2 teta de difração. Para a identificação e interpretação dos difratogramas foi utilizado o software JADE 3.0, com banco de dados ICCD, 1996.

Para complementar os resultados obtidos a partir da técnica de DRX, realizaram-se ensaios de espectroscópica de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR). Também foram realizadas medidas de pH para as amostras de solo, visando determinar a variação do pH quando realizada a adição do agente precipitador de carbonato de cálcio ao solo.

3.2.5 CARACTERIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DO SOLO NATURAL

Como a finalidade da pesquisa foi estudar a melhoraria do comportamento mecânico do solo para fins rodoviários, o solo analisado foi submetido a uma bateria de ensaios que permitiu avaliar este aspecto.

Os corpos de prova utilizados para a caracterização do comportamento mecânico foram compactados em laboratório nas condições de umidade ótima e peso específico aparente seco máximo. Adotou-se o processo de compactação semi-estático tendo sido usada uma prensa hidráulica do Laboratório de Geotecnia da UnB. Quando do uso de tratamento, o aditivo era misturado ao solo antes da compactação como a quantidade de água necessária para atingir a umidade ótima de compactação correspondente a cada energia.

É preciso salientar que, embora os corpos de prova tenham sido compactados nas condições ótimas correspondentes ao Proctor Normal e Intermediário, para evitar mudanças na estrutura interna do solo, durante a pesquisa foi provocada a variação na umidade de parte das amostras compactadas para o ramo seco, parte para o ramo úmido e parte foi mantida na umidade de compactação. As modificações dos teores de umidade foram realizadas para gerar condições acima e abaixo da ótima, com a finalidade de verificar a mudança no nível de precipitação de carbonato de cálcio, e conseqüentemente, no comportamento do solo quando se alterada a umidade e o volume de vazios referente à fase gasosa.

As variações de umidade nos corpos de prova quando compactados foram provocadas a partir do umedecimento até atingir a umidade ótima mais 3%, e a partir da secagem ao ar até atingir a umidade ótima menos 3%. A verificação da umidade foi realizada mediante pesagem continua dos corpos até eles chegarem ao peso e umidade desejados.

Uma vez alcançada à umidade desejada, os corpos foram recobertos com filme de PVC e de alumínio e, posteriormente, levados à câmara úmida em caixas de isopor, a fim de manter

constante a umidade das amostras durante o tempo de armazenamento e de execução dos ensaios.

O tempo de armazenamento de todas as amostras foi de duas semanas, a fim de manter a umidade constante e obter as mesmas condições de cura necessárias para que fosse gerada a precipitação de carbonato nos corpos com tratamento. Segundo Valencia (2007), o tempo mínimo para que se apresente a maior precipitação é de 15 dias.

Terminado o período de duas semanas foram retirados os corpos para os ensaios de Mini-CBR e compressão simples. Aqueles destinados aos ensaios de compressão diametral e curva característica foram colocados durante mais duas semanas com os papéis filtro, a fim de atingir o tempo requerido para determinar a sucção do solo.

3.2.5.1 ENSAIO DE COMPRESSÃO SIMPLES

A preparação do solo foi realizada destorroando-o e em seguida peneirando-o na peneira #10. Logo se determinou a umidade higroscópica para calcular o peso do solo seco. Posteriormente, adicionou-se a água necessária para atingir a umidade ótima de compactação e procedeu-se a realização da compactação dos corpos na prensa hidráulica. Após a compactação foram retirados os corpos dos moldes para gerar a variação de umidade correspondente ao ramo seco e ao ramo úmido. Salienta-se que essa variação de umidade dos corpos era muito mais homogênea quando retirados os corpos dos cilindros do que quando eles ficavam dentre deles.

Cada corpo de prova foi compactado estaticamente em três camadas iguais. Quando terminada a compactação de cada camada a superfície era escarificada visando melhorar a aderência com a camada seguinte. Para determinar a quantidade de solo necessária para cada camada foi calculado o peso de solo seco correspondente à energia de compactação (normal ou intermediária conforme o caso).

A velocidade de aplicação da carga durante o ensaio foi de 0,305 mm/min e as medidas da deformação foram realizadas mediante o uso de extensômetros.

Todos os ensaios de compressão simples foram realizados seguindo estritamente o procedimento descrito pela norma ABNT NBR 8949/85.

3.2.5.2 ENSAIO DE MINI-CBR

Os ensaios de Mini-CBR foram desenvolvidos para serem realizados em corpos de prova com medidas reduzidas. Esse ensaio permite uma grande flexibilidade nas variáveis que influenciam o valor de suporte, podendo-se realizar com diferentes tipos de sobrecarga, umidades e energias de compactação, gerando assim a possibilidade de entender melhor as peculiaridades dos solos tropicais.

Uma das vantagens do ensaio são as dimensões dos corpos de prova que são compactados seguindo o procedimento Mini-MCV. Eles medem 5cm de diâmetro e 5cm de altura.

Após o período de cura, as amostras foram colocadas em cilindros de PVC bi-partidos, unidos com duas abraçadeiras metálicas e apertadas a uma mesma tensão, com uma parafusadeira elétrica para evitar variações na pressão de confinamento dos corpos de prova. Delgado (2002), afirma que este confinamento está longe de ser semelhante ao obtido quando o ensaio é realizado no molde de compactação do corpo. Essa condição pode influir nos resultados obtidos, mas o efeito foi desconsiderado, por ter sido adotada a mesma condição para todos os corpos de prova.

3.2.5.3 CURVA CARACTERÍSTICA DE RETENÇÃO DE ÁGUA

Antes de tudo, cabe destacar a divergência de nomenclatura existente na literatura. Alguns autores a chamam simplesmente de curva característica, por entender que ela é característica de cada tipo de solo. Outros a chamam de curva de retenção, pois ela expressa o potencial de retenção de água do solo. Outros ainda, como é o presente caso, usam a junção de ambos pelos dois motivos expostos. Tudo parece, no entanto, ser apenas uma questão de semântica sem grande importância prática. Mas ainda no tocante à nomenclatura, vale ressaltar que alguns autores referem-se à componente matricial de sucção como capilaridade, outros como simplesmente sucção. No entanto, talvez o mais apropriado, fosse usar a nomenclatura segundo o entendimento e predominância de cada fenômeno. Assim por exemplo, em uma areia quartzosa o termo apropriado seria capilaridade, pois inexitem as forças de adsorção ou elas são mínimas. Já em uma argila, o fenômeno que predomina é o das forças de adsorção e o termo sucção seria mais apropriado. Porém, nos solos em geral, há que se convir que neles atuam sempre os dois fenômenos, mas eles são como água e óleo, não se misturam, ou melhor ainda, como a face côncava e a convexa de uma esfera vazada, estão juntas, mas são distintas.

Na engenharia, o estudo dos solos não saturados tem assumido grande importância na atualidade. Em geotecnia, a curva característica é fundamental, pois o desempenho mecânico dos solos depende de fatores como a variação da umidade, que afeta diretamente a sucção. A sucção é dependente do índice de vazios e de sua distribuição, da estrutura interna do solo, de sua mineralogia e da umidade. Portanto, a determinação da curva característica de um solo não saturado permite uma melhor compreensão do comportamento do mesmo frente a mudanças de umidade, sendo este, um ponto crítico para o projeto de obras geotécnicas tais como estradas, fundações, etc.

Nesta pesquisa a sucção do solo foi determinada pela técnica do papel filtro para medir a sucção matricial. Para realizar cada determinação foram usados três papéis filtro, sendo um deles de diâmetro menor e situado entre os outros dois. O conjunto é colocado em contato direto com o solo, conforme mostrado na Figura 3.6.



Figura 3.6 Montagem do ensaio de sucção matricial

O procedimento para a execução dos ensaios para a determinação da curva característica foi o seguinte: após o umedecimento do solo com água ou com água e nutriente, conforme o caso, foram compactados estaticamente 11 corpos de prova de 5 cm de diâmetro por 2 cm de altura, na umidade ótima. Posteriormente, foram modificados os teores de umidade para cima e para baixo da ótima com a finalidade de eles atingirem as umidades de trabalho definidas durante a pesquisa (ramo seco -3% e ramo úmido +3% da umidade ótima de compactação). Em seguida, para que se desse a cura, as amostras foram armazenadas em caixas de isopor na câmara úmida, como descrito anteriormente, durante o tempo necessário para a precipitação (mínimo 15 dias).

Terminado o período de cura, os teores de umidade dos corpos de prova eram modificados para a determinação da curva característica. O papel filtro inferior era colocado em contato com a amostra, a qual era envolvida em filme de PVC e alumínio, fazendo-se a identificação correspondente. Posteriormente, eles eram armazenados durante outras duas semanas, sendo este tempo definido como o necessário ao equilíbrio do fluxo capilar entre o papel e o solo. O

armazenamento foi realizado em condições similares às descritas para os corpos de prova após a compactação.

Quanto ao tempo de equilíbrio cabe também um parêntese, para descrever o fenômeno. Quando migra água do solo para o papel filtro, gera-se um aumento de sucção no solo que faz com que ele apresente certa fluência reduzindo os seus vazios. Essa redução de vazios aumenta o grau de saturação e para um novo equilíbrio novamente migra água do solo para o papel, e assim sucessivamente até que não se consegue mais determinar a variação de peso na balança utilizada, pois a linearidade dessa função se dá em escala logarítmica. Esse fenômeno foi colocado em evidência por Camapum de Carvalho *et al.* (2000) ao estudar uma mistura betuminosa que por essência flui. Portanto, assim como no adensamento poderiam ser definidas curvas características para diferentes idades.

3.2.5.4 ENSAIO DE COMPRESSÃO DIAMETRAL

Na engenharia este ensaio é muito usado para concretos, misturas asfálticas, rochas, entre outros sendo, no entanto, pouco usual no estudo de solos. O ensaio consiste na aplicação de uma carga de compressão uniformemente distribuída ao longo da geratriz da amostra com a geração de um estado de tensões formado por tensões de tração e tensão de compressão no plano que contém a carga aplicada (Bento, 2006).

A metodologia utilizada para este ensaio é a estabelecida pela norma DNER-ME 138/94. Após o ensaio de compressão diametral a amostra era retirada para determinar a umidade e o peso específico, utilizando-se o método da balança hidrostática (ABNT NBR-10838/88).

Na Figura 3.7 é apresentada a montagem necessária para realizar o ensaio. Salienta-se que a carga foi aplicada por meio de uma prensa hidráulica, com velocidade constante de 0,305 mm/min.

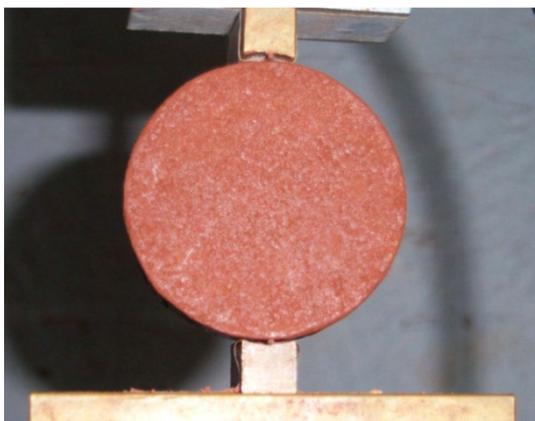


Figura 3.7 Ensaio de Compressão diametral

3.2.6 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO COM TRATAMENTO

Nesta fase foram preparados e adicionados os agentes precipitadores de carbonato de cálcio (CaCO_3) ao solo. A preparação desses agentes foi realizada no Laboratório de Microbiologia da Faculdade de Alimentos e Medicina Veterinária (FAV) na UnB.

Os ensaios necessários para a caracterização do solo com tratamento foram similares aos realizados para o solo sem adição de agentes precipitadores, visando à comparação completa de todas as propriedades do solo em amostras com e sem modificação.

A caracterização do solo com tratamento dividiu-se em duas etapas de trabalho, que envolveram a realização de diferentes tipos de ensaio. A seguir, será realizada a descrição de cada uma destas etapas:

3.2.6.1 FASE PREPARATÓRIA PARA A AÇÃO BIOLÓGICA

Durante esta fase foram preparados e incluídos no solo os agentes precipitadores. A descrição desta etapa será sub-dividida em duas fases:

A primeira fase consiste na preparação e adição do meio nutritivo B4 ao solo para que as próprias bactérias endógenas possam elevar o pH, o que favorece a precipitação de carbonato de cálcio.

Na segunda fase foi feita a preparação e colocação da enzima de uréase, gerada pelo feijão de porco, no solo. Os grãos de feijão de porco foram triturados em um homogeneizador, visando obter um extrato.

- PREPARAÇÃO DO MEIO NUTRIENTE B4

Como descrito no item 3.1.2, o meio B4 proposto por Lee (2003) é constituído por 15 g de acetato de cálcio, 4 g de extrato de levedura e 5 g de glicose, acrescido a 1000 ml de água destilada. A preparação do B4 foi realizada no Laboratório de Microbiologia da Faculdade de Alimentos e Medicina Veterinária (FAV) na UnB.

O processo de preparação do meio nutriente consistiu na esterilização de todos os componentes visando evitar a ação de outros agentes que afetassem o processo de precipitação de carbonato de cálcio. O acetato de cálcio e o extrato de levedura foram dissolvidos em água destilada e, posteriormente, levados à autoclave durante 30 minutos. A glicose foi filtrada em água auto-clavada. Terminada a esterilização, procedeu-se à mistura de todos os componentes do meio para sua posterior embalagem em recipientes de plástico, previamente lavados e esterilizados. Desta forma o meio B4 estava pronto para ser adicionado ao solo.

- PREPARAÇÃO DA ENZIMA URÉASE

A preparação da enzima foi realizada em duas etapas. A primeira consistiu na preparação de uma solução contendo um molar de acetato de cálcio e um molar de uréia pura em água destilada. Essa solução foi preparada no Laboratório da FAV na UnB.

A segunda etapa consistiu na obtenção do extrato de feijão de porco, o qual foi colocado de molho em água destilada durante um período de 1 hora, em uma proporção de 1:2. Posteriormente, a mistura foi triturada em um liquidificador e filtrada em um filtro de café (Figura 3.8). Foi determinado o pH do líquido filtrado. Esta fase foi realizada no Laboratório de Geotecnia da UnB.



Figura 3.8 Processo de preparação do extrato de feijão de porco

Terminadas as duas etapas anteriores foi realizada a mistura do extrato de feijão de porco com a solução, para sua posterior adição no solo.

Os dois meios foram aplicados ao solo como sendo a água necessária para conseguir a umidade ótima de compactação. Aclara-se que antes da aplicação dos meios no solo, o pH de cada um foi levado até um valor de 9 mediante a adição de NaOH.

3.2.6.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA, MINERALÓGICA E MECÂNICA DO SOLO COM ADIÇÃO DO MEIO NUTRITIVO B4

Os ensaios de caracterização física do solo com tratamento foram realizados após os de compressão simples, com a finalidade de avaliar a estabilidade e as características do solo depois de induzida a precipitação.

Valencia (2007) trabalhou com indução da precipitação de CaCO_3 no solo natural da voçoroca originária do solo de estudo desta pesquisa, e encontrou que o meio B4 funcionava muito bem como agente indutor na precipitação de carbonato de cálcio em amostras indeformadas. Embora os corpos de prova desta pesquisa sejam compactados, os resultados de Valencia (2007) indicaram que o tipo de solo objeto do estudo era apto para gerar uma indução de CaCO_3 mediante a adição do meio nutritivo B4.

Partindo do entendimento anterior, decidiu-se fazer uma bateria de ensaios similar à executada com o solo natural para o solo com adição do meio B4, sob as mesmas condições de trabalho do solo natural, visando obter parâmetros de comparação consistentes e sem divergências metodológicas.

Os corpos de prova foram preparados adicionando o meio B4 como a água necessária para atingir o teor ótimo de umidade para cada energia de compactação, no caso da energia intermediária foram adicionados 230 ml por cada 1000 gr de solo, para a energia normal foram adicionados 260 ml de meio B4 para o mesmo peso descrito.

3.2.6.3 DETERMINAÇÃO DA ATIVIDADE UREASICA DO EXTRATO DE FEIJÃO DE PORCO

Decidiu-se realizar um teste de atividade ureasica no extrato de feijão de porco para verificar a possibilidade de uso desse no processo de hidrólise de uréia, para posteriormente, gerar uma precipitação de CaCO_3 no solo.

Para executar este ensaio se pesaram 20 gr de feijão de porco, o qual foi colocado em 40 ml de água destilada, durante uma hora, para amolecer os grãos. Terminado esse período de tempo, triturou-se o feijão no liquidificador. Após a trituração, esse foi filtrado para obter o extrato e posteriormente gerou-se um pH do extrato neutro mediante a adição de hidróxido de sódio (NaOH).

Paralelamente ao extrato, tubos de ensaio foram cheios com uma solução de agar uréia previamente filtrada para não dar interferência a alguma bactéria durante o ensaio. Além de filtrada, a solução devia estar com pH neutro. A solução foi colocada dentro dos tubos em uma quantidade de 2,5 ml. A cada tubo com a solução de Agar uréia foi adicionada uma quantidade de 1 ml, 2 ml, 3 ml e 5 ml de extrato de feijão de porco. O ensaio é qualitativo, pois os resultados simplesmente são determinados pela mudança da cor quando colocado o extrato.

3.2.6.4 ENSAIOS DE COMPRESSÃO SIMPLES DO SOLO COM ADIÇÃO DE FEIJÃO DE PORCO

Ao contrario do meio B4, não se tinha a certeza da eficiência da enzima uréase contida no extrato de feijão de porco como meio indutor da hidrólise de uréia para gerar posteriormente precipitação de CaCO_3 . Sabendo-se que esse apresenta atividade ureásica, procedeu-se a realização de uma serie de testes, visando avaliar a variação na resistência do solo com a possível presença e produção de cristais de carbonato de cálcio. O procedimento adotado para a realização dos ensaios foi semelhante ao seguido com o meio B4.

Para a execução desses ensaios e após verificar a atividade ureasica do extrato de feijão de porco, realizaram-se misturas entre o extrato de feijão de porco e uma solução feita com 1 mol de acetato de cálcio e 1 mol de uréia em varias concentrações (2/5, 3/5, 4/5 e 1/1 o numerador corresponde ao extrato). Salienta-se que . Em seguida, cada mistura foi adicionada ao solo como a quantidade de água necessária para completar a umidade ótima em cada energia de compactação e posteriormente realizou-se a compactação dos corpos de prova.

Fabricaram-se três corpos de prova para cada concentração de extrato e para cada energia de compactação. Quando compactados os cilindros, colocou-se papel filtro para medir a sucção do solo. Posteriormente, as amostras foram envoltas em filme de PVC e filme de alumínio, para serem armazenados na câmara úmida durante um tempo de 14 dias. Finalizado

o tempo de armazenamento, foram realizados os ensaios de compressão simples e feitas as medidas dos respectivos valores de sucção.

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

No presente capítulo serão apresentados e analisados os resultados dos ensaios realizados.

4.1 MEIO NUTRIENTE B4

4.1.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

Existe divergência na literatura no que se refere às alterações, provocadas pelo tratamento com nutriente B4, nas propriedades físicas do solo. Segundo Gómez (2006), o tratamento não altera as propriedades físicas do solo. No entanto, Valencia (2007) defende a existência dessas alterações.

Os resultados, obtidos durante esta pesquisa, demonstram a ocorrência de mudanças nas propriedades físicas dos solos com tratamento. Durante a caracterização física do solo com e sem tratamento, encontrou-se várias diferenças entre os resultados obtidos. A seguir serão apresentados os resultados obtidos e as respectivas análises realizadas.

4.1.1.1 LIMITES DE ATTERBERG

Nos resultados obtidos a partir dos ensaios de limites de Atterberg foi observado que para todos os casos a adição do meio B4 gerou variação no valor de w_L . Assim, na Figura 4.1 é possível verificar que a umidade requerida para atingir o limite de liquidez diminuiu em todas as amostras tratadas com B4.

Nota-se que a maior mudança de w_L foi para os solos com umidade maior que a ótima (Figura 4.1 a) onde o w_L diminuiu 8,8% para o solo compactado na energia intermediária e 9,6% para o compactado na energia normal. As menores reduções foram obtidas para o solo compacto no ramo seco, sendo as quedas nos valores de 8,2% e 7,2% para as energias intermediária e normal respectivamente (Figura 4.1 b e c).

No w_p as reduções foram menores, em média 6,5%, e em sentido contrário ao verificado para o w_L , ou seja, as maiores quedas se deram para o solo mais seco e as menores para o solo mais úmido isso para ambas as energias de compactação (Tabela 4.1).

Como consequência da queda nos valores tanto de w_L quanto de w_P as reduções verificadas nos valores de IP foram relativamente pequenas, variando de 1,6% a 2,8% para a energia intermediária e de 0,4% a 3% para a normal.

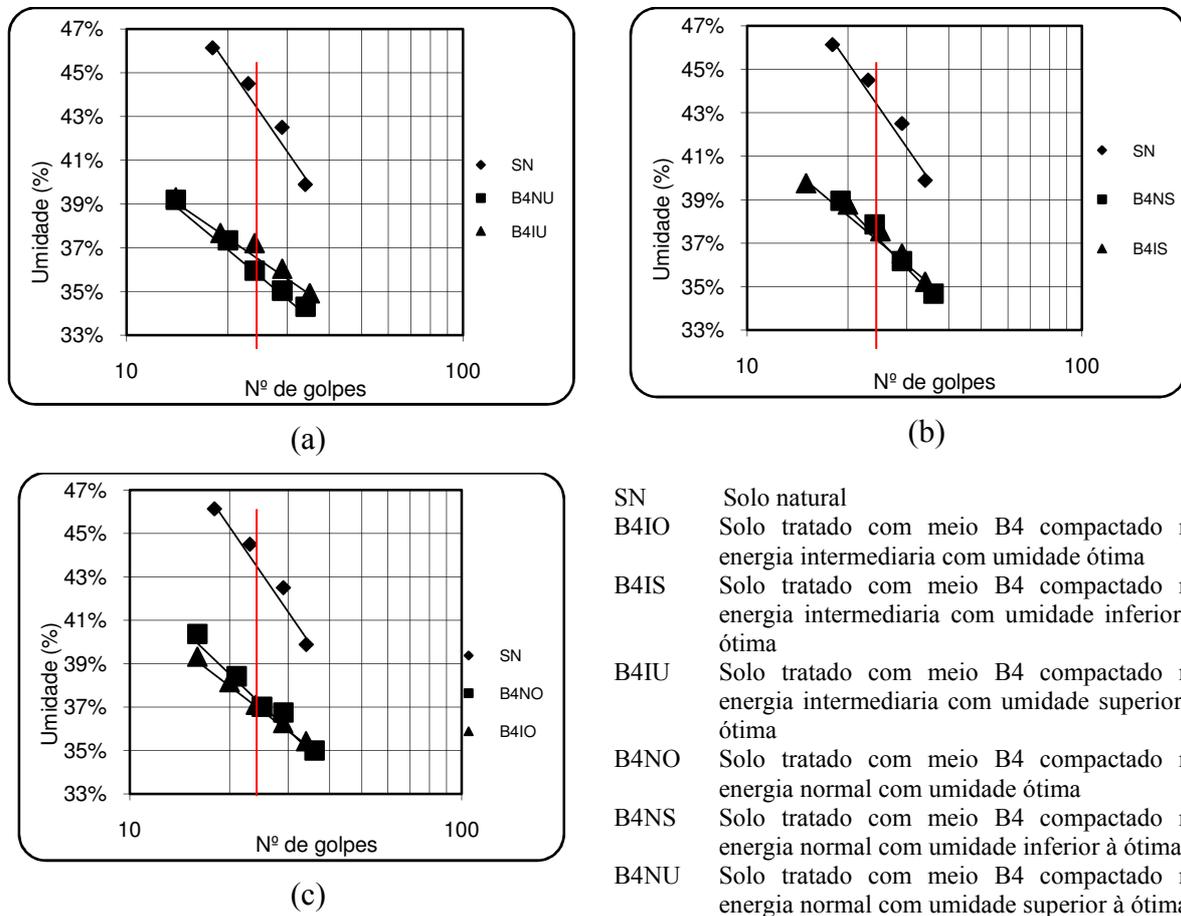
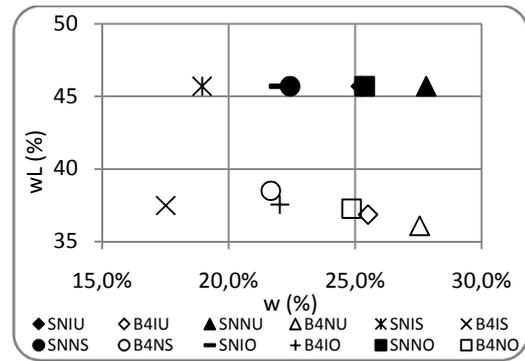
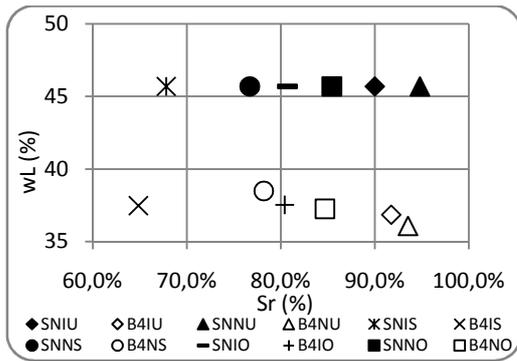


Figura 4.1 Limite de liquidez (a) Ramo úmido (b) Ramo seco (c) Umidade ótima

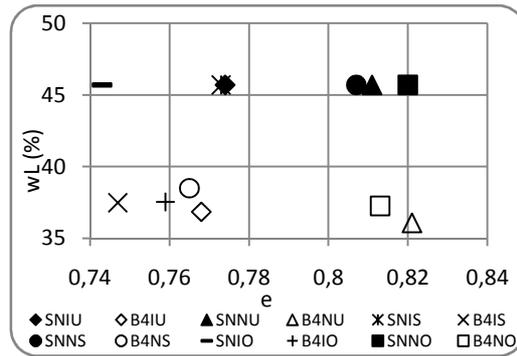
Correlacionando o limite de liquidez com o grau de saturação, com a umidade de compactação e com o índice de vazios do solo compactado, se observa que há uma tendência ao aumento do limite de liquidez com a diminuição do grau de saturação e da umidade e com o aumento do índice de vazios (Figura 4.2). Nesse comportamento apenas o ponto de menor umidade compactado na energia intermediária fugiu a essa tendência, apontando para a existência de uma condição ótima que corresponderia à variação máxima do limite de liquidez.

A relação do w_P com S_r , w (%) e com “ e ”, embora com variações menores, reflete um comportamento inverso ao observado para w_L , isto é, há uma pequena tendência à redução do limite de plasticidade com a diminuição do grau de saturação e da umidade e com o aumento do índice de vazios (Figura 4.3).



(a)

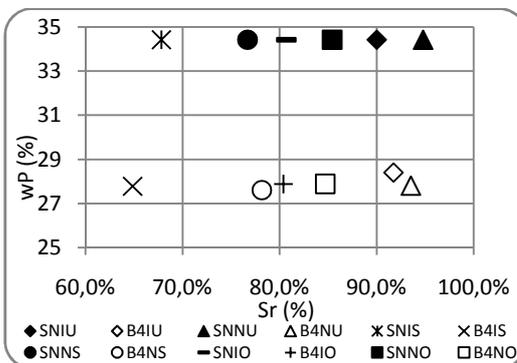
(b)



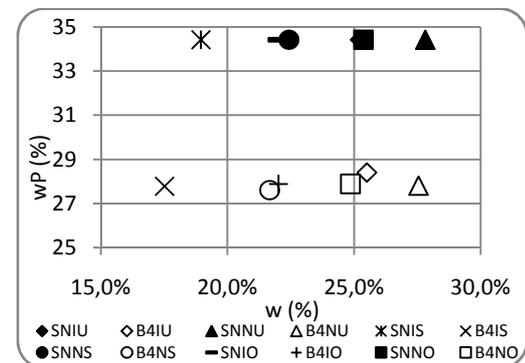
(c)

- B4IO Solo tratado com meio B4 compactado na energia intermediaria com umidade ótima
- B4IS Solo tratado com meio B4 compactado na energia intermediaria com umidade inferior à ótima
- B4IU Solo tratado com meio B4 compactado na energia intermediaria com umidade superior à ótima
- B4NO Solo tratado com meio B4 compactado na energia normal com umidade ótima
- B4NS Solo tratado com meio B4 compactado na energia normal com umidade inferior à ótima
- B4NU Solo tratado com meio B4 compactado na energia normal com umidade superior à ótima
- SNIO Solo sem tratamento compactado na energia intermediaria com umidade ótima
- SNIS Solo sem tratamento compactado na energia intermediaria com umidade inferior à ótima
- SNIU Solo sem tratamento compactado na energia intermediaria com umidade superior à ótima
- SNNO Solo sem tratamento compactado na energia normal com umidade ótima
- SNNS Solo sem tratamento compactado na energia normal com umidade inferior à ótima
- SNNU Solo sem tratamento compactado na energia normal com umidade superior à ótima

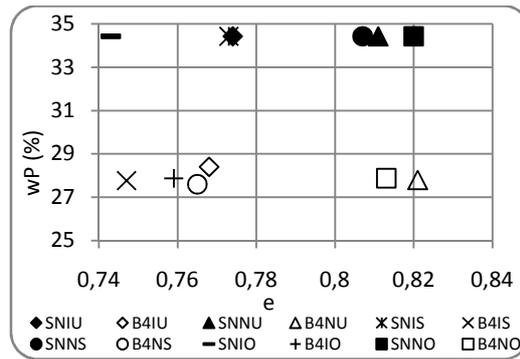
Figura 4.2 Correlações do w_L (a) com S_r (%) (b) com w (%) (c) com “e”



(a)



(b)



(c)

- B4IO Solo tratado com meio B4 compactado na energia intermediaria com umidade ótima
- B4IS Solo tratado com meio B4 compactado na energia intermediaria com umidade inferior à ótima
- B4IU Solo tratado com meio B4 compactado na energia intermediaria com umidade superior à ótima
- B4NO Solo tratado com meio B4 compactado na energia normal com umidade ótima
- B4NS Solo tratado com meio B4 compactado na energia normal com umidade inferior à ótima
- B4NU Solo tratado com meio B4 compactado na energia normal com umidade superior à ótima
- SNIO Solo sem tratamento compactado na energia intermediaria com umidade ótima
- SNIS Solo sem tratamento compactado na energia intermediaria com umidade inferior à ótima
- SNIU Solo sem tratamento compactado na energia intermediaria com umidade superior à ótima
- SNNO Solo sem tratamento compactado na energia normal com umidade ótima
- SNNS Solo sem tratamento compactado na energia normal com umidade inferior à ótima
- SNNNS Solo sem tratamento compactado na energia normal com umidade superior à ótima

Figura 4.3 Correlações do wP (a) com Sr (%) (b) com w (%) (c) com “e”

Tendo em vista que para uso em pavimentação geralmente se prioriza os solos menos plásticos, conclui-se que, de maneira geral, a redução nos valores de w_L , w_P e IP (Tabela 4.1) geradas no solo pelo tratamento apontam para a melhoria do seu comportamento para esse fim. A melhoria obtida pode resultar do surgimento de novos compostos no solo bem como da simples alteração química do meio proporcionada pelo B4 ou ainda, de ambos. Este esclarecimento deve ser buscado neste e em outros estudos sobre o tema.

Segundo Santos (1975), ao aumentar a carga positiva dos íons do meio, por exemplo, adicionando Ca^{2+} ou Mg^{2+} o potencial eletrocinético das partículas diminui e a repulsão entre elas também. Portanto, começa-se a gerar uma aglomeração de partículas. Logo, a diminuição no valor de IP das amostras analisadas é um indicio de cimentação das partículas por causa do tratamento com nutrientes B4.

Outro aspecto a ser realçado com fundamento dos dados apresentados por White (1955) *apud* Grim (1962), é que em solos caulíníticos, como é o caso do solo estudado, esses elementos químicos tendem a ampliar a plasticidade e não reduzi-la como ocorreu, o que aponta para o surgimento de novos compostos em detrimento da influência da simples alteração química do meio.

Tabela 4.1 Resumo resultados de ensaios de limites de Atterberg

AMOSTRA	w _L %	w _P %	IP
SN	45,7	34,4	11,3
B4IU	36,9	28,4	8,5
B4IO	37,5	27,9	9,7
B4IS	37,5	27,8	9,7
B4NU	36,1	27,8	8,3
B4NO	37,3	27,9	9,4
B4NS	38,5	27,6	10,9

Ao se plotar os resultados dessa pesquisa conjuntamente com os obtidos por Camapum de Carvalho (1985) para solos apresentando diferentes teores de carbonato de cálcio, verifica-se que o deslocamento para a esquerda obtido ao se adicionar B4 ao solo estudado coincide com o sentido do deslocamento observado ao se aumentar o teor de carbonato de cálcio nos solos estudados por aquele autor (Figura 4.4). Com isso infere-se que a adição de B4 ao solo estudado poderia gerar carbonato de cálcio no solo.

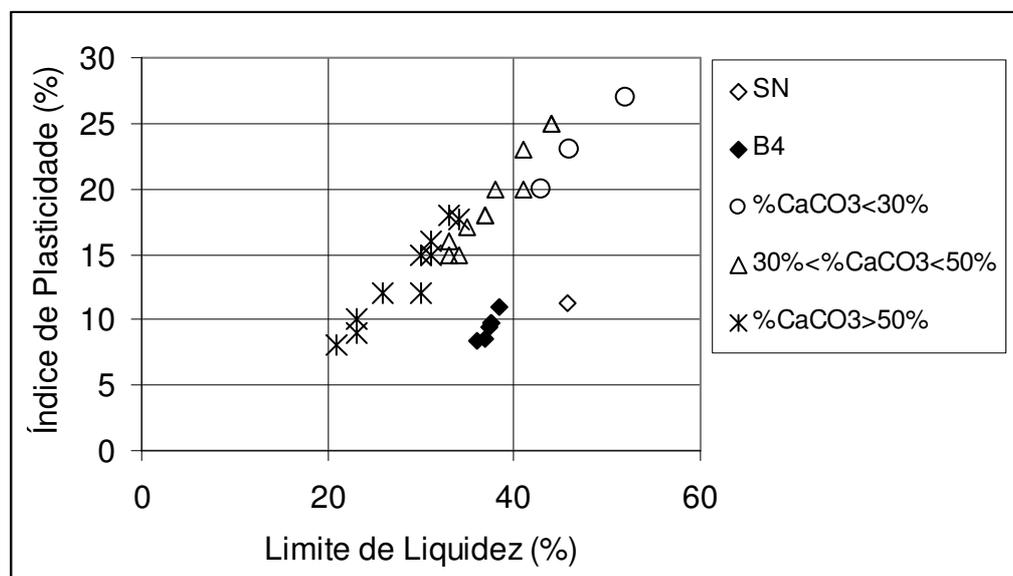


Figura 4.4 Carta de plasticidade

4.1.1.2 COMPACTAÇÃO

Para avaliar a variação de γ_d com a energia de compactação e determinar a umidade ótima foram realizados ensaios de compactação miniatura e Mini-MCV. Os resultados destes ensaios são respectivamente exibidos nas Figura 4.5 e Figura 4.6. Com base nos resultados mostrados na Figura 5.7 tem-se que a umidade ótima para a energia intermediária é 23% e

para a energia normal é 27% e os valores de γ_{dmax} são respectivamente de 16,2 kN/m³ e de 15,5 kN/m³. Cabe lembrar que para a compactação na energia intermediária utilizou-se o soquete pesado e na normal o soquete leve e em ambos os casos compactou-se nessa fase do estudo apenas o solo natural.

Observa-se que para a energia intermediária os resultados de mini compactação (Figura 4.5) são similares aos apresentados pelo ensaio mini-MCV (Figura 4.6 a). Na energia normal, ocorreu uma diferença entre os resultados dos ensaios mencionados. No ensaio mini-MCV (Figura 4.6 b) a umidade ótima de compactação foi aproximadamente de 28%, ou seja, 1% acima do valor obtido no ensaio de mini compactação (Figura 4.5), devendo-se tal diferença à distribuição de pontos e traçado da curva de compactação.

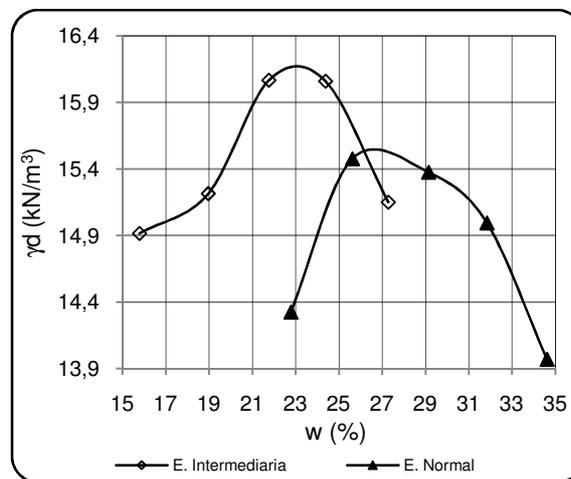


Figura 4.5 Curvas de compactação miniatura

Na Figura 4.6 (a) se observa que γ_d não apresenta variação significativa a partir da aplicação de 6 golpes. No entanto, na energia normal o comportamento do solo varia um pouco. Quando aumentada a quantidade de golpes a umidade ótima de compactação diminui.

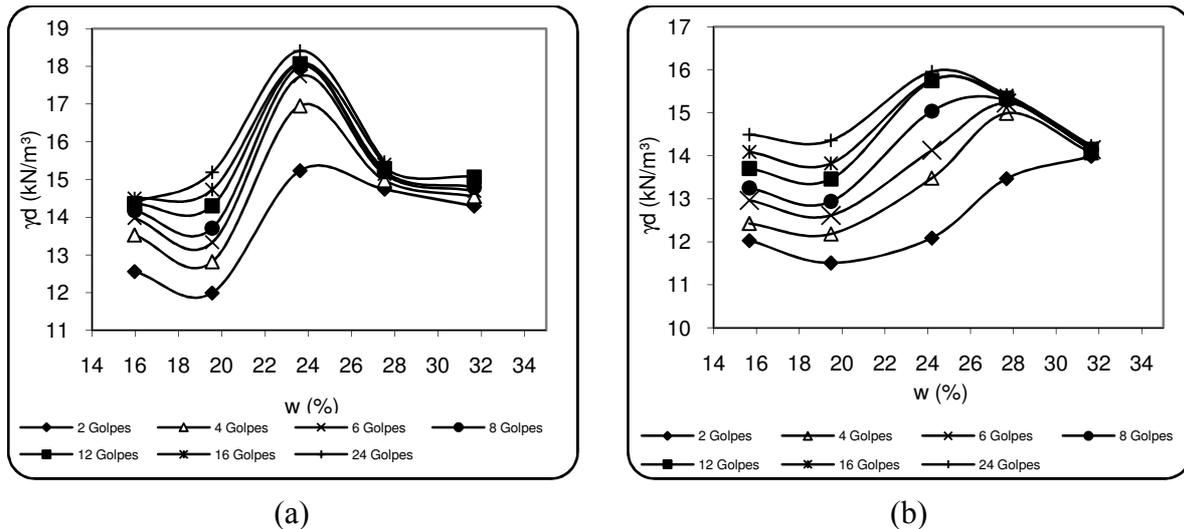


Figura 4.6 Família de curvas Mini-MCV (a) Energia Intermediaria (b) Energia Normal

4.1.1.3 ANÁLISES GRANULOMÉTRICAS

Todas as amostras de solo natural e tratado com nutriente B4 foram submetidas aos ensaios granulométricos no intuito de verificar a influência do nutriente B4 na agregação do solo natural. As curvas granulométricas que originaram os resultados mostrados na Tabela 4.2 estão apresentadas no Anexo A. Para uma melhor interpretação dos dados apresentados na tabela em menção, foram realizados gráficos para cada fração granulométrica (Anexo B).

Foram realizados ensaios de granulometria utilizando a metodologia de sedimentação e do granulômetro a laser, considerando que essas metodologias podem gerar diferenças nos resultados. O uso de agentes dispersores seja químico (defloculante) ou físico (ultra-som) tem maior relevância na dispersão dos grãos. Além disso, nas curvas granulométricas obtidas no ensaio de sedimentação o tamanho mínimo dos grãos passível de ser determinado é geralmente de 0,001 mm, entretanto, com o granulômetro a laser esse tamanho é de até 0,0001 mm.

A amostra de solo sem tratamento ao ser ensaiada pelo método da sedimentação, apenas com água destilada, apresentou um percentual elevado de areia, 90%. Com o uso de defloculante esse percentual de areia sofreu uma considerável redução e as partículas de silte e argila apresentaram um aumento pronunciado.

Tabela 4.2 Teores das frações granulométricas

SOLO	Energia Intermediária					Energia Normal				
	AMOSTRA	% Ped	% Areia	% Silte	% Argila	SOLO	% Ped	% Areia	% Silte	% Argila
Solo Natural	Sed sem Def	0	90	6	4	Sed sem Def	0	90	6	4
	Sed com Def	0	36	19	45	Sed com Def	0	36	19	45
	GL sem Def	2	77	20	1	GL sem Def	2	77	20	1
	GL sem Def + Ult	0	19	56	25	GL sem Def + Ult	0	19	56	25
	GL com Def	2	61	26	10	GL com Def	2	61	26	10
	GL Def + Ult	0	10	65	26	GL Def + Ult	0	10	65	26
Solo com B4 (Umidade ótima)	Sed sem Def	0	82	16	2	Sed sem Def	0	82	16	2
	Sed com Def	0	43	25	32	Sed com Def	0	48	18	34
	GL sem Def	2	60	34	4	GL sem Def	2	65	31	2
	GL sem Def + Ult	0	29	48	23	GL sem Def + Ult	0	14	68	19
	GL com Def	2	52	36	10	GL com Def	2	60	34	5
	GL Def + Ult	0	12	66	22	GL Def + Ult	0	8	68	24
Solo com B4 (Ramo seco)	Sed sem Def	0	83	16	2	Sed sem Def	0	83	15	2
	Sed com Def	0	43	24	32	Sed com Def	0	44	21	35
	GL sem Def	2	52	42	5	GL sem Def	2	39	49	10
	GL sem Def + Ult	0	14	64	22	GL sem Def + Ult	0	12	69	18
	GL com Def	2	45	40	13	GL com Def	2	36	47	15
	GL Def + Ult	0	9	68	23	GL Def + Ult	0	9	67	23
Solo Tratado com B4 (Ramo úmido)	Sed sem Def	0	77	21	2	Sed sem Def	0	79	20	2
	Sed com Def	0	47	23	30	Sed com Def	0	52	23	26
	GL sem Def	2	55	39	4	GL sem Def	2	54	39	5
	GL sem Def + Ult	0	15	66	19	GL sem Def + Ult	0	23	55	22
	GL com Def	2	42	39	18	GL com Def	2	60	34	5
	GL Def + Ult	0	10	65	25	GL Def + Ult	0	10	63	27

Esta mesma amostra ensaiada no granulômetro a laser, apenas com água destilada, apresentou um percentual de areia pouco menor do que o verificado na amostra ensaiada por sedimentação com defloculante. A adição do defloculante ao solo no granulômetro a laser não revelou uma diminuição relevante nos percentuais de areia. Todavia, quando se utilizou o ultra-som a redução dos percentuais de areia foi muito alta, sendo ainda maior quando se associou o uso do ultra-som com defloculante. Nesta última situação pode-se verificar que o percentual de areia não ultrapassou 10 % ocorrendo uma notável concentração dos finos na fração silte. Tais resultados indicam a eficiência do defloculante na desagregação. A redução de areia em todas as amostras de solo natural, submetidas às duas metodologias de análise

granulométrica, sempre implicou em aumentos consideráveis da fração silte, e um acréscimo não tão relevante da fração argila. Exceto quando a amostra foi ensaiada com defloculante no método de sedimentação, onde o aumento da fração argila teve maior destaque.

Os percentuais das frações granulométricas, obtidos pelos ensaios realizados com o granulômetro a laser utilizando ultra-som e defloculante, se destacaram pela maior desagregação do solo, sobretudo da fração areia. Notou-se uma variação mínima, de aproximadamente 2%, nas frações granulométricas, das mostras com tratamento B4 em relação às amostras de solo natural. A princípio isso indicaria que o tratamento com nutriente B4 não gerou a agregação esperada das partículas. Contudo, é muito provável que isso tenha ocorrido por causa da grande eficiência do ultra-som somada à ação do defloculante, como agentes desagregadores do solo. Portanto, estes agentes estariam também atuando na quebra das ligações promovidas pelo CaCO_3 precipitado nas amostras após o tratamento com o nutriente B4.

É importante salientar que essa variação mínima é um aspecto que aponta para a existência de melhoria na agregação das amostras de solo tratadas com nutriente B4. Cabe ainda destacar que as amostras de solo natural, ao contrário das amostras tratadas, não foram submetidas a processo de compactação, o que em princípio contribui para a preservação dos agregados e micro agregados. Logo, era de se esperar que as amostras tratadas apresentassem um aumento nas frações de silte e argila, produzidas pela quebra dos agregados e grãos originada no processo de compactação. No entanto, isso não ocorreu, o que fortalece a hipótese do melhoramento na cimentação nas amostras de solo estudadas.

As evidências de melhoria na agregação do solo, também são notadas no aumento dos valores do peso específico dos grãos que aumentaram para quase todas as amostras. Esse aumento do G_s aponta para o surgimento no solo de outros compostos de maior densidade (Tabela 4.3), tais como os cristais de CaCO_3 , que estariam precipitando nas amostras de solo após o tratamento com nutriente B4.

Existem diferenças quanto ao percentual de areia presente entre as amostras tratadas com energia de compactação intermediária e as amostras com a energia normal. Notou-se que há uma tendência a se ter maiores percentuais de areia nas amostras compactadas com a energia equivalente ao Proctor normal. Isso ocorre porque nesta energia de compactação, a possível quebra de grãos é menor. Outro aspecto relevante diz respeito ao fato do teor de areia no solo tratado com B4 e submetido ao efeito do defloculante e/ou do ultra-som tender a ser superior

aos valores obtidos para o solo não tratado, o que mais uma vez aponta para a agregação de partículas menores ou para o surgimento de novos compostos integrando a fração areia.

As características dos solos analisados permitem classificá-los como lateríticos. A Tabela 4.3 contém a classificação das amostras realizada mediante os métodos MCT expedito, AASHO e Unificado (USCS). Assim, pode-se ver que o tratamento gerou alterações de tipo físico conduzindo a uma variação do tipo de solo, especialmente para os métodos de classificação AASHO e MCT expedita.

Ao observar a Tabela 4.3, nota-se que quando a classificação foi realizada pela metodologia MCT expedita quase todas as amostras corresponderam ao tipo “solo arenoso laterítico” ou ao tipo “argiloso laterítico” (LA'-LG'). Note-se ainda, que pelo sistema de classificação AASHO a classificação correspondeu a um solo siltoso, mas tanto a amostra de SN quanto a amostra B4NS apresentaram características argilosas. No caso da metodologia unificada, todas as amostras foram classificadas como silte de baixa compressibilidade (ML).

Tabela 4.3 Resumo de ensaios de caracterização física para todas as amostras

AMOSTRA	w _L %	w _P %	IP	Gs	CLASIFICAÇÃO		
					MCT expedita	AASHO	USCS
SN	45,70	34,42	11,28	2,76	LA'-LG'	A7-5	ML
B4IU	36,85	28,40	8,45	2,78	LA'-LG'	A-4	ML
B4IO	37,54	27,87	9,67	2,77	LA'-LG'	A-4	ML
B4IS	37,48	27,77	9,71	2,70	LG'	A-4	ML
B4NU	36,08	27,80	8,28	2,78	LG'	A-4	ML
B4NO	37,26	27,88	9,38	2,77	LA'-LG'	A-4	ML
B4NS	38,49	27,60	10,89	2,81	LA'-LG'	A-6	ML

4.1.2 CARACTERIZAÇÃO ESTRUTURAL

Araki (1997) afirma que os solos tropicais possuem micro-agregações de argila que geram uma variação nos teores das frações granulométricas causada pela acidez e o intemperismo que eles sofrem. Cabral (2002) afirma que as propriedades físicas e o comportamento mecânico dos solos tropicais estão quase sempre associados à micro-estrutura desenvolvida no processo de alteração a que foram submetidos.

Para avaliar as frações granulométricas do solo é usado o teor de agregação (T.A.), que indica qual o grau de floculação que esse tem. O T.A. é determinado pela seguinte equação:

$$T.A. = \frac{\% \text{ argila com defloculante} - \% \text{ argila sem defloculante}}{\% \text{ argila com defloculante}} \quad (9)$$

Na Tabela 4.4 pode-se observar a variação do T.A. Observa-se que esse valor variou levemente com respeito ao solo natural sendo sempre maior para as amostras com tratamento. Isso pode ser visto da Figura 4.7 até a Figura 4.9, as quais apresentam imagens com um aumento de 100x e de 200x para cada tipo de solo estudado. Nas figuras em menção pode-se ver que há presença de precipitados entre os grãos.

Observa-se, portanto, que o tratamento gerou um leve aumento na floculação/agregação das partículas, sendo mais notório para os corpos com energia intermediária.

Tabela 4.4 Teor de agregação das amostras

SOLO	T.A. (%)
SN	91
B4IO	95
B4IS	94
B4IU	94
B4NO	96
B4NS	96
B4NU	93



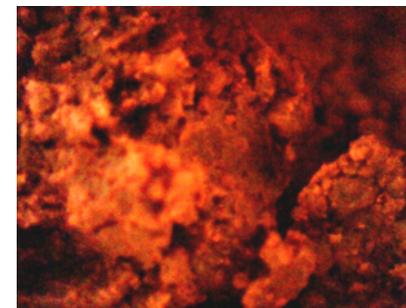
(a) SNIO 100x



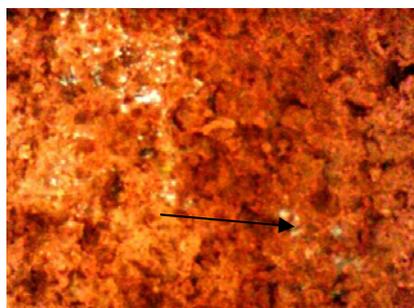
(b) SNIO 100x



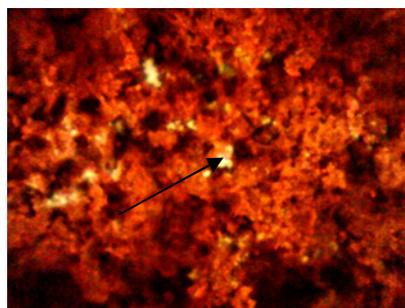
(c) SNNO 100x



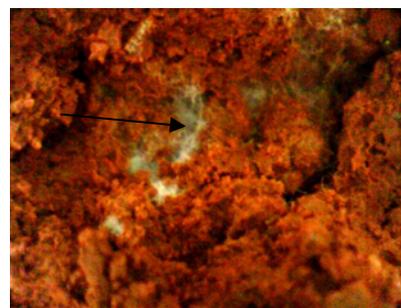
(d) SNNO 200x



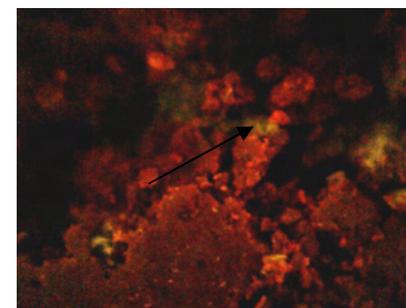
(e) B4IO 100x



(f) B4IO 200x

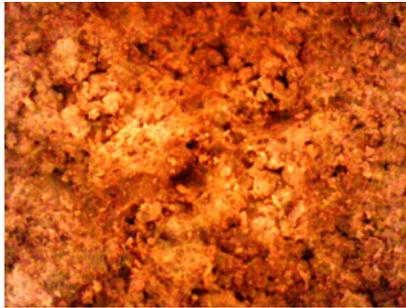


(g) B4NO 100x

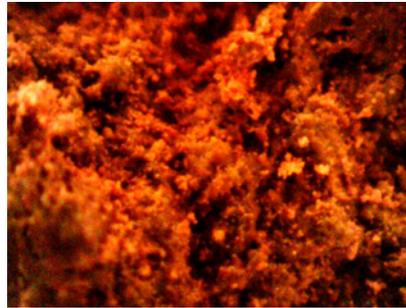


(h) B4NO 200x

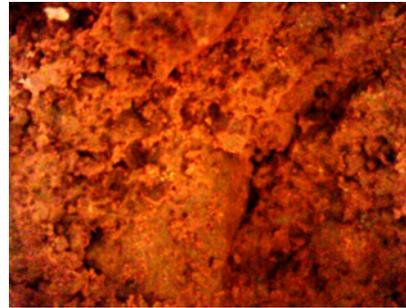
Figura 4.7 Estrutura do solo para umidade ótima



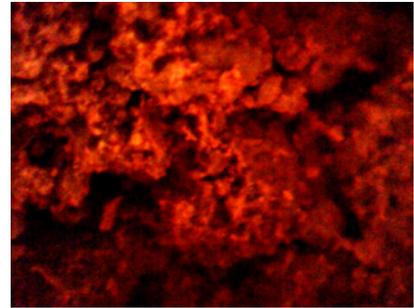
(a) SNIS 100x



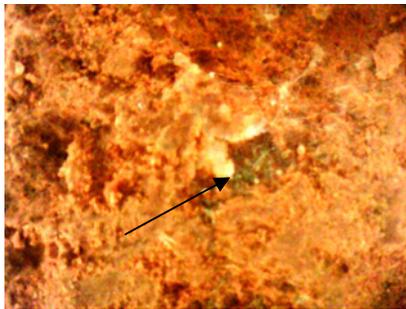
(b) SNIS 200x



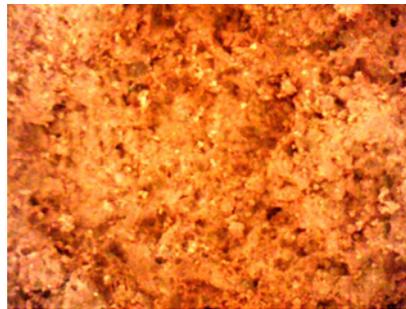
(c) SNNS 100x



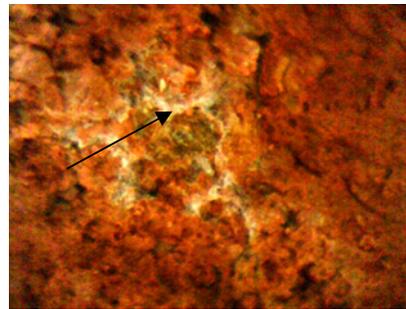
(d) SNNS 200x



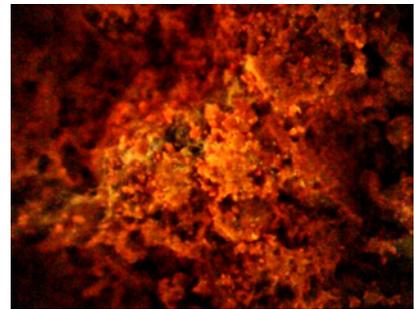
(e) B4IS 100x



(f) B4IS 200x

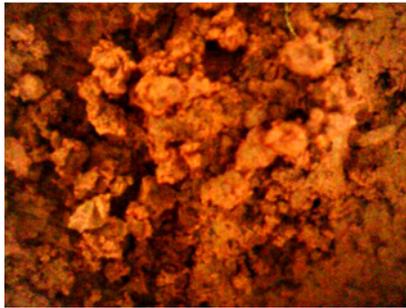


(g) B4NS 100x

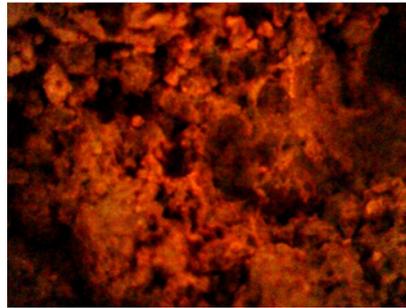


(h) B4NS 200x

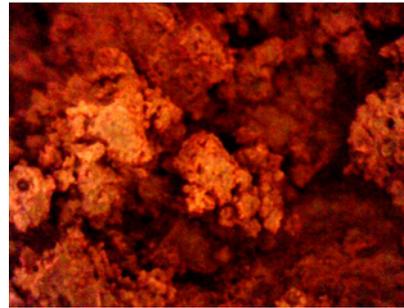
Figura 4.8 Estrutura do solo para umidade no ramo seco



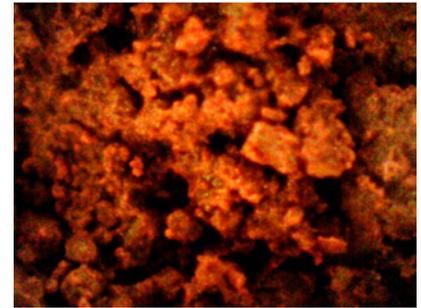
(a) SNIU 100x



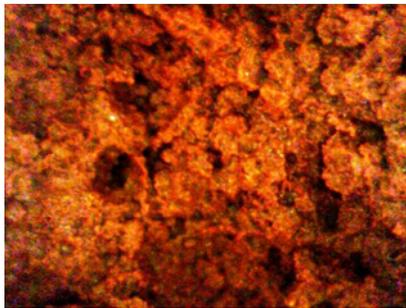
(b) SNIU 200x



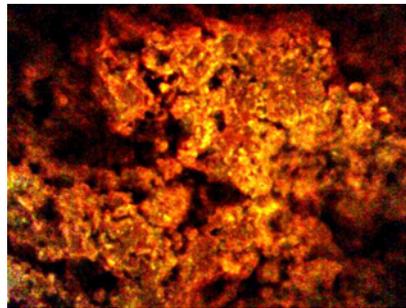
(c) SNNU 100x



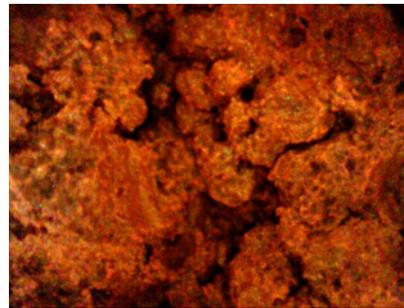
(d) SNNU 200x



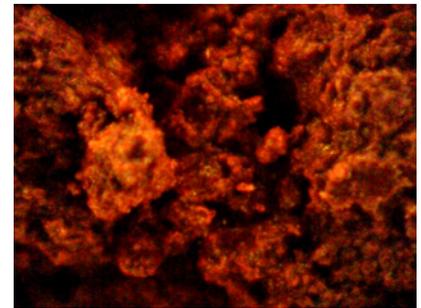
(e) B4IU 100x



(f) B4IU 200x



(g) B4NU 100x



(h) B4NU 200x

Figura 4.9 Estrutura do solo para umidade no ramo úmido

4.1.3 CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA

Segundo Lima (2003), os solos do Distrito Federal são formados basicamente por minerais secundários caulinita, ilita goethita, hematita, gibbsita, anastásio/rutilo e o quartzo primário, com uma quantidade importante de amorfos de Fe, Al e Si. As amostras investigadas neste trabalho foram submetidas a ensaios de difração de raios -X (DRX). Os difratogramas resultantes destes ensaios revelam semelhanças com a composição mineralógica apontada por Lima (2003), pois indicam a presença dos seguintes minerais no solo natural: caulinita, gibbsita e hematita, sendo a caulinita o mineral predominante (Figura 4.10).

Os difratogramas das amostras tratadas com o nutriente B4 apresentaram minerais similares às do solo natural sem indicar a presença de CaCO_3 (Anexo C). Isso pode ter sido causado por uma sobreposição de picos que não permitiu identificar os correspondentes ao carbonato de cálcio. Neste caso a técnica de DRX não teria sido efetiva para verificar a presença de CaCO_3 , provavelmente porque a influência do tratamento com meio B4 ocorre na micro-estrutura do solo.

Outras técnicas como a geração de espectrogramas de raios infra-vermelhos com transformada de Furier (FTIR) ou análise termo gravimétrica (ATG), podem oferecer a possibilidade de determinar a existência desta substância no solo.

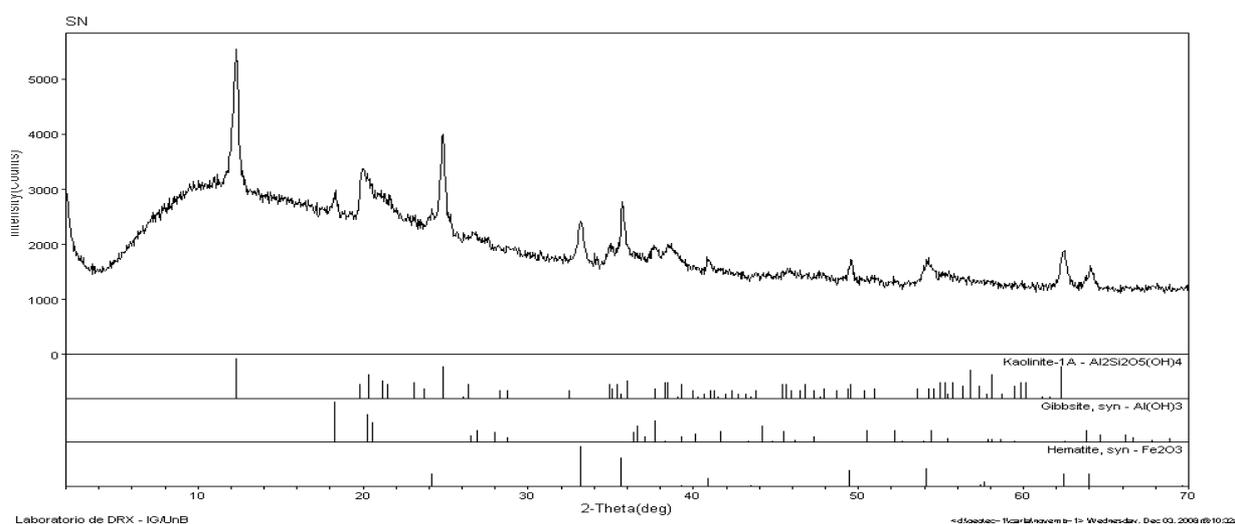


Figura 4.10 Difratograma de raios X para amostra SN

A técnica espectroscópica de Infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) é amplamente usada para identificar compostos orgânicos ou caracterizar grupos funcionais de diferentes substâncias químicas.

No presente trabalho, visando complementar os resultados dos ensaios de DRX, a técnica em menção foi aplicada para verificar a presença de precipitação de carbonato de cálcio provocada pela adição do meio nutritivo B4 ao solo. As amostras preparadas foram analisadas no espectrômetro BOMEN MB-100, pertencente ao Instituto de Química da UnB.

Quando comparados os resultados dos espectros de FTIR correspondentes ao solo natural (Figura 4.11) e ao solo tratado com o meio B4 (Anexo D), observou-se que não foram apresentadas sinais de presença de CaCO_3 nos espectros.

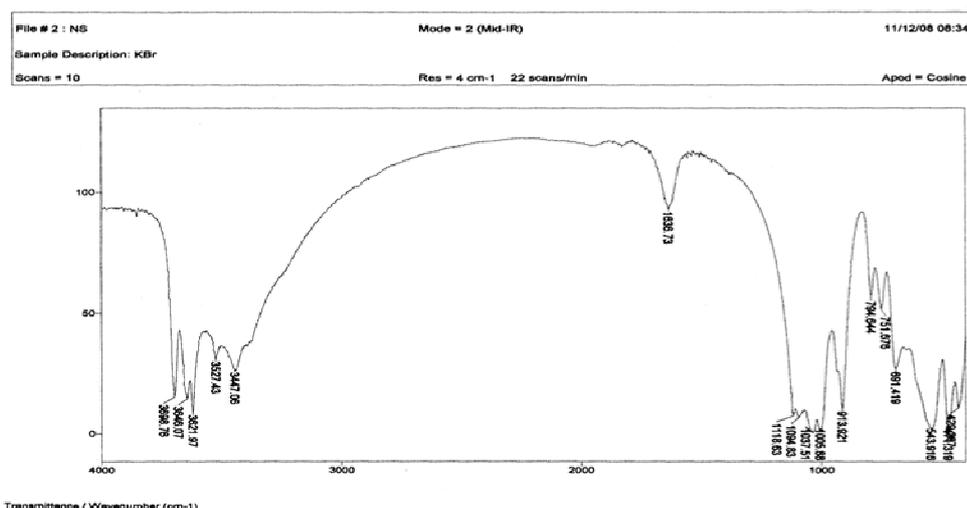


Figura 4.11 Espectro de FTIR para a amostra SN

Para verificar se o tratamento provocava variação no pH, foram realizadas determinações no solo natural e 1,5 meses após a adição do meio B4 . Essas determinações mostraram que o solo inicialmente ácido teve a acidez diminuída com o tratamento, chegando a tornar-se básico para as amostras compactadas no ramo úmido (Tabela 4.5). Cabe lembrar que o pH básico favorece a precipitação de CaCO_3 .

Tabela 4.5 Valores de pH para todos os solos

SOLO	pH
SN	5,72
B4IO	6,86
B4IS	7,84
B4IU	6,53
B4NO	6,91
B4NS	7,38
B4NU	6,66

A Figura 4.12 mostra que a plasticidade diminui bem como o pH aumenta ao se acrescentar o meio B4 ao solo. No entanto, percebe-se dessa figura, que o pH e a plasticidade estão relacionadas à condição de compactação. Tal observação é relevante, pois sabendo-se que a atuação das bactérias na geração do CaCO_3 depende de aspectos como porosidade e umidade, aspectos estes pouco relevantes para a simples atuação química do composto B4 no solo, torna-se descartável a influência isolada da química nas propriedades do solo e abre-se espaço para a possibilidade de precipitação do carbonato de cálcio.

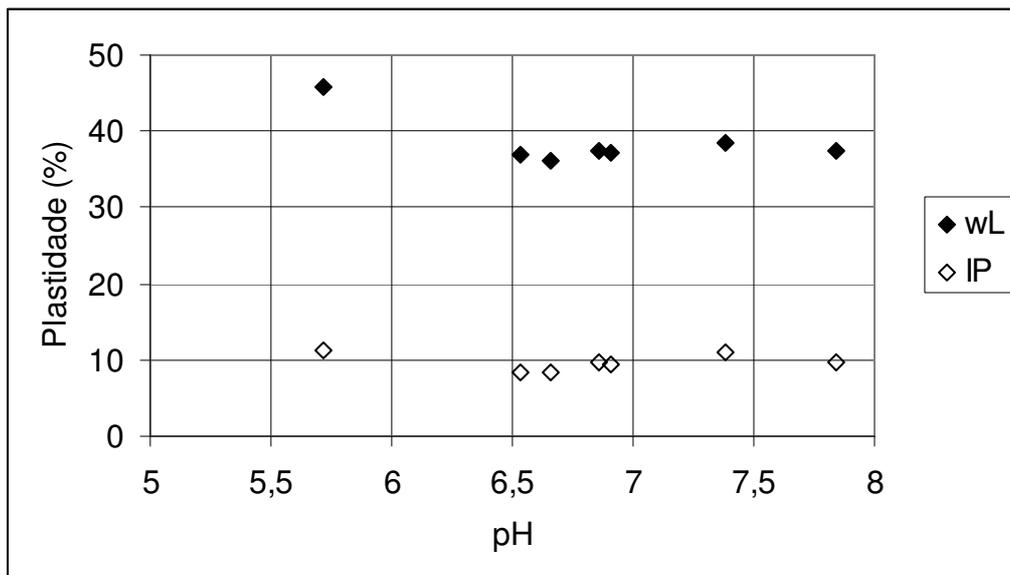


Figura 4.12 Influência do pH na plasticidade do solo.

4.1.4 CARACTERIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO

Cabe lembrar que para a análise da influência do tratamento com o meio B4 todos os corpos de prova foram compactados na condição ótima e em seguida conduzidos a um aumento ou diminuição da umidade para então serem submetidos à cura. A idéia era eliminar eventuais efeitos oriundos da condição de compactação.

4.1.4.1 CURVA CARACTERÍSTICA DE RETENÇÃO DE ÁGUA

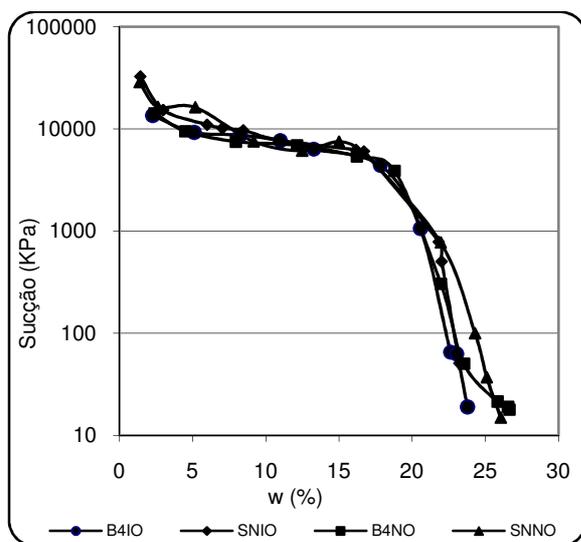
Para determinar a influência do tratamento no solo, foram determinadas as curvas características de retenção de água em termos de sucção matricial para todas as amostras. As determinações foram feitas depois da finalização do período de cura dos corpos de prova, ou seja, após a cura eles eram conduzidos às diferentes umidades mediante secagem e umedecimento com água e posteriormente submetidos ao tempo de equilíbrio da sucção.

Apesar de a compactação tender a eliminar os macroporos presentes no solo e, portanto, destruir o aspecto bi-modal que caracteriza os solos tropicais profundamente intemperizados, as curvas obtidas dá nuances dessa característica típica (Figura 4.13 até Figura 4.15).

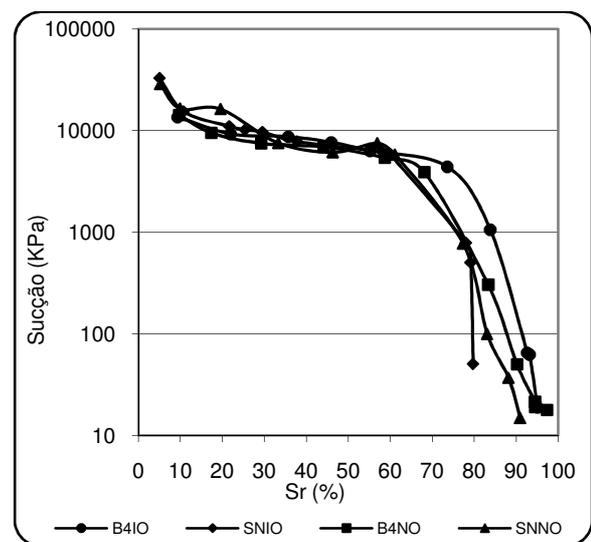
Para verificar melhor a alteração na distribuição dos poros, foram feitos gráficos das curvas características transformadas em relação ao índice de vazios, revelando que há uma variação no comportamento do solo. Segundo Camapum de Carvalho & Leroueil (2004), a curva característica transformada facilita a análise do comportamento dos solos tropicais quando leva em conta a dimensão e distribuição dos poros.

Na Figura 4.13 (a) pode-se observar que as curvas características obtidas para a umidade ótima em função da variação de $w\%$ são praticamente coincidentes. No entanto, quando construída a curva característica em função da saturação (Figura 4.13 b) é notória a diferença na parte que corresponde à macro-estrutura, apontando para o fechamento dos macroporos quando do uso do meio B4.

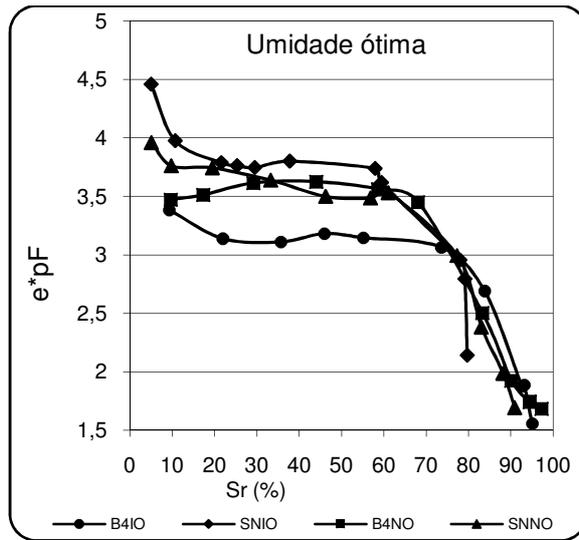
Na tentativa de verificar a influência dos poros no comportamento do solo, foi realizada a transformação da curva característica (Figura 4.13 c). Camapum de Carvalho et al. (2002) mostraram que nesse caso o ideal seria separar os macroporos dos microporos para então aplicar as transformações. Sem tal separação, observa-se que a transformação conduz as curvas a um comportamento único no domínio dos macro e meso poros, sendo, no entanto, os mesmos distintos no caso dos microporos. A maior diferença nas curvas é apresentada para os solos compactados na energia intermediária.



(a)



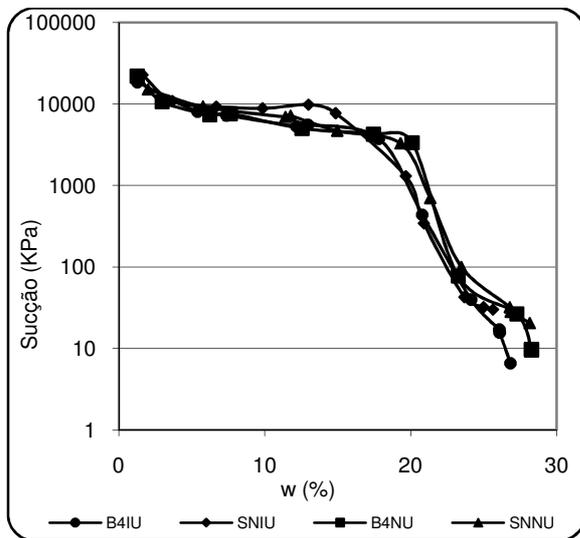
(b)



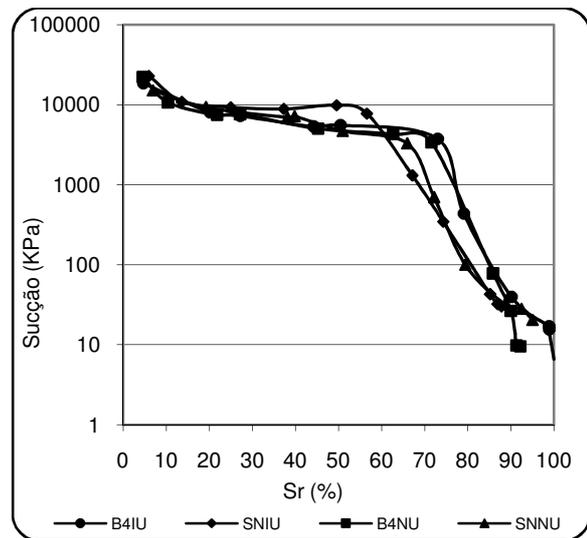
(c)

Figura 4.13 Curvas características na umidade ótima (a) Sucção-w (b) Sucção-Sr (c) e^*pF -Sr

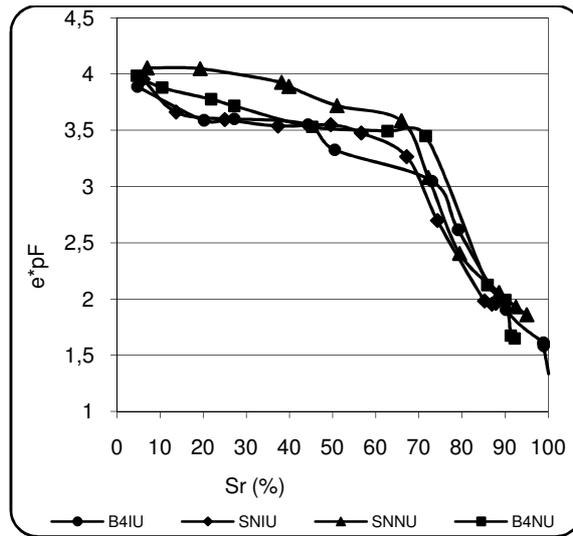
No caso dos solos conduzidos ao ramo úmido (Figura 4.14), a tendência é similar à apresentada para os solos curados na umidade ótima (Figura 4.13). Isso quer dizer que para estes solos também se gerou uma variação na macro e meso estrutura, mas as maiores mudanças foram dadas para os solos compactados na energia equivalente ao Proctor normal. O gráfico em questão indica que existe uma diminuição dos vazios e que possivelmente seriam o próprio meio ou os cristais de $CaCO_3$ precipitados que passaram a ocupá-los.



(a)



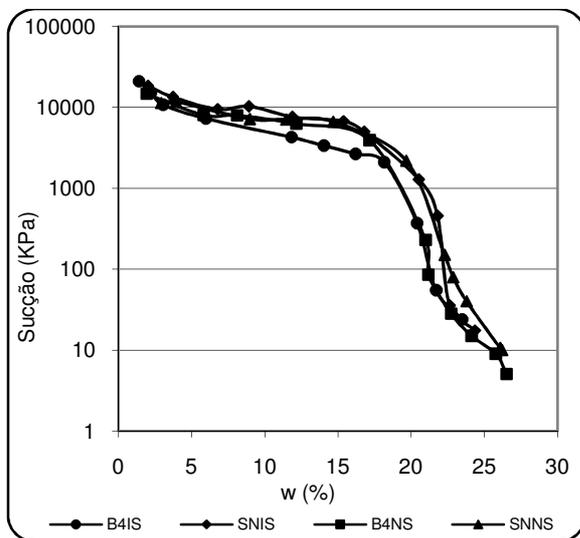
(b)



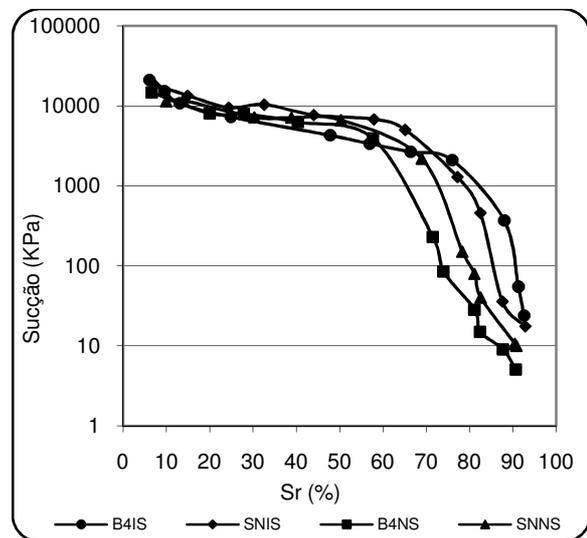
(c)

Figura 4.14 Curvas características no ramo úmido (a) Sucção-w (b) Sucção-Sr (c) e^*pF -Sr

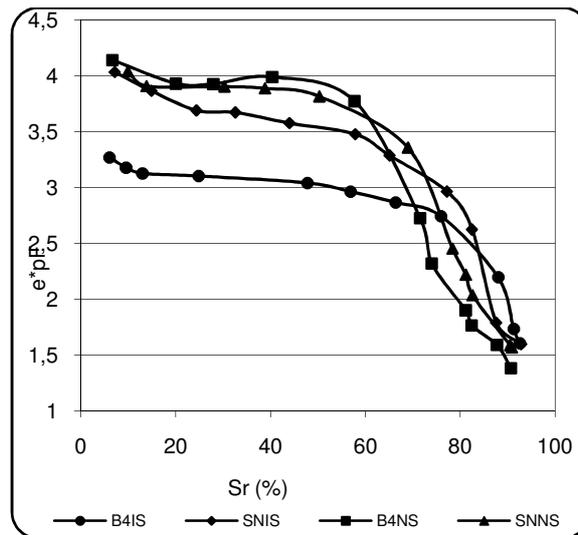
Para os solos conduzidos ao ramo seco (Figura 4.15) observou-se que nas curvas de Sr x Sucção (Figura 4.15 a) existiu uma variação na porosidade dos corpos de prova que foi refletida na curva transformada. Contudo, as variações significativas foram geradas como nos outros casos na macro e meso estrutura, sendo estas maiores para os corpos compactados na energia intermediária.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.15 Curvas características no ramo seco (a) Sucção-w (b) Sucção-Sr (c) $e^* \rho F - S_r$

Nas curvas características transformadas (Figura 4.13 até Figura 4.15) nota-se que a sucção do solo com tratamento em meio B4 teve uma tendência a diminuir em relação ao solo natural. Observa-se, portanto, que há uma mudança no comportamento do solo quanto à distribuição dos poros.

Finalmente, como comentário geral, pode-se considerar que a semelhança nas curvas características em função da umidade e a distinção entre elas quando da análise levando-se em conta a porosidade (S_r e “ e ”), se deve à alteração na porosidade e distribuição de poros em consequência da adição do meio B4. Logo, a adição do meio B4 proporciona mudanças nas propriedades de retenção de água das amostras.

4.1.4.2 COMPRESSÃO SIMPLES

Foram determinadas as resistências à compressão simples do solo com e sem tratamento com o meio B4, o qual foi compactado na condição ótima das energias equivalentes ao Proctor normal e intermediário. Em seguida, dois grupos de cinco corpos foram conduzidos a umidades inferior e superior a ótima respectivamente, para que fossem submetidos à cura. A Figura 4.16 ilustra as curvas tensão deformação obtidas nos ensaios de compressão simples. Salienta-se que os números no lado do nome das amostras representam o número do corpo de prova correspondente ao tipo de solo.

Comparando a resistência dos corpos de prova de solo natural com aqueles que tinham sido tratados com B4 (Figura 4.16), observa-se que a ruptura ocorre em esforços muito

semelhantes, mas destaca-se que a deformação com o meio B4 foi maior, aproximadamente 25% para a energia intermediária e 15% para energia normal. No entanto, dadas as variações de umidade e índice de vazios de corpo de prova para corpo de prova, o melhor é analisar os resultados em função destes índices como se fará a seguir. As curvas de resistência a compressão simples das demais amostras estão apresentadas no Anexo E.

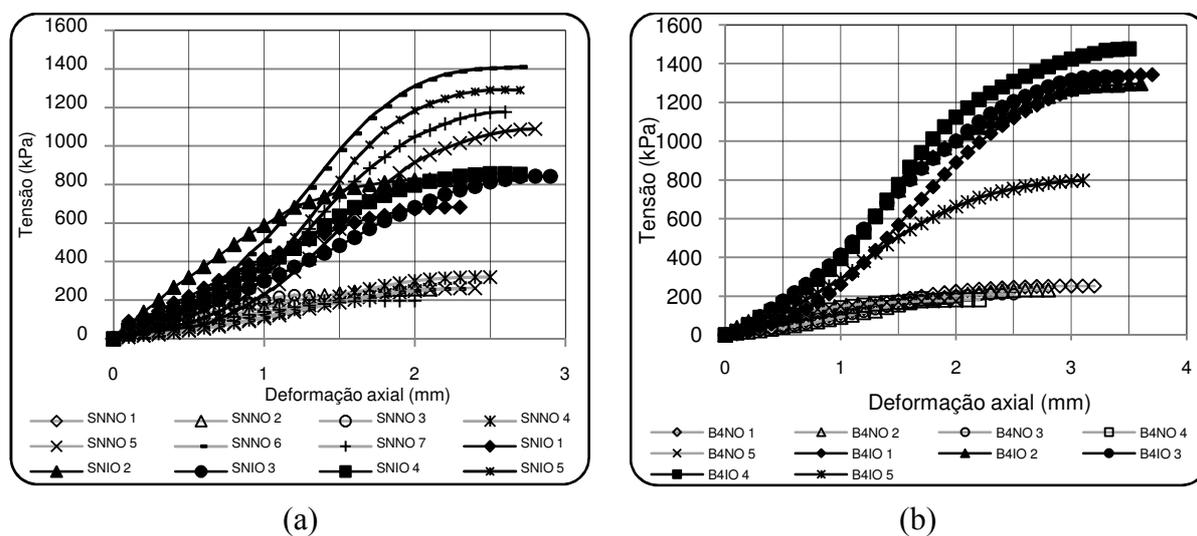


Figura 4.16 Resistência à compressão simples (a) SNO. (b) B4O

A Figura 4.17 apresenta a resistência à compressão simples na ruptura (σ_r) em função da umidade dos corpos de prova. Nela é visto que há uma perfeita harmonia com a forma das curvas características mostradas nas Figura 4.13 (a), Figura 4.14 (a) e Figura 4.15 (a), ou seja, entre as umidades que vão de 18% a 24%, ocorre tanto na resistência como na sucção uma significativa redução com o aumento da umidade, passando a apresentar a seguir, apenas pequenas variações da resistência quando a umidade continua a aumentar. Nas curvas características essa umidade a partir da qual o comportamento passa a ser pouco afetado, corresponde de modo aproximado ao término da entrada de ar nos macroporos, conforme conceituado por Camapum de Carvalho e Leroueil (2004). Em relação à curva de compactação, nota-se que a resistência diminui rapidamente quando a umidade aumenta até valores próximos da umidade ótima. A partir dessa umidade os valores de resistência passam a diminuir pouco. Isso indica que uma variação na umidade para o ramo seco pode gerar grandes mudanças na resistência, mas se essas se apresentam no ramo úmido, a variação na resistência não é tão relevante.

Observa-se ainda a tendência aos valores de resistência obtidos sem tratamento a serem ligeiramente superiores aos obtidos com a adição do meio B4. Esse comportamento é

compatível com os resultados de plasticidade, pois a resistência à compressão simples reflete a coesão do solo e esta está diretamente associada às características plásticas do solo, o que não significa em princípio, estar diante de um material pior para uso em pavimentação.

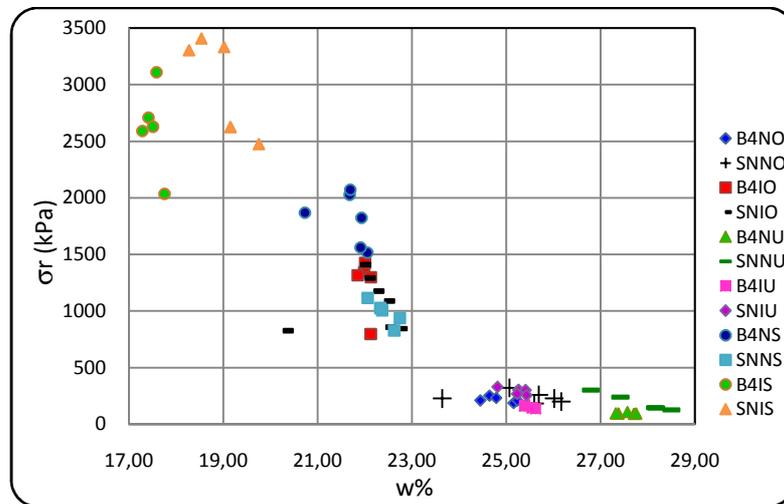


Figura 4.17 Relação $\sigma_r - w\%$

Observa-se ainda que os resultados de resistência do solo com o tratamento B4 tendem a apresentar maior dispersão que para o solo natural (Figura 4.18). Isso pode ser causado pela heterogeneidade da ação do processo biológico produzido dentro de cada corpo de prova tratado. Mesmo assim, o comportamento do solo com respeito à umidade, com ou sem tratamento, apresenta tendência similar.

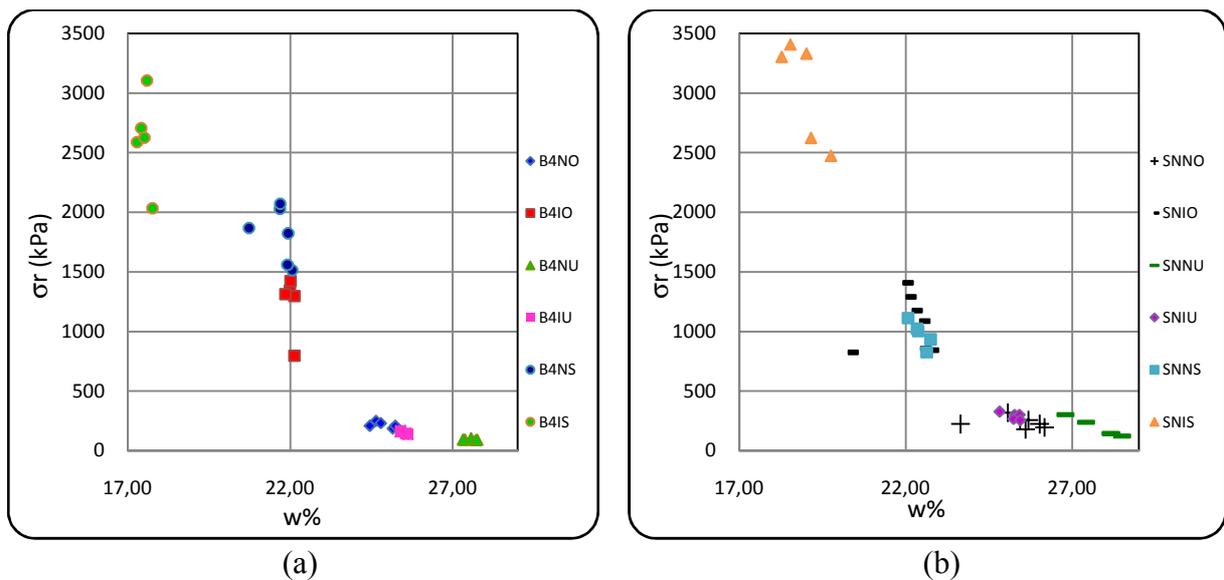


Figura 4.18 Relação $\sigma_r - w\%$ (a) B4. (b) SN.