

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

**AVALIAÇÃO GEOTÉCNICA DE UM PERFIL DE SOLO
TRATADO BIOTECNOLOGICAMENTE PARA FINS DE
PAVIMENTAÇÃO**

CLAUDIA MARICELA GÓMEZ MUÑETÓN

ORIENTADOR: JOSÉ CAMAPUM DE CARVALHO, Dr
COORIENTADORA: YAMILE VALENCIA GONZÁLEZ, DSc

TESE DE DOUTORADO EM GEOTECNIA

PUBLICAÇÃO: G.TD-083A/2013

BRASÍLIA / DF: ABRIL/ 2013

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

**AVALIAÇÃO GEOTÉCNICA DE UM PERFIL DE SOLO
TRATADO BIOTECNOLOGICAMENTE PARA FINS DE
PAVIMENTAÇÃO**

CLAUDIA MARICELA GÓMEZ MUÑETÓN

TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR.

APROVADA POR:

JOSÉ CAMAPUM DE CARVALHO, Dr. (UnB)
(ORIENTADOR)

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

ÂNGELA PATRICIA SANTANA, D.Sc. (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)

LIEDI LEGI BARIANI BERNUCCI, D.Sc. (USP)
(EXAMINADOR EXTERNO)

FERNANDO ARARIPE GONÇALVES TORRES, Ph.D. (UnB)
(EXAMINADOR EXTERNO)

BRASÍLIA/DF, 23 de Abril de 2013.

FICHA CATALOGRÁFICA

GÓMEZ MUÑETÓN, CLAUDIA MARICELA

Avaliação Geotécnica De Um Perfil De Solo Tratado Biotecnologicamente Para Fins De Pavimentação (2013)

xxii, 163 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Doutora, Geotecnia, 2013)

Tese de doutorado - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental

1. Pavimentação

2. Biomineralização

3. Solos tropicais

4. Carbonato de cálcio

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

GÓMEZ-MUÑETÓN, C.M. (2013). Avaliação Geotécnica De Um Perfil De Solo Tratado Biotecnologicamente Para Fins De Pavimentação. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-083A/13, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 161 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Claudia Maricela Gómez Muñetón

TÍTULO DA TESE DE DOUTORADO: Avaliação Geotécnica De Um Perfil De Solo Tratado Biotecnologicamente Para Fins De Pavimentação.

GRAU / ANO: Doutora / 2013

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

Claudia Maricela Gómez Muñetón

clamago25@gmail.com

Medellín / Colômbia

“No existe una manera fácil. No importa cuan talentoso seas, tu talento te va a fallar si no lo desarrollas. Si no estudias, si no trabajas duro, si no te dedicas a ser mejor cada día”

Will Smith

DEDICATÓRIA

*A minha família, meus pais
Luis Eduardo e Luz Marina,
minhas irmãs Catalina, Erika
e Eliza, pelo grande apoio e
a companhia que me
ofereceram para conseguir
mais uma conquista.*

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar a Deus por me manter sempre firme para não desistir na procura dos meus objetivos e metas.

A meus pais Marina e Eduardo, e a minhas irmãs Catalina, Erika e Eliza que sempre torceram por meu sucesso e me deram um grande apoio, compreensão e confiança para não renunciar durante os momentos difíceis durante este tempo todo. Também a todos meus tios e tias, primos e primas.

A César, Regina e Paola, meus grandes amigos e irmãos por torcer sempre por mim, pelo apoio, ajuda e preocupação que tiveram para eu 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.

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

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

Ao CNPq pelo apoio econômico e financeiro.

Um especial agradecimento a Yamile Valencia pela presença como coorientadora e grande ajuda durante todo o transcurso do meu doutorado.

Igualmente, agradeço a Nararubia e ao laboratório de microbiologia dos alimentos da FAV, aos laboratórios de DRX, Engenharia mecânica, Engenharia rodoviária e ao laboratório de MEV da Universidade Nacional de Colômbia em Medellín pela ajuda na realização dos ensaios.

Também devo agradecer a amigos e amigas Jimmy, Jorge Cormane e Claudia, Alejandra e Iván, Dianis e Janier, Liliana e Chuchin, Ivonne e Jaime, Esteban e Cata, Jana e Marcus, Lisandra, Andrelisa, Edgar e Juan, Ana Cevelyn e Maria Cristina que estiveram sempre me acompanhando e me dando carinho, alegria e apoio nos momentos mais difíceis durante estes

anos em Brasília.

Aos professores Ângela Patrícia e Fernando Araripe pelos grandes aportes que fizeram para melhorar meu trabalho. A Marcia Mascarenha pelo apoio e pela ajuda corrigindo o português desta tese.

A meus grandes amigos da Colômbia, em especial Paola e Eliced que sempre me apoiam para alcançar minhas metas.

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 doutorado. E a todos aqueles que não sendo citados contribuíram de alguma forma para a finalização desta etapa.

MUITO OBRIGADA! – MUCHAS GRACIAS!

AVALIAÇÃO GEOTÉCNICA DE UM PERFIL DE SOLO TRATADO BIOTECNOLOGICAMENTE PARA FINS DE PAVIMENTAÇÃO

RESUMO

Atualmente os avanços na indústria e o crescimento populacional exigem uma infraestrutura de maior qualidade que se ajuste às exigências técnicas, econômicas e ambientais vigentes. Nesse sentido é de vital importância o desenvolvimento de materiais de melhor qualidade em obras de infraestrutura rodoviária, devido à deficiente disponibilidade de materiais que atendam os requisitos mencionados anteriormente. A biotecnologia constitui-se em uma nova área de estudo que oferece alternativas que podem ser ambientalmente sustentáveis com resultados promissores na área da engenharia. Em geotecnia são relativamente poucos os estudos no âmbito do uso da biotecnologia, em especial na área de pavimentação, com fins de melhorar as propriedades mecânicas dos solos, a partir da utilização dos micro-organismos endógenos dos mesmos. Esta tese apresenta o estudo da variação das propriedades físicas e mecânicas de um perfil de solo laterítico proveniente do Campo Experimental de Fundações e Ensaios de Campo do Programa de Pós-graduação da Universidade de Brasília (UnB), mediante o uso de processos biotecnológicos baseados na indução da precipitação de carbonato de cálcio (CaCO_3), para tal fim foram empregados dois tipos de agentes indutores, o primeiro denominado meio nutritivo B4 e o segundo foi um meio usando enzima urease proveniente do feijão de porco (*Canavalia Ensiformis*). Os estudos preliminares indicaram ser o meio B4 o mais apropriado para o tratamento sendo ele adotado na continuidade dos estudos. Para o desenvolvimento da pesquisa utilizou-se o solo natural e tratado compactado na energia Próctor intermediária em duas condições de umidade, ótima e ótima menos 3%. Utilizou-se na pesquisa dois tipos de cura: em laboratório e com os corpos de prova enterrados no campo. Os ensaios foram realizados sob condições de trabalho similares nos dois tipos de cura utilizados, 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 para as condições de tratamento utilizadas. A viabilidade de uso do meio nutritivo B4 como indutor de precipitação de CaCO_3 , e, portanto, como agente estabilizador do solo, está sendo analisada para outras condições de tratamento antes de se formar uma opinião mais concreta sobre a sua ineficiência para fins de melhorias de solos para uso em estruturas de pavimento.

EVALUATION OF A GEOTECHNICAL SOIL PROFILE TREATY BIOTECHNOLOGICALLY FOR PURPOSES OF PAVING

ABSTRACT

Currently the advances in industry and population growth require an infrastructure of higher quality that fits the technical requirements, economic and environmental regulations. In this sense it is vitally important to develop better quality materials in infrastructure road due to poor availability of materials that meet the requirements mentioned above. Biotechnology is in a new area of study that offers alternatives that can be environmentally sustainable with promising results in the area of engineering. In geotechnical engineering there are relatively few studies on the use of biotechnology, especially in paving, for the purpose of improving the mechanical properties of soils, from the use of endogenous microorganisms thereof. This thesis presents a study of the variation of physical and mechanical properties of a lateritic soil profile from the Experimental Foundations and Field Trials Program Graduate of the University of Brasilia (UnB), through the use of biotechnological processes based on inducing precipitation of calcium carbonate (CaCO_3), were employed for this purpose two kinds of inducing agents, the first named B4 nutrient medium and the second was the medium using urease enzyme derived from jack bean (*Canavalia ensiformis*). The preliminary studies indicated that the B4 is the most appropriate for the treatment, so that it was adopted in final studies of this thesis. To develop the research used the natural and treated soil compacted with intermediary proctor energy in two moisture conditions, optimal and optimal minus 3%. It was used in the survey two kinds of curing: laboratory and buried specimens. The tests were performed under similar working conditions for both types of cure used to determine the variations in the properties of the soil due to treatment. Just the tensile strength exhibited remarkable improvements in the mechanical behavior of the soil with the addition of the nutrient medium. In the case of simple compression tests and CBR there was no gain for the treatment conditions used. The feasibility of using B4 nutrient medium to induce the precipitation of CaCO_3 , and, therefore, as soil stabilizing agent is being analysed for other conditions of treatment before forming a more specific opinion about its inefficiency for the purpose of improvement soil for use in pavement structures.

EVALUACIÓN GEOTÉCNICA DE UN PERFIL DE SUELO TRATADO BIOTECNOLOGICAMENTE CON FINES DE PAVIMENTACIÓN

RESUMEN

Actualmente los avances industriales y el crecimiento poblacional exigen una infraestructura con más calidad, que se ajuste a las exigencias técnicas, económicas y ambientales vigentes. En ese sentido es de vital importancia el desarrollo de materiales de mejor desempeño en obras de infraestructura vial, debido a la deficiente disponibilidad de materiales que atiendan los requisitos mencionados anteriormente. La biotecnología se constituye como una nueva área de estudio que ofrece alternativas que pueden ser ambientalmente sustentables con resultados alentadores en la ingeniería. En geotecnia son relativamente pocos los estudios en el ámbito del uso de la biotecnología, especialmente en pavimentación, con fines de mejorar las propiedades mecánicas de los suelos, a partir del uso de los micro-organismos endógenos de los mismos. Esta tesis presenta el estudio de la variación de las propiedades físicas y mecánicas de un perfil de suelo laterítico proveniente del Campo Experimental de Fundaciones y Ensayos del programa de Post-grado de la Universidad de Brasilia (UnB), mediante el uso de procesos biotecnológicos basados en la inducción de la precipitación de carbonato de calcio (CaCO_3). Para tal fin se emplearon dos tipos de agentes inductores, el primero denominado medio B4 y el segundo fue un medio usando la enzima ureasa proveniente del fríjol *Canavalia Ensiformis*. Los estudios preliminares indicaron que el medio B4 es más apropiado para el tratamiento, por eso fue adoptado para los estudios finales de la investigación. Para el desarrollo de la investigación el suelo con y sin tratamiento, compactado con la energía Próctor Intermediaria en dos condiciones de humedad de compactación, óptima y óptima menos 3%. Se utilizó dos tipos de cura: en laboratorio y enterrando los especímenes de prueba en campo. Los resultados revelaron que con el tratamiento hubo una mejoría considerable apenas en la resistencia a la tracción. En los ensayos de compresión simple y de mini-CBR no hubo una ganancia de resistencia en las condiciones de ensayo utilizadas. La viabilidad del uso del medio B4 como inductor de precipitación de CaCO_3 , y por lo tanto, como agente estabilizador del suelo, esta siendo analizada para otras condiciones de tratamiento antes de formar una opinión más concreta sobre su ineficacia con fines de mejoría del suelo para su uso en estructuras de pavimento.

ÍNDICE

1.	CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO	1
1.1	RELEVÂNCIA DA PESQUISA	2
1.2	OBJETIVOS	2
1.2.1	GERAL	2
1.2.2	ESPECÍFICOS	2
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO	3
2.	CAPÍTULO 2 EMBASAMENTO TEÓRICO	5
2.1	SOLO	5
2.1.1	SOLO LATERÍTICO	5
2.1.2	MICROBIOLOGIA DO SOLO	10
2.2	BIOMINERALIZAÇÃO	16
2.3	CARBONATOGÊNESE	19
2.4	BIOMINERALIZAÇÃO NA ENGENHARIA CIVIL	24
2.5	BIOMINERALIZAÇÃO PARA FINS DE PAVIMENTAÇÃO RODOVIÁRIA	28
3.	CAPÍTULO 3 MATERIAIS	32
3.1	SOLO	32
3.2	AGENTES PRECIPITADORES	35
3.2.1	MEIO NUTRITIVO B4	35
3.2.2	MEIOS CONTENDO FELIÃO DE PORCO (<i>CANAVALIA ENSIFORMES</i>) E UREIA	36
4.	CAPÍTULO 4 METODOLOGIA	37
4.1	CARACTERIZAÇÃO MICROBIOLÓGICA DO PERFIL DE SOLO	37
4.2	DETERMINAÇÃO DA BIOPRECIPITAÇÃO IN VITRO DE CaCO_3	42
4.3	MICROSCOPIA PARA DETERMINAR CARBONATOS	43
4.4	PROVAS DE CARBONATO DE CÁLCIO COM HCL	44
4.5	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO PERFIL	45
4.5.1	DETERMINAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE NATURAL DE CADA CAMADA	45
4.5.2	MASSA ESPECÍFICA DOS GRÃOS DE SOLO (Gs)	45
4.5.3	LIMITES DE CONSISTÊNCIA	45
4.5.4	CARACTERIZAÇÃO MINIATURA COMPACTADA TROPICAL (MCT) EXPEDITA	46
4.6	CARACTERIZAÇÃO COMPLEMENTAR DAS CAMADAS ESTUDADAS ANTES DE FABRICAR OS CORPOS DE PROVA	47
4.6.1	ANÁLISE GRANULOMÉTRICA POR SEDIMENTAÇÃO	48
4.6.2	ENSAIO DE MINICOMPACTAÇÃO	48
4.6.3	ENSAIO PRELIMINAR DE COMPRESSÃO SIMPLES	48
4.6.4	ANÁLISE MINERALÓGICA POR DIFRAÇÃO DE RAIOS-X	49
4.6.5	DETERMINAÇÃO DO PH	50
4.7	DETERMINAÇÃO DO POTENCIAL AGREGADOR DO NUTRIENTE B4	50
4.8	CARACTERIZAÇÃO ESTRUTURAL PRELIMINAR	51
4.9	CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DO SOLO COMPACTADO COM E SEM ADIÇÃO DO MEIO B4	52
4.9.1	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES	54
4.9.2	ENSAIOS DE MINI CBR	54
4.9.3	DETERMINAÇÃO DA CURVA CARACTERÍSTICA DE RETENÇÃO DE ÁGUA	54
4.9.4	ENSAIOS DE COMPRESSÃO DIAMETRAL	55
4.10	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO SOLO COMPACTADO COM E SEM ADIÇÃO DO MEIO B4	55
4.11	DETERMINAÇÃO DO PH APÓS O TRATAMENTO	57
4.12	CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA APÓS O TRATAMENTO	57
4.13	MICROSCOPIA ELECTRONICA DE VARREDURA	57

5.	<u>CAPÍTULO 5 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS</u>	59
5.1	CARACTERIZAÇÃO MICROBIOLÓGICA DO PERFIL DE SOLO	59
5.1.1	PRECIPITAÇÃO <i>IN VITRO</i> COM NUTRIENTE B4	62
5.1.2	PRECIPITAÇÃO <i>IN VITRO</i> COM FEIJÃO DE PORCO	64
5.1.3	MICROSCOPIA PARA DETERMINAR CARBONATOS	66
5.1.4	TESTES DE PRESENÇA DE CARBONATO DE CÁLCIO POR MEIO DE REAÇÃO COM HCL	67
5.2	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO PERFIL DE SOLO	68
5.3	CARACTERIZAÇÃO PRELIMINAR DAS CAMADAS DE SOLO ESTUDADAS	71
5.3.1	DETERMINAÇÃO DO PH	71
5.3.2	ENSAIOS DE GRANULOMETRIA E AGREGAÇÃO COM B4	72
5.3.3	ENSAIOS DE COMPACTAÇÃO	74
5.3.4	ENSAIOS DE MINI-CBR SOBRE O SOLO NATURAL E COM ADIÇÃO DO MEIO B4	76
5.3.5	CARACTERIZAÇÃO ESTRUTURAL DOS CORPOS DE PROVA PROVENIENTES DAS CURVAS DE COMPACTAÇÃO	79
5.3.6	CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA DAS TRÊS CAMADAS DE SOLO	80
5.4	CARACTERIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DAS CAMADAS ESTUDADAS COMPACTADAS NO RAMO SECO	81
5.4.1	CURVA CARACTERÍSTICA DE RETENÇÃO DE ÁGUA	82
5.4.2	COMPRESSÃO DIAMETRAL (\square_T)	86
5.4.3	RESISTENCIA À COMPRESSÃO UNIAXIAL (\square_{usc})	94
5.4.4	MINI-CBR	101
5.5	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA APÓS O TRATAMENTO DAS CAMADAS COMPACTADAS NO RAMO SECO	103
5.5.1	LIMITES DE ATTERBERG	103
5.5.2	ANÁLISES GRANULOMÉTRICAS APÓS O TRATAMENTO	106
5.6	CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA DO SOLO APÓS COMPACTAÇÃO NO RAMO SECO	109
5.7	DETERMINAÇÃO DO PH DEPOIS DE 90 DIAS DE CURA	112
5.8	CARACTERIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DAS CAMADAS DE SOLO COMPACTADAS NA UMIDADE ÓTIMA	112
5.8.1	CURVA CARACTERÍSTICA E DE RETENÇÃO DE ÁGUA	113
5.8.2	COMPRESSÃO DIAMETRAL (\square_T)	118
5.8.3	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO UNIAXIAL (\square_{usc})	125
5.8.4	MINI-CBR	131
5.9	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA APÓS O TRATAMENTO EM AMOSTRAS COMPACTADAS NA UMIDADE ÓTIMA	134
5.9.1	LIMITES DE ATTERBERG	134
5.9.2	ANÁLISES GRANULOMÉTRICAS APÓS O TRATAMENTO	136
5.10	CARACTERIZAÇÃO MINERALOGICA DO SOLO APÓS COMPACTAÇÃO NA UMIDADE ÓTIMA	138
5.11	DETERMINAÇÃO DO PH DO SOLO COMPACTADO NA UMIDADE ÓTIMA APÓS 70 DIAS DE TRATAMENTO	140
5.12	ENSAIOS DE COMPRESSÃO UNIAXIAL ADICIONAIS	141
5.13	MICROSCOPIA ELECTRONICA DE VARREDURA (MEV)	143
6.	<u>CONSIDERAÇÕES FINAIS</u>	146
6.1	CONCLUSÕES	146
6.2	SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	149
7.	<u>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u>	150
A.	<u>ANEXO A RESULTADOS TESTES CARACTERIZAÇÃO MICROBIOLÓGICA</u>	156
B.	<u>ANEXO B CURVAS GRANULOMÉTRICAS</u>	161

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Ocorrência de solos lateríticos no Brasil (Villibor <i>et al.</i> , 2009).....	8
Figura 2.2 Efeito da temperatura no crescimento bacteriano (Hogg, 2005)	13
Figura 2.3 Trajetórias de crescimento de bactérias (Hogg, 2005)	14
Figura 2.4 Efeito do pH no crescimento bacteriano (Modificado de Hogg, 2005).....	14
Figura 2.5 Curva de crescimento bacteriano (Modificado de Hogg, 2005).....	15
Figura 2.6 Arranjo espacial entre partículas e micro-organismos do solo	16
Figura 2.7 Processo de formação de calcita (a) Etapa inicial formação de um material com aparência gelatinosa (b) ampliação da fig. “a” partículas nanométricas de 100 nm de diâmetro (c) início de formação de partículas de calcita bem formadas (d) Calcita bem estruturada (Sondi & Matijevic, 2001).	22
Figura 2.8 (a) Íons de Ca são atraídos até a parede da bactéria (b) Início de precipitação de CaCO ₃ heterogêneo na parede da bactéria (c) Morte celular (d) CaCO ₃ cristalizado com marca de bactérias mortas (Muynk, 2012).....	22
Figura 2.9 Formação de calcita (a) Início de cristalização de partículas (b) Partículas cristalizadas (c) Cristais de vaterita (d) cristais de calcita (Sondi & Matijevic, 2001)	23
Figura 2.10 Modelo ilustrativo dos fatores que influenciam as bactérias do solo (Modificado de Halverson, 2005)	24
Figura 2.11 Biofilme em um solo não saturado (Modificado de Halverson, 2005).....	25
Figura 2.12 Esquemática do princípio de formação de <i>Biogrowth</i> e <i>Biosealing</i> (Modificado de Meurs <i>et al.</i> , 2006).....	30
Figura 3.1 Localização do local de amostragem	33
Figura 3.2 Coleta de solo (a) com trado (b) trincheira	35
Figura 4.1 Esquema de diluição do solo (modificado de Valencia, 2009).....	38
Figura 4.2 Incubação de bactérias isoladas na placa de petri com meio indutor de precipitação B4.....	42
Figura 4.3 Descrição dos testes de precipitação contendo feijão de porco.	43
Figura 4.4 Carta de classificação da metodologia MCT expedita.....	47
Figura 4.5 Fluxograma dos ensaios de compressão simples.....	49
Figura 4.6 Tipos de cura (a) Enterrado (b) Câmara úmida	53
Figura 4.7 Montagem do ensaio de sucção	55
Figura 4.8 Pentapicnômetro	56
Figura 4.9 Granulômetro a laser.....	57
Figura 5.1 Isolados bacterianos	59
Figura 5.2 Testes bioquímicos realizados sobre as amostras oriundas das camadas do perfil de solo (a) Coloração de GRAM (b) Prova de O/F (c) Teste de ureia (d) Outros Testes	60
Figura 5.3 Precipitados com 3 e 15 dias de incubação em meio B4	63
Figura 5.4 Bactérias incubadas em meios com feijão de porco e ureia	64
Figura 5.5 Crescimento bacteriano in vitro (a) Bactéria C44 incubada em B4 (b) Bactéria C44 incubada em meio com ureia e feijão de porco	65
Figura 5.6 Microscopias petrográficas em meio nutritivo B4 (4 aumentos).....	66
Figura 5.7 Microscopias petrográficas em meio com ureia e feijão de porco (4 aumentos)	67
Figura 5.8 Provas de carbonatos com HCl em meio B4	68
Figura 5.9 Caracterização física do perfil de solo.	70

Figura 5.10 Umidade natural do perfil de solo no Campo Experimental	71
Figura 5.11 Análises de agregação da camada de 1,0 m (Valencia, 2010).....	72
Figura 5.12 Análises de agregação (a) camada de 3,0 m; (b) camada 6,0 m.....	73
Figura 5.13 Ensaio de minicompactação com e sem nutriente B4 (a) 1,0 m (b) 3,0 m (c) 6,0 m	74
Figura 5.14 Mini-CBR nos pontos da curva de compactação (a) 1,0 m (b) 3,0 m (c) 6,0 m.....	77
Figura 5.15 Curvas de retenção: (a) 1,0 m; (b) 3,0 m; (c) 6,0 m.....	78
Figura 5.16 Mini-CBR vS. sucção com e sem influência do índice de vazios (a) 1,0 m (b) 3,0 m (c) 6,0 m.....	79
Figura 5.17 Caracterização estrutural para as três camadas aumentos de 200X (a) 1,0 m (b)3,0 m (c) 6,0 m.....	80
Figura 5.18 Difratograma de Raios X de todas as camadas.....	81
Figura 5.19 Curvas características e de retenção de água (a) 1,0 m (b) 3,0 m (c) 6,0 m	83
Figura 5.20 Sucção em função da saturação (a) 1,0 m (b) 3,0 m (c) 6,0 m.....	84
Figura 5.21 Curvas características transformadas com relação a índice de vazios “e” (a) 1,0 m (b) 3,0 m (c) 6,0 m.....	85
Figura 5.22 Curvas características transformadas com relação aos índices de vazios.....	86
Figura 5.23 Relação $w\%$ - σ_r (a) 1,0 m (b) 3,0 m (c) 6,0 m	87
Figura 5.24 Relação $S_r\%$ - σ_t (a) 1,0 m (b) 3,0 m (c) 6,0 m	88
Figura 5.25. Relações “e - σ_t ” e “ $e_{(inter)} - \sigma_t$ ” (a) 1,0 m (b) 3,0 m (c) 6,0 m.....	89
Figura 5.26 Evolução da resistência à compressão diametral com o tempo de cura (a) 1,0 m (b) 3,0 m (c) 6,0 m.....	90
Figura 5.27 Relação pF/e – Idade de cura - σ_t (a) 1,0 m (b) 3,0 m (6,0 m)	91
Figura 5.28 Relação $w\%$ - σ_t nas diferentes idades (a) 1,0 m (b) 3,0 m (c) 6,0 m	92
Figura 5.29 Relação $w(\%)$ - Idade de cura - σ_t (a) 1,0 m (b) 3,0 m (6,0 m)	93
Figura 5.30 Ruptura típica dos corpos de prova em compressão diametral.....	94
Figura 5.31 Relação $w\%$ - σ_{USC} (a) 1,0 m (b) 3,0 m (c) 6,0 m	95
Figura 5.32 Correlação $w(\%)$ - Idade de cura - σ_t (a) 1,0 m (b) 3,0 m (6,0 m).....	96
Figura 5.33 Relação sucção - σ_{USC} (a) 1,0 m (b) 3,0 m (c) 6,0 m.....	97
Figura 5.34 Relações “ $pF/e - \sigma_{USC}$ ” e “ $pF/e_{(inter)} - \sigma_r$ ” (a) 1,0 m (b) 3,0 m (c) 6,0 m.....	98
Figura 5.35 Evolução da resistência à compressão simples (a) 1,0 m (b) 3,0 m (c) 6,0 m.....	99
Figura 5.36 Correlação pF/e –Idade - σ_{USC} (a) 1,0 m (b) 3,0 m (c) 6,0 m	100
Figura 5.37 Ruptura típica dos corpos de prova em compressão simples.....	101
Figura 5.38 Relação “ $w\%$ - Mini-CBR” (a) 1,0 m (b) 3,0 m (c) 6,0 m	101
Figura 5.39 Relações “ $pF/e - \text{Mini-CBR}$ ” e “ $pF/e_{(inter)} - \text{Mini-CBR}$ ” (a) 1,0 m (b) 3,0 m....	102
Figura 5.40 Limites de Atterberg em função da profundidade (a) w_L (b) w_P (c) IP.....	104
Figura 5.41 Influência do carbonato de cálcio nos limites de Atterberg de um solo tipo Marne.....	105
Figura 5.42 Difratogramas de raios-X (DRX) (a) 1,0 m (b) 3,0 m (c) 6,0 m.....	111
Figura 5.43 Curvas características e de retenção de água nos CPs compactados na umidade ótima (a) 1,0 m (b) 3,0 m (c) 6,0 m.....	114
Figura 5.44 Sucção em função da saturação (a) 1,0 m (b) 3,0 m (c) 6,0 m	115
Figura 5.45 Curvas características transformadas com relação ao índice de vazios “e”	116
Figura 5.46 Curvas características transformadas em relação ao índice de vazios.....	117
Figura 5.47 Relação $w\%$ - σ_t (a) 1,0 m (b) 3,0 m (c) 6,0 m.....	118
Figura 5.48 Relação $S_r\%$ - σ_t (a) 1,0 m (b) 3,0 m (c) 6,0 m.....	120
Figura 5.49 Relações “e - σ_t ” e “ $e_{(interagado)}$ ” (a) 1,0 m (b) 3,0 m (c) 6,0 m	121
Figura 5.50 Evolução da resistência a compressão diametral	122

Figura 5.51 Correlação pF/e –Idade - σ_t (a) 1,0 m (b) 3,0 m (c) 6,0 m.....	123
Figura 5.52 Relação w% - σ_t nas diferentes idades (a) 1,0 m (b) 3,0 m (c) 6,0 m	124
Figura 5.53 Correlação w (%) –Idade - σ_t (a) 1,0 m (b) 3,0 m (c) 6,0 m.....	125
Figura 5.54 Relação w% - σ_{USC} nas diferentes idades de cura (a) 1,0 m (b) 3,0 m (c) 6,0 m.....	126
Figura 5.55 Relação w (%) –Idade - σ_t (a) 1,0 m (b) 3,0 m (c) 6,0 m	127
Figura 5.56 Relação sucção - σ_{USC} (a) 1,0 m (b) 3,0 m (c) 6,0 m	128
Figura 5.57 Relações “pF/e - σ_{USC} ” e “pF/e _(interagregado) - σ_{USC} ” (a) 1,0 m (b) 3,0 m (c) 6,0 m.....	129
Figura 5.58 Evolução da resistência à compressão simples (a) 1,0 m (b) 3,0 m (c) 6,0 m....	130
Figura 5.59 Correlação pF/e –Idade - σ_t (a) 1,0 m (b) 3,0 m (c) 6,0 m.....	131
Figura 5.60 Relação w% - Mini-CBR (a) 1,0 m (b) 3,0 m (c) 6,0 m.....	132
Figura 5.61 Relações “pF/e - Mini-CBR” e “pF/e _(interagregado) - Mini-CBR” (a) 1,0 m (b) 3,0 m (c) 6,0 m	133
Figura 5.62 Limites de Atterberg segundo a profundidade (a) W_L (b) W_P (c) IP.....	135
Figura 5.63 DRX das amostras compactadas na umidade ótima (a) 1,0 m (b) 3,0 m (c) 6,0 m.....	139
Figura 5.64 Relação σ_{usc} - w% (a) 1,0 m (b) 3,0 m	141
Figura 5.65 Relação sucção - σ_{USC} (a) 1,0 m (b) 3,0 m	142
Figura 5.66 Relação pF/e _(inter) - σ_{USC} (a) 1,0 m (b) 3,0 m.....	143
Figura B.1 Curvas granulométricas para ramo seco da camada 1,0 m	162
Figura B.2 Curvas granulométricas para ramo seco da camada 3,0 m	163
Figura B.3 Curvas granulométricas para ramo seco da camada 6,0 m	164
Figura B.4 Curvas granulométricas para umidade ótima da camada 1,0 m.....	165
Figura B.5 Curvas granulométricas para umidade ótima da camada 3,0 m.....	166
Figura B.6 Curvas granulométricas para umidade ótima da camada 6,0 m.....	167

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 Profundidades das amostras coletadas para caracterização do perfil	34
Tabela 4.1 Tipos de amostras usadas durante a pesquisa.....	53
Tabela 5.1 Bactérias identificadas para cada camada do perfil de solo	61
Tabela 5.2 Crescimento das bactérias urease positivas em meio com ureia e feijão de porco	65
Tabela 5.3 Resultados de caracterização física do perfil	69
Tabela 5.4 Resultados de caracterização física do perfil	69
Tabela 5.5 Valores de pH das camadas de solo selecionadas para a pesquisa.....	72
Tabela 5.6 Teores granulométricos no ensaio de agregação com meio B4	73
Tabela 5.7 Pesos específicos máximos e umidades ótimas das 3 camadas sem tratamento	75
Tabela 5.8 Limites de consistência para solos com e sem nutriente na umidade ótima de compactação	76
Tabela 5.9 Minerais presentes em cada camada	81
Tabela 5.10 Resumo dos resultados de limites de Atterberg, Gs e classificação de solos no ramo seco.....	106
Tabela 5.11 Teores das frações granulométricas no solo compactado no ramo seco	107
Tabela 5.12 T.A. das amostras em cada camada.....	109
Tabela 5.13 Valores de pH obtidos no ramo seco.....	112
Tabela 5.14 Resumo de resultados de limites de Atterberg, Gs e classificação de solos na umidade ótima	135
Tabela 5.15 Teores granulométricos no solo compactado na umidade ótima	136
Tabela 5.16 T.A. das amostras em cada camada na umidade ótima	138
Tabela 5.17 Determinações de pH na umidade ótima.....	140
Tabela A.1 Resultados das provas bioquímicas para cada bactéria da camada com 1,0 m de profundidade do perfil de solo do campo experimental da UnB.....	157
Tabela A.2 Resultados das provas bioquímicas para cada bactéria da camada com 2,0 m de profundidade do perfil de solo do campo experimental da UnB	157
Tabela A.3 Resultados das provas bioquímicas para cada bactéria da camada com 3,0 m de profundidade do perfil de solo do campo experimental da UnB	158
Tabela A.4 Resultados das provas bioquímicas para cada bactéria da camada com 4,0 m de profundidade do perfil de solo do campo experimental da UnB	158
Tabela A.5 Resultados das provas bioquímicas para cada bactéria da camada com 5,0 m de profundidade do perfil de solo do campo experimental da UnB	159
Tabela A.6 Resultados das provas bioquímicas para cada bactéria da camada com 6,0 m de profundidade do perfil de solo do campo experimental da UnB	159
Tabela A.7 Resultados das provas de carbonato com HCl nas bactérias de cada camada.....	160

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACÕES

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASSHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ASTM	<i>American Society for Testing Materials</i>
B4	Meio B4
C	Cresceu
CBR	<i>California bearing ratio</i>
CH	Argila de alta compressibilidade
CL	Argila de baixa compressibilidade
CP	Cresceu pouco
CPs	Corpos de prova
Defloc	Defloculante
DIC	Dissolução de cálcio orgânico
DNER-ME	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – Método de Ensaio
DRX	Difratometria de raios X
e	Índice de vazios
$e_{(inter)}$	Índice de vazios interagregado
EPS	Polissacarídeos extracelulares
g	Gramo
g/cm^2	Gramo por centímetro quadrado
g/cm^3	Gramo por centímetro cúbico
Gs	Massa específica dos grãos
H ₂ O	Água

IP	Índice de plasticidade do solo
km ²	Quilometro quadrado
kN/m ³	Kilo Newton por metro cubico
LA'	Solo arenoso laterítico
LAMAL	Laboratório de Microbiologia dos Alimentos
LE	Latosolo vermelho escuro
LG'	Solo argiloso laterítico
LV	Latosolo vermelho amarelo
m	Metro
MCT	Miniatura compactado tropical
MEV	Microscopia electrónica de varredura
MH	Silte de alta compressibilidade
ML	Silte de baixa compressibilidade
ml	Mililitro
mm	Milímetro
mm/min	Milímetro por minuto
N	Natural curado em laboratório
NA	Areia não laterítica
NA'	Misturas de areias quartzosas com finos de comportamento não laterítico
NBR	Norma brasileira
NC	Não cresceu
NE	Natural enterrado
NG'	Solo argiloso não laterítico
NS'	Solo siltoso não laterítico
O/F	Oxidação - Fermentação

OH	Íon hidroxilo
pF	Logaritmo da sucção em centímetros de coluna de água
pH	Potencial hidrogeniônico
Prof.	Profundidade
PVC	Policloreto de vinil
spp.	Espécie
Sr %	Grau de saturação
SUCS	Sistema unificado de classificação de solos
T	Tratado curado em laboratório
T.A.	Teor de agregação
T.A.T.	Teor de agregados totais
TE	Tratado enterrado
UnB	Universidade de Brasília
VM	Vermelho de metila
VP	Voges Proskauer
w	Umidade do solo
w _{nat}	Umidade em campo
w _L	Limite líquido do solo
w _P	Limite plástico do solo
ΔpH	Delta de potencial hidrogeniônico
γ _d	Peso específico aparente
σ _{USC}	Resistência à compressão uniaxial na ruptura
σ _t	Resistência à tração na ruptura
°C	Grau célsius

CAPÍTULO 1

I NTRODUÇÃO

Atualmente os avanços na indústria e o crescimento populacional exigem uma infraestrutura de maior qualidade que atenda os critérios técnicos de funcionalidade, segurança, durabilidade e conforto do usuário, além de gerar um menor impacto ambiental e econômico. Neste sentido, é notória a importância do uso de materiais de melhor qualidade em obras de infraestrutura rodoviária.

O grande problema da exigência técnica nas obras de infraestrutura rodoviária está na deficiente disponibilidade de materiais apropriados em locais de exploração cujo impacto ambiental e custo sejam reduzidos. Para melhorar o desempenho dos materiais existentes nas áreas de construção e, visando torná-los apropriados para uso, é necessário o desenvolvimento de novas tecnologias de melhoramento que permitam a execução de obras sustentáveis tanto do ponto de vista ambiental quanto do econômico.

Durante a história da humanidade o solo tem sido matéria-prima para a maioria das obras civis, por tal motivo são muitos os processos testados para melhorar as propriedades físicas e mecânicas dos solos, tanto para construção de edificações quanto para a construção de vias de transporte dentre outros. Atualmente os estudos objetivam gerar um impacto ambiental menor com custo inferior. Assim, a busca por materiais que atendam às propriedades físicas e mecânicas requeridas pelas normas técnicas e ambientais coloca a estabilização como alternativa capaz de permitir, de diversas maneiras, aumentar a possibilidade de uso de solos locais considerados inicialmente como inapropriados para a execução de obras de infraestrutura.

Dessa forma, é preciso estudar alternativas inovadoras capazes de adaptar os materiais as condições técnicas que cada obra exige. Por isso, o estudo da biotecnologia aplicada na engenharia civil vem sendo ponto de interesse há algumas décadas, pois esta pode permitir grandes benefícios econômicos requerendo, no entanto, estudos ambientais cuidadosos. A biotecnologia hoje, ainda tem poucas aplicações na área de pavimentação devendo ser melhor estudada para este fim.

Atualmente, no Brasil, o Programa de Pós-graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília está desenvolvendo estudos nesta área com o objetivo de melhorar as propriedades físicas e mecânicas de solos finos para aplicações em infraestrutura rodoviária.

1.1 RELEVÂNCIA DA PESQUISA

A biotecnologia pode oferecer soluções ambientalmente sustentáveis e como consequência o emprego eficiente dos recursos naturais e econômicos. Outra vantagem que deve ser explorada por esta técnica faz referência ao uso de solos que mecanicamente não são no estado natural apropriados para compor a estrutura dos pavimentos.

Por causa desses possíveis benefícios surgiu o interesse em avaliar o desempenho da bioestabilização de solos em obras de pavimentação, a qual poderia ser muito vantajosa para desenvolvimento em grande escala no Distrito Federal. O interesse em estudar este tema partiu da experiência no estudo do uso da biotecnologia para fins de mitigação de processos erosivos (Valencia, 2009) e de um estudo inicial realizado para fins de pavimentação rodoviária (Gómez, 2009), cujos resultados se mostraram promissores.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Geral

Avaliar a variação nas propriedades geotécnicas de um solo, proporcionada pela adição de meios indutores da precipitação de Carbonato de Cálcio (CaCO_3), visando à aplicação em pavimentação rodoviária.

1.2.2 Específicos

- ✓ Avaliar em laboratório quais propriedades do solo são mais afetadas pela adição de agentes indutores da precipitação de CaCO_3 .
- ✓ Verificar a influência do índice de vazios sobre a precipitação de carbonato de cálcio.
- ✓ Avaliar a evolução do comportamento mecânico de um perfil de solo laterítico ao longo

do tempo, quando induzida a precipitação de carbonato de cálcio.

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 – Embasamento teórico

Neste capítulo é apresentado o marco teórico, com a finalidade de familiarizar o leitor com o tema e permitir-lhe maior compreensão dos resultados obtidos.

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 ocorrem, assim como as aplicações da técnica na engenharia civil e especificamente na pavimentação rodoviária.

Capítulo 3 – Materiais

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

Capítulo 4 – Metodologia

Apresenta os procedimentos e metodologias que foram utilizados na execução dos ensaios e para a realização de cada uma das etapas 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.

CAPÍTULO 2

EMBASAMENTO TEÓRICO

Para poder entender mais claramente os processos envolvidos na pesquisa, o embasamento teórico foi dividido em tópicos básicos: solo, biomineralização e estudo da biomineralização em rodovias.

2.1 SOLO

O solo é considerado o material de construção de obras geotécnicas por excelência, pois se não se constrói com ele, constrói-se sobre ele. Os solos devem ser classificados segundo o tipo de intemperismo sofrido no processo de formação o qual depende de fatores como tipo de rocha de origem, clima e condições de drenagem (Camapum de Carvalho, 2007).

Dentre todos os tipos de solo conhecidos na geotecnia, a ênfase nesta tese é dirigida aos solos lateríticos, pois, esse é o solo típico de regiões tropicais onde o Distrito Federal está inserido, além de ser material de suma importância na pavimentação rodoviária.

2.1.1 Solo laterítico

O termo laterita surgiu na literatura científica com Buchanan em 1807, que sugeriu tal palavra para definir um tipo de material de cor avermelhada que endurecia irreversivelmente ao ser exposto ao ar. No entanto o termo só foi usado cientificamente por Babington em 1821, posteriormente foram muitos os trabalhos realizados com a finalidade de dar uma descrição mais profunda da laterita durante o século XIX (Narayanaswamy, 1992). Esse mesmo autor afirma que o pioneiro na caracterização química da laterita foi Mallet em 1883, mas quem

descreveu as principais características químicas da mesma. No século XX foram realizados estudos mais profundos com descrições pedológicas e morfológicas desse tipo de material. Em 1981 o termo laterita foi definido por Schellmann como uma acumulação superficial ou subsuperficial de produtos provenientes do intenso intemperismo de rochas, desenvolvidos sob condições favoráveis a uma maior mobilidade dos elementos alcalino-terrosos e sílica, além da imobilização de ferro e alumínio. Mas essa definição foi criticada fortemente por Bourman & Ollier (2002), pois, eles afirmam que esta aberta a interpretações erradas, além de prestar pouca atenção às características morfológicas que dão pistas de sua origem. Dentre outros aspectos indicam que a definição de Schellmann é apropriada estritamente para solos lateríticos formados nos trópicos, esquecendo aqueles que são formados fora deles.

Atualmente o termo não faz referencia só a esse tipo específico de solo, mas sim a uma serie de horizontes que definem um perfil de solo com características de intemperismo desenvolvidas sob certas condições, dentre outras clima, drenagem e rocha de origem.

Os solos lateríticos são aqueles que ocorrem predominantemente entre os trópicos e apresentam propriedades de engenharia particulares, diferentes daquelas características dos solos de regiões temperadas. São solos superficiais, típicos das partes bem drenadas das regiões tropicais úmidas, resultantes de uma transformação da parte superior do subsolo pela atuação do intemperismo, processo de laterização. Este processo gera o enriquecimento relativo ou absoluto do solo em oxi-hidróxidos de ferro (Fe) e/ou alumínio (Al). Outra característica típica desses solos é a predominância da caulinita. Sua cor varia entre vermelha, amarela, marrom e alaranjado (Villibor *et. al.*, 2009), sendo as duas primeiras as mais comuns.

Nogami & villibor (1995) afirmam que outras características típicas desses solos são as camadas de grande espessura, elevada porosidade e permeabilidade, além de apresentarem granulometria que varia desde uma argila até areia argilosa. 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.

Gidigasu (1976) afirma que os solos lateríticos são o resultado do intemperismo e suas características típicas são influenciadas pelo modo de formação da rocha mãe, grau de intemperização e características morfológicas, sendo que as condições topográficas e de drenagem são as que mais influenciam a composição química e mineralógica. Desse modo, quanto mais avançado for o processo de intemperização as propriedades e comportamentos

dos solos tropicais se tornam independentes de sua origem, tema que foi abordado por Cardoso (1995) ao estudar a colapsibilidade de solos do Distrito Federal.

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 que os solos lateríticos sejam o resultado 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.

Em resumo tem-se que algumas das características típicas dos solos lateríticos são:

- ✓ Grau de alteração, que é elevado;
- ✓ Sua gênese;
- ✓ Propriedades químicas e mineralógicas, as quais são fruto de grande alteração;
- ✓ Características estruturais, com presença de cimentações e de micro e macroporos;
- ✓ Umidade / Grau de saturação; os solos lateríticos geralmente se encontram em estado não saturado;

Aproximadamente 75% do território brasileiro apresenta-se recoberto por um manto de solo laterítico. São solos com composição rica em ferro, manganês, alumínio, níquel, nióbio 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). A Figura 2.1 apresenta um esquema da distribuição dos solos lateríticos dentro do território Brasileiro.

Os solos lateríticos são amplamente usados em obras geotécnicas como barragens, aeroportos e estradas. Já especificamente em pavimentação o emprego de argilas lateríticas tem sido a ambição de muitos engenheiros, pois são materiais bastante frequentes e de ótima

trabalhabilidade (Villibor *et. al.*, 1996), porém na maioria dos casos o uso se restringe aos solos arenosos.



Figura 2.1 Ocorrência de solos lateríticos no Brasil (Villibor *et. al.*, 2009)

No Brasil existem solos lateríticos finos *in natura*, os quais muitas vezes não atendem as características apropriadas para seu uso como sub-bases e bases de pavimentos. No entanto, quando misturados com outros materiais como areia, poderão apresentar as características necessárias para atingir um desempenho similar ao de uma areia fina laterítica (Villibor *et. al.*, 2009).

Quando usados em pavimentação alguns solos lateríticos apresentam, no entanto, módulos resilientes elevados, valores de capacidade de suporte (CBR) relativamente altos e baixa expansão, limite de liquidez e índice plástico mais elevados que os exigidos pelas especificações técnicas tradicionais (Santos, 2004). Geralmente os oxi-hidróxidos de ferro e alumínio que proporcionam segundo Cardoso (2002) valores mais elevados de plasticidade, são também responsáveis pelo melhor desempenho dos solos lateríticos em obras rodoviárias.

Embora tradicionalmente os cascalhos lateríticos tenham sido utilizados ao longo do tempo em obras rodoviárias no Brasil como um todo, o aproveitamento dos solos tropicais finos em pavimentação no Brasil iniciou nos anos 50 onde foram verificados valores de CBR muito altos para as variedades de argila e de argila arenosa usadas como reforço do subleito e como sub-base. A partir dos anos 60 o uso desses materiais foi intensificado na construção de

bases de solo cimento, aproveitando o solo proveniente do próprio subleito (Villibor *et. al.*, 2009). Esses autores também 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.

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 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 aparente seco 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 solos 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 ao colapso por inundação. Mas fatores como o grau de cimentação podem fazer com que isso 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 nesses poros, só se completa ao atingir graus de saturação dessa ordem. Quando compactados a tendência é a redução dessa macroporosidade e por consequência elevação desse limite crítico de grau de saturação.

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 Villibor *et. al.*, 2009.

Outra utilização dos solos lateríticos que tem 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).

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.

Villibor *et. al.* (1996) afirmam que há uma série de problemas a superar para poder usar uma argila laterítica como base, dentre outros, uma argila compactada geralmente possui CBR suficientemente elevado quando a energia de compactação é a intermediária ou maior, para isso devem-se manter as condições de umidade ótima, no entanto, esse aspecto representa uma dificuldade, pois sempre há uma tendência do solo perder umidade nos períodos de seca. Essa perda conduz a um acréscimo considerável da capacidade de suporte, que vem acompanhada de um trincamento intenso e, como consequência a redução imprevisível da capacidade de suporte da camada. Além disso, o trincamento pode-se refletir no revestimento betuminoso e, conseqüentemente gerando a destruição acelerada do pavimento.

Essas análises e previsões de comportamento, no entanto, só poderão serem realizadas com maior segurança se levarem em conta aspectos como estrutura, textura, química e mineralogia do solo conjugados a porosidade, distribuição dos poros e curva característica de retenção de água.

2.1.2 Microbiologia do solo

Os estudos pioneiros com micro-organismos foram introduzidos por Van Leeuwenheek em 1673, mas com as pesquisas de Pasteur a partir de 1857 os descobrimentos em microbiologia se aceleraram (Tortora *et. al.*, 2007).

O solo é um ambiente heterogêneo conformado em uma visão macro por três fases, líquida, gasosa e sólida. A primeira se compõe de água, elementos químicos em solução e moléculas solúveis. A segunda fase está composta pelos gases que circulam entre partículas de solo. A terceira está formada por substâncias inorgânicas, areia, argila e silte (Zilli, 2003), mas cabe destaque ainda a presença nessa fase sólida de substâncias orgânicas. Essas três fases variam no espaço e no tempo, fato que atribui um grau mais alto de complexidade ao solo como ecossistema. Dentro de uma visão mais micro há que se ter em conta ainda a presença de micro-organismos como é o caso das bactérias.

Dentro do solo há, então, uma série de atividades que envolvem inúmeros processos biológicos que podem ser influenciados pela forma como o solo está estruturado, ou seja, pelo tipo de agregados e a porosidade (Lavelle, 2000), assim como pode nelas influenciar.

Outra anotação importante consiste em que o solo é um ecossistema com grande variedade de populações microbianas as quais têm muitos tipos fisiológicos. Além disso, a atividade e o número de colônias são influenciados por fatores tais como as características químicas, físicas e biológicas do solo, assim como pela presença de plantas e ação de animais.

Segundo Hogg (2005) a população bacteriana no solo varia de acordo com a quantidade de água disponível e a matéria orgânica. Também existe uma fração inorgânica nos componentes do solo, essa é derivada do desgaste dos minerais. Os micro-organismos podem estar presentes nos solos em grandes quantidades, principalmente unidos às partículas do solo.

Na formação dos solos os micro-organismos têm uma função bastante importante. No estágio inicial o carbono e o nitrogênio são elementos pouco abundantes, nesse caso espécies fotossintéticas e fixadoras de nitrogênio são importantes colonizadoras primárias da rocha. Outras funções relevantes dos micro-organismos são a agregação do solo, além de estarem envolvidos no intemperismo uma vez que participam em reações que liberam prótons, nutrientes inorgânicos e ácidos orgânicos (Moreira & Ziqueira, 2002).

A população microbiana ocupa aproximadamente 0,5% do espaço dos poros do solo e está constituída basicamente por cinco tipos de organismos, as bactérias, os actinomicetos, os fungos, as algas e os protozoários. As bactérias são o grupo mais importante, normalmente mais numeroso que os outros quatro juntos. Em solos muito arejados predominam as bactérias e os fungos, já nos ambientes com pouca existência de oxigênio unicamente as bactérias anaeróbicas são as responsáveis por quase todas as mudanças químicas e biológicas. As bactérias caracterizam-se principalmente por crescer rapidamente e por decompor uma grande variedade de substratos naturais (Alexander, 1980). Segundo Cardoso *et. al.* (1992) a população bacteriana é estimada em aproximadamente 10^8 a 10^9 organismos por cada grama de solo. Já Halverson (2005) afirma que essa população varia entre 10^7 e 10^{11} por cada grama de solo.

As bactérias do solo podem ser classificadas em dois grandes grupos: nativas ou *autóctones* as quais são os residentes verdadeiros e a população em número normalmente é constante. As espécies invasoras ou *alóctones* não participam de forma ativa nas transformações, nem nas funções bioquímicas da comunidade, elas chegam ao solo via

precipitação, águas servidas, dentre outros. Salienta-se que na atualidade há outro tipo de bactérias que também pode ser colocado dentro do solo pelo homem para fins específicos, como por exemplo, para realizar tratamentos de bioremediação.

Uma característica importante na identificação das bactérias é a forma, a qual pode ser de três tipos, esférica ou elíptica mais conhecida como coco, cilíndrica ou bastonete e, espiralada ou helicoidal (Cardoso *et. al.*, 1992).

Destaca-se que a quantidade de bactérias num solo, pode variar por diversos fatores ambientais como clima, conteúdo de matéria orgânica, acidez, aeração, temperatura. É importante ressaltar que dentro do solo há espécies de bactérias muito resistentes, que sobrevivem a condições extremas, essas são os bacilos que formam esporos em ambientes agressivos e se reativam e proliferam quando as condições ambientais são favoráveis (Alexander, 1980).

As bactérias do solo também podem se classificarem por tipo de grupos funcionais (Hogg, 2005):

- ✓ Amonificadoras: Decompõem as substâncias orgânicas nitrogenadas transformando-as em amônia e sais amoniacais.
- ✓ Nitrificadoras: Oxidam o amoníaco e o convertem em nitrato
- ✓ Fixadoras de nitrogênio: Tomam o nitrogênio atmosférico para transformá-lo em compostos aproveitáveis pelos vegetais.
- ✓ Celulolíticas: Degradam a celulose.
- ✓ Pectinolíticas: Degradam a pectina e seus derivados.

Outra forma de classificação das bactérias consiste na capacidade de crescimento em presença ou ausência de oxigênio, portanto, aquelas que precisam de oxigênio para viver são conhecidas como bactérias aeróbias, já aquelas que não precisam de oxigênio para crescer são chamadas anaeróbias. Esse tipo de bactérias não tolera a presença de oxigênio. Existe outro tipo de bactérias que pode crescer em ausência de oxigênio, mas utiliza-o quando disponível no ambiente, tais bactérias são denominadas como anaeróbias facultativas.

A maioria dos micro-organismos do solo são heterótrofos aeróbios, ou seja, aqueles que se alimentam dos nutrientes provenientes da matéria orgânica e que participam da decomposição de substratos orgânicos, por tanto, o número desse tipo de micro-organismos tende a diminuir com a profundidade. A proporção dos organismos anaeróbios aumenta com a profundidade, muitos desses são denominados autótrofos, pois têm a capacidade de produzir seu próprio

alimento a partir do dióxido de carbono (Hogg, 2005).

É importante destacar que a atividade dos micro-organismos está diretamente associada com a formação dos solos, estrutura, dentre outros, devido aos de processos de redução, oxidação, produção de enzimas e liberação de produtos metabólicos que provocam modificações importantes nas propriedades do solo, tais como pH, estrutura, dentre outros (Cardoso *et. al.*, 1992). Esses processos são realizados mediante mecanismos de fotossínteses, onde a fonte de energia é a luz. Os micro-organismos encarregados de realizar esse processo são conhecidos como fotossintetizantes, já as bactérias que conseguem fixar o nitrogênio atmosférico são *diazotróficas*. Outras bactérias conseguem energia a partir de substâncias inorgânicas tais como sais de amônia, nitrito, ferro, dentre outros, são as bactérias *quimiolitotróficas*.

O crescimento bacteriano pode ser profundamente afetado por vários fatores físicos, tais como:

- ✓ Temperatura: As bactérias podem crescer em um intervalo de temperaturas bastante amplo. O crescimento diminui quando a temperatura é inferior ao mínimo do intervalo, pois as enzimas trabalham com menor eficiência e os lípidos tendem a se endurecer. A razão do crescimento aumenta com a temperatura até alcançar a temperatura ótima, e em seguida, a taxa cai novamente, como é apresentado na Figura 2.2 (Hogg, 2005).

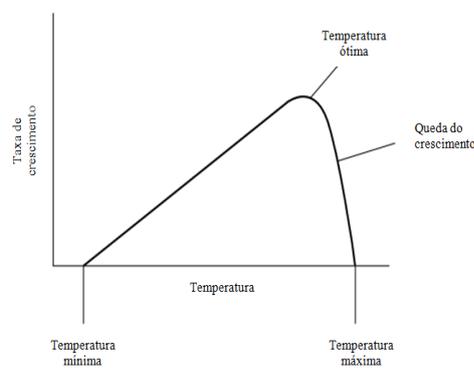


Figura 2.2 Efeito da temperatura no crescimento bacteriano (Hogg, 2005)

Destaca-se que cada espécie é caracterizada por um intervalo de temperaturas que permite definir quatro tipos de bactérias, a maioria alcança a temperatura ótima de crescimento entre 25°C e 40°C, são os chamados *Mesófilos*. Os *Psicrófilos* apresentam temperaturas de crescimento inferiores a 20°C. Os *Termófilos* apresentam uma taxa de crescimento máximo a 45°C, este tipo de bactéria não é muito abundante no solo e depende do teor de matéria orgânica. Finalmente, encontram-se os *Termófilos*

facultativos, que se desenvolvem num intervalo de temperatura que varia entre 28°C e 56°C (Cardoso *et. al.*, 1992). Existe outro tipo de bactérias que possuem valores extremos de temperatura que excedem os 100°C, as quais são conhecidas como *Termófilos Extremos* (Hogg, 2005). A Figura 2.3 descreve graficamente o apresentado acima.

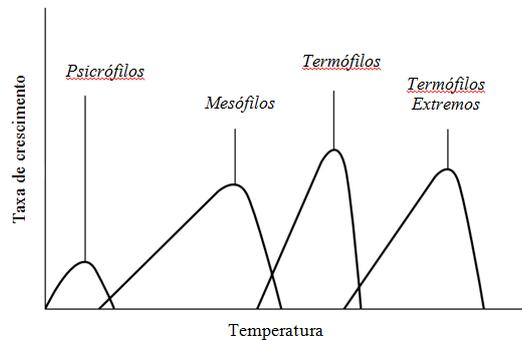


Figura 2.3 Trajetórias de crescimento de bactérias (Hogg, 2005)

- ✓ pH: Os micro-organismos são altamente influenciados pelo pH que predomina no ambiente. As bactérias segundo este critério são classificadas em quatro categorias: a) *Indiferentes*, as quais crescem em uma ampla faixa de valores de pH; b) *Neutrófilos* que preferem pH próximo à neutralidade até ligeiramente alcalino; c) *acidófilos* correspondem a aquelas bactérias que preferem ambientes ácidos; d) *Basófilos* ou *alcalófilos* que não suportam pH inferiores a 8. A Figura 2.4 apresenta um gráfico que distingue o tipo de bactéria segundo os valores de pH (Hogg, 2005).

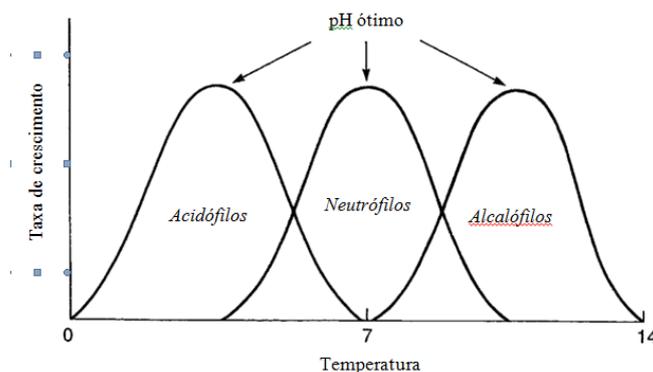


Figura 2.4 Efeito do pH no crescimento bacteriano (Modificado de Hogg, 2005)

O crescimento bacteriano apresenta-se de forma exponencial até esgotar os nutrientes presentes no entorno das bactérias ou também pode se reduzir devido à acumulação de resíduos de substâncias nocivas para os micro-organismos. O processo de vida bacteriano se desenvolve em varias fases como descrito por Hogg (2005) (Figura 2.5):

- ✓ Fase de latência: É a etapa na qual as bactérias adaptam-se ao ambiente. A duração dessa

fase irá depender da idade e da saúde das bactérias. Durante este período não há nenhum aumento do número de bactérias, no entanto, as células são metabolicamente ativas.

- ✓ Fase de crescimento logarítmico ou exponencial: Caracteriza-se pela multiplicação das células causada pela divisão por fissão binária das mesmas e, como consequência há um crescimento exponencial.
- ✓ Fase estacionária: Nesta etapa o aumento de bactérias é nivelado pela morte de outras, ou seja, o número de bactérias recém formadas é neutralizado por um número similar de bactérias que morrem, assim, a população bacteriana permanece constante.
- ✓ Fase de morte: As bactérias começam a morrer em maior número que o crescimento devido à falta de nutrientes e acumulação de dejetos tóxicos.

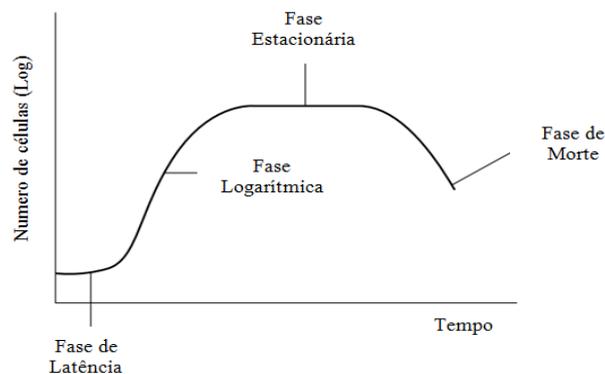


Figura 2.5 Curva de crescimento bacteriano (Modificado de Hogg, 2005)

Como tópico final da microbiologia do solo é de vital importância descrever a interação entre a bactéria e a estrutura do solo. As bactérias são micro-organismos cujo tamanho é muito similar ao das argilas, por tanto, existe a possibilidade de adesão das partículas com as células microbianas. A natureza dessa adesão é principalmente química e mediada por substâncias cimentantes (Cardoso *et. al.*, 1992).

O processo de agregação do solo é bastante complexo e envolve a ação de fatores abióticos e bióticos. Dentro dos processos bióticos se encontram os micro-organismos que exercem uma ação física entre as partículas do solo, atuando como pontes cimentantes entre os grãos (Moreira & Siqueira, 2002). Estes autores afirmam ainda, que a interação entre as superfícies de micro-organismos e coloides afeta aspectos importantes da população microbiana, além da sua atividade.

A taxa de adesão dos micro-organismos do solo às partículas minerais pode atingir até 90% da população. Tal fato dependerá da natureza do micro-organismo, sendo as bactérias gram-

positivas mais facilmente adsorvidas. O diâmetro das partículas também influi na adesão, pois quanto menor a partícula há maior adesão (Cardoso *et. al.*, 1992). O arranjo espacial entre bactérias e agregados do solo é apresentado na Figura 2.6.

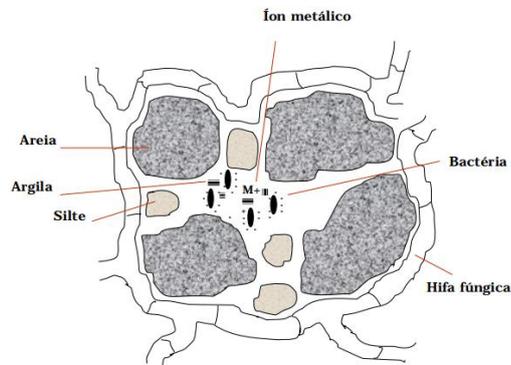


Figura 2.6 Arranjo espacial entre partículas e micro-organismos do solo

Por outro lado, é importante dizer que a interação entre bactérias e superfícies sólidas dos solos ocorre por mecanismos como: carga negativa da superfície da célula microbiana com carga positiva da argila ou carga positiva da célula com pH baixo com carga negativa da argila.

A predominância de cargas positivas nas células microbianas aumenta a estabilidade do complexo argila-bactéria, uma vez que a maioria das partículas de argilas tem carga líquida negativa. O ponto isoelétrico pode variar entre as espécies bacterianas.

No solo normalmente são encontrados tipos de bactérias como *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Clostridium*, *Nitrobacter*, espécies fixadoras de nitrogênio tais como *Rhizobium* e *Azotobacter*. Também encontram-se cianobactérias como *Nostoc* e *Anabaena* (Hogg, 2005).

2.2 BIOMINERALIZAÇÃO

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 micro-organismos no desenvolvimento de novos materiais e metodologias de produção.

Partindo desse entendimento o conceito de biomineralização ganhou força na atualidade. Na natureza a biomineralização é muito comum e consiste na precipitação de um mineral proveniente da atividade celular de um ser vivo. Em outros termos a biomineralização é o processo mediante o qual os organismos vivos são capazes de produzir sólidos inorgânicos (minerais) por duas vias: indução biológica e mediada por uma matriz extracelular que

organiza os cristais mineralizados.

Assim, substâncias que são produtos dos processos de biomineralização podem ser liberadas durante a atividade do organismo em vida ou após a morte (RedBi, 2001). Soto (2003) afirma que aproximadamente 80% dos biominerais são cristalinos e os 20% restantes são constituídos por estruturas amorfas. Por outro lado, cerca de 50% dos biominerais conhecidos são constituídos por cálcio, sendo que do restante, 25% são atribuídos a minerais de fosfato.

Naka *et al.* (2007) afirmam que biomineralização é o processo mediante o qual organismos vivos secretam minerais inorgânicos na forma de esqueletos, conchas, dentes, etc. É um processo bastante antigo no desenvolvimento da vida e foi adaptado pelos seres vivos para viabilizar a continuidade e desenvolvimento da espécie. Os biominerais são materiais com propriedades muito interessantes que têm atraído a atenção em muitas áreas nas últimas décadas. Na natureza existe uma abundância de biominerais, com formas e estruturas fascinantes

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.

Embora ainda falte muito por aprender sobre o assunto, os avanços no entendimento dos processos de vida dos micro-organismos têm mostrado grande importância para o desenvolvimento do uso da biotecnologia com fins de melhorar os processos tecnológicos, para a indústria em especial a de construção civil, mas esses ainda estão longe de serem cientificamente explicados.

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 micro-organismos 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.

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

Cardoso *et al.* (1992), 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. Além disso, a precipitação pode ser o resultado de um processo metabólico microbiano como a fotossíntese, hidrólise de ureia e redução de sulfatos, entre outros.

Os cristais produto do processo de biomineralização não têm a mesma estrutura, esta depende do tipo de micro-organismo e das condições do meio onde é produzido. 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 micro-organismos nos processos de precipitação ainda não está claro.

A biomineralização está relacionada com as funções fisiológicas dos micro-organismos, dando como resultado minerais benéficos para os mesmos e para o meio onde eles vivem. A precipitação de minerais é favorecida pela habilidade das bactérias de modificar o meio natural, sendo essa a principal função das mesmas, ou seja, as bactérias criam um ambiente alcalino propício para que o processo de desenvolva apropriadamente (Fitolito, 2009).

Processos metabólicos como a fotossíntese, hidrólise de ureia e redução de sulfatos, dentre outros, dão origem à precipitação. Segundo Donald Gray (2001) *apud* Martínez *et al.* (2003), existe uma ampla variedade de micro-organismos aptos a realizar processos utilizando as características próprias para secretar substâncias derivadas de seus metabolismos, as quais possuem propriedades cimentantes.

A precipitação é o resultado de um processo metabólico microbiano como a fotossíntese, hidrólise de ureia e redução de sulfatos, entre outros. Montoya *et al.* (2005), afirmam que esses processos afetam a alcalinidade do solo dissolvendo o carbono inorgânico do meio ambiente e favorecendo a precipitação.

Dos 20 a 25 elementos geralmente requeridos pelos organismos vivos, o hidrogênio, carbono, enxofre, magnésio, silício, potássio, cálcio, manganês e ferro, são constituintes comuns em mais de 60 minerais biológicos. Dentre eles, o cálcio ocupa um lugar especial, pois além de ser muito comum, também é constituinte de estruturas esqueléticas tais como ossos e conchas.

O CaCO_3 e os minerais de fosfato de cálcio têm energias de atração elevadas e

solubilidades baixas e, portanto, são minerais termodinamicamente estáveis em ambientes biológicos (Mann, 2001). Esse mesmo autor afirma que das seis formas de carbonato de cálcio conhecidas, a aragonita e a calcita, são comumente precipitadas por processos de biomineralização, assim, como apresentam as estruturas mais estáveis termodinamicamente.

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). 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.

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 (Gómez, 2009).

2.3 CARBONATOGÊNESE

A carbonatogênese é o nome também dado ao processo de precipitação de carbonato de cálcio. Os cristais formados como resultado da precipitação não têm a mesma estrutura, pois esta depende do tipo de microorganismo e das condições do meio onde é produzido o processo de biomineralização.

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 serem heterogêneas (Riding, 2000).

A carbonatogênese, é um processo simples e governado por quatro principais fatores (Castanier, 1999; Kile *et. al.*, 2000), que são:

- ✓ A concentração de cálcio (Ca^{2+});
- ✓ A concentração da dissolução do carbono inorgânico (DIC);
- ✓ O pH ;
- ✓ A disponibilidade de nucleação do local.

Muitas têm sido as pesquisas desenvolvidas no campo da biomineralização de carbonato de cálcio, no entanto, o foco dessas pesquisas concentrou-se na reconstrução de monumentos.

Novas metodologias têm sido propostas para superar os problemas de incompatibilidade do mineral precipitado com o material rochoso do monumento, assim como para melhorar o processo de precipitação, essas estratégias baseiam-se na capacidade de induzir a precipitação própria das bactérias. (Rodríguez Navarro *et. Al.*, 2003; Jroundi *et. al.*, 2012; Castanier *et. al.*, 1999; Jiménez López *et. al.*, 2007).

Segundo Castanier *et. al.* (1999) existem duas vias para a precipitação de partículas de CaCO_3 , a primeira ocorre por processos autotróficos onde a fonte de CO_2 como fonte de carbono para produzir matéria orgânica. O segundo caminho consiste em processos heterotróficos, os quais são mais frequentes e ocorrem por precipitação passiva ou precipitação ativa. A precipitação passiva é gerada por modificações do meio, que conduzem à acumulação de íons carbonato e bicarbonato e, conseqüentemente à precipitação de partículas sólidas. Tais modificações são produzidas por vias metabólicas tais como o ciclo do nitrogênio (amonificação de aminoácidos, degradação de ureia e ácido úrico, redução de nitratos) e do enxofre (redução de sulfatos). Já a carbonatogênese ativa não depende das vias metabólicas citadas, pois as partículas de carbonato são produzidas por troca iônica através da membrana celular.

Esses mesmos autores declaram que a carbonatogênese ocorre durante a etapa exponencial do crescimento bacteriano, onde há um aumento do pH e uma acumulação de carbonatos, que constituem a origem dos produtos metabólicos gerados pelos micro-organismos e, termina aproximadamente no início da fase estacionária. A carbonatogênese ativa se inicia primeiro e posteriormente é seguida pela passiva, que induz o crescimento de partículas para ser seguido pelo outro passivo, que induz o crescimento de partículas.

Jroundi *et. al.* (2012) assinalam que os tratamentos que usam biomineralização bacteriana baseiam-se em dois processos: i) inoculando bactérias com capacidade de precipitação comprovada e/ou ii) a aplicação de um meio de cultura estéril capaz de ativar as bactérias endógenas indutoras da formação de carbonato de cálcio, sendo que essa última demonstrou maior eficácia, pois não introduz organismos exógenos.

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 (Equação 2.1):



A produção do íon Carbonato (CO_3^{2-}) é governada pelo equilíbrio mostrado nas reações descritas nas equações 2.2 e 2.3:



Nas equações anteriores, os íons bicarbonato (HCO_3^-) se equilibram liberando íons carbonato (CO_3^{2-}) e hidrogênio. Segundo Gómez (2006), o processo de nucleação ou formação dos cristais começa em condições ácidas.

Muitos trabalhos de pesquisa sobre precipitação bacteriana de carbonato têm sido realizados usando bactérias ureolíticas (Dick *et. al.*, 2006; Stocks-Fischer *et. al.*, 1999) as quais possuem a capacidade de influenciar a precipitação de CaCO_3 via produção de enzima urease. Essa enzima catalisa a hidrólise de ureia e conseqüentemente a produção de dióxido de carbono (CO_2) e amônia. Como resultado, há um acréscimo do pH e da concentração de carbonatos no ambiente da bactéria (Stocks-Fischer *et. al.*, 1999). Esses mesmos autores manifestam que a solubilidade do CaCO_3 é afetada pela concentração iônica em meio aquoso.

A hidrólise de ureia ($\text{CO}(\text{OH})_2$) via enzima urease é um modelo simples e comumente usado para induzir precipitação de CaCO_3 . A reação ocorre de acordo com as equações 2.4 e 2.5. A ureia em presença de água (H_2O) reage produzindo dióxido de carbono (CO_2) metabólico e amoníaco (NH_3). Como essa reação apresenta-se em meio aquoso acontece uma geração de amônia (NH_4) e carbonato (CO_3^{2-}). O aumento do pH é propiciado por causa do NH_3 .



A precipitação de CaCO_3 depende da concentração da enzima urease que decompõe a ureia gerando um aumento do pH. Quando é gerada a precipitação, inicialmente são formados precipitados amorfos que posteriormente se cristalizam em calcita, como é apresentado na Figura 2.7 (Sondi & Matijevic, 2001).

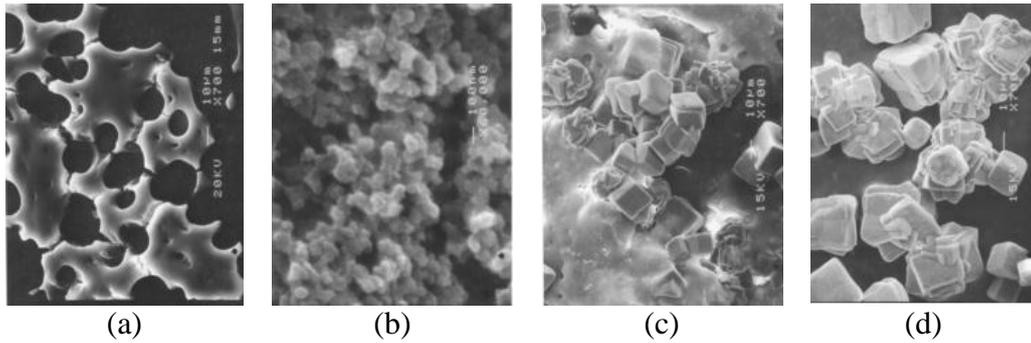


Figura 2.7 Processo de formação de calcita (a) Etapa inicial formação de um material com aparência gelatinosa (b) ampliação da figura “a” partículas nanométricas de 100 nm de diâmetro (c) início de formação de partículas de calcita bem formadas (d) Calcita bem estruturada (Sondi & Matijevic, 2001).

A Figura 2.8 é uma representação gráfica dos processos que ocorrem durante a precipitação de CaCO_3 induzida por bactérias ureolíticas.

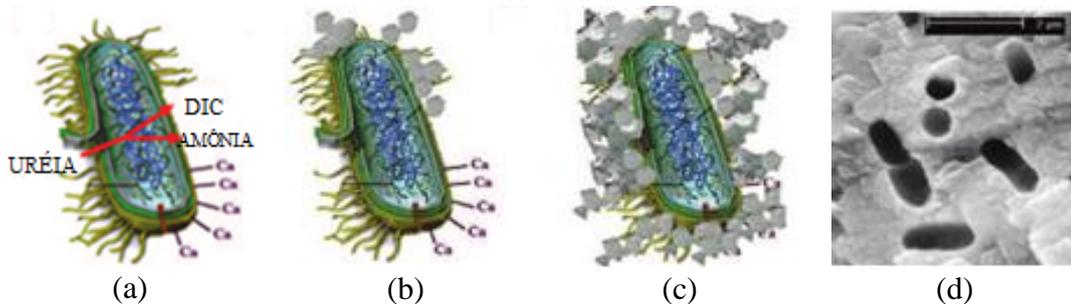
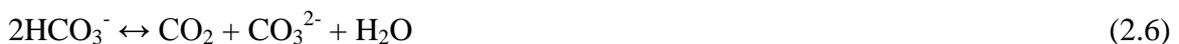


Figura 2.8 (a) Íons de Ca são atraídos até a parede da bactéria (b) Início de precipitação de CaCO_3 heterogêneo na parede da bactéria (c) Morte celular (d) CaCO_3 cristalizado com marca de bactérias mortas (Muynk, 2012)

A precipitação de carbonato de cálcio pode se originar pelo processo da fotossíntese, que se fundamenta na metabolização de dióxido de carbono (CO_2) dissolvido, o qual está em equilíbrio com o HCO e CO no entorno da bactéria, como apresentado na equação 2.6. Quando ocorre essa reação, é induzida uma mudança no equilíbrio do bicarbonato, que gera um acréscimo de pH (Equações 2.7 e 2.8). É necessária a presença de íons de cálcio solúvel para que aconteça a precipitação de CaCO_3 . Além disso, a precipitação de cristais de carbonato de cálcio ocorre por nucleação heterogênea na parede da célula bacteriana, uma vez que a sobressaturação é conseguida (Hammes & Vestraete, 2002).



Sondi & Matijevic (2001), realizaram um trabalho com enzima urease e observaram que a

precipitação foi mais rápida em temperatura ambiente quando o pH estava entre 7 e 9. Formaram-se cristais de vaterita e posteriormente de calcita (Figura 2.9). Os autores observaram que a taxa de mudança nos cristais depende da concentração de enzima.

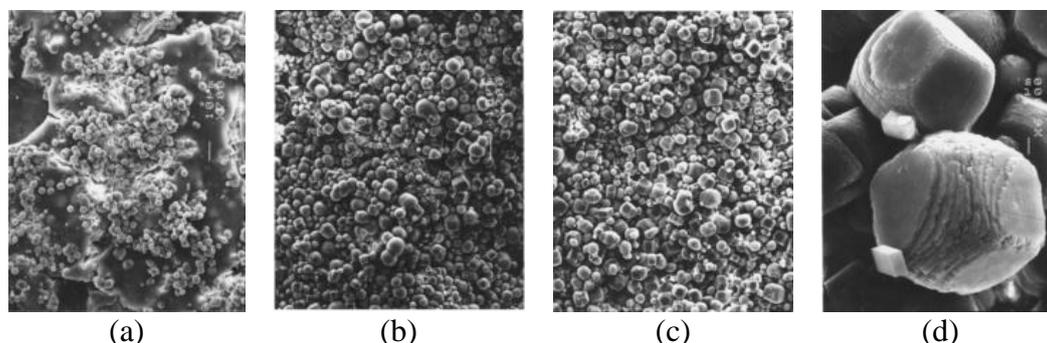


Figura 2.9 Formação de calcita (a) Início de cristalização de partículas (b) Partículas cristalizadas (c) Cristais de vaterita (d) cristais de calcita (Sondi & Matijevic, 2001)

Hammes & Vestraete (2002) expõem que o fato da hidrólise de ureia ser um processo microbiano simples comum e, que uma grande variedade de micro-organismos produzem a enzima urease, torna-o ideal para aplicações biotecnológicas.

Segundo López (2008) para favorecer a precipitação de carbonato de cálcio é necessário que o meio seja preferivelmente básico. Isso explica porque os micro-organismos utilizados para avaliar a produção de calcita são geralmente alcalófilos, ou seja, crescem em pH maior que 8.0, pois em pH inferiores o crescimento é muito lento ou nulo.

Durante a carbonatogênese existem variáveis que controlam o processo, como: i) concentração de íons de cálcio (Ca^{2+}), ii) pH do meio, e iii) agentes externos, como quantidade de dióxido de carbono (CO_2) e concentração de bactérias.

Stock – Fischer *et. al.* (1999) asseveram que um ambiente com uma grande quantidade de bactérias restringe a precipitação de CaCO_3 , pois elas limitarão a disponibilidade de nutrientes para serem metabolizados e como consequência a produção de CaCO_3 não seria adequada. É preciso salientar que para favorecer a precipitação de CaCO_3 o fator mais importante é que exista disponibilidade de íons de Ca e CO_3 num ambiente calcinogênico, no entanto, também se deve levar em conta a população bacteriana (Lee, 2003). Geralmente as condições ideais de pH para a bioestabilização se situam num intervalo entre 7 e 9.

Os papéis precisos de bactérias e atividades bacterianas no processo de cristalização de carbonato ainda não são claros, embora eles pareçam se encaixarem em três categorias diferentes, porém relacionadas. Como primeira hipótese, a mineralização pode ser vista como

um subproduto do metabolismo microbiano, tanto micro-organismos autotróficos quanto heterotróficos. Como segunda hipótese, a nucleação de carbonato tem lugar na parede da célula, devido à troca de íons através da membrana celular, seguida por alguns mecanismos ainda pouco conhecidos, ou devido ao apoio da carga negativa da parede das células que adsorvem cátions bivalentes, tais como Ca^{2+} . A terceira hipótese envolve macromoléculas extracelulares produzidas por bactérias que formam uma ampla classe de polímeros implicados em processos tais como a formação da estrutura e arquitetura de *biofilms* e de precipitação de CaCO_3 (Ercole *et. al.*, 2012). Por outro lado, Rodríguez-Navarro *et. al.* (2003) afirmam que a calcita precipitada por micro-organismos é menos solúvel do que a calcita precipitada inorganicamente.

2.4 BIOMINERALIZAÇÃO NA ENGENHARIA CIVIL

Segundo Zilli (2003) é necessário realizar uma identificação das espécies microbianas presentes no solo, pois os micro-organismos estão intimamente associados aos processos ecológicos, sendo que essa característica dá a eles um grande potencial como indicador da qualidade do solo. Tais autores afirmam ainda que as variáveis que ajudam a determinar o uso da biodiversidade são a composição mineralógica, transformação de massa, matéria orgânica, radiação solar e temperatura. Já (Halverson, 2005) afirma que as principais variáveis que influenciam as bactérias do solo são a temperatura, umidade, pH, disponibilidade de água, que flutuam rápida ou lentamente, obrigando às bactérias a criarem estratégias de sobrevivência. A Figura 2.10 ilustra o anteriormente descrito.

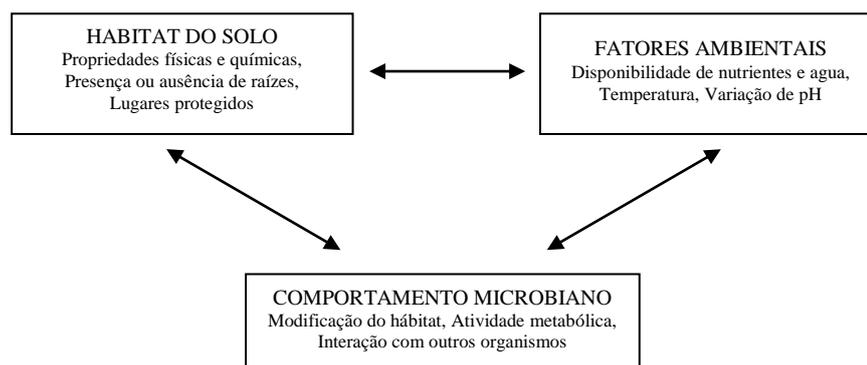


Figura 2.10 Modelo ilustrativo dos fatores que influenciam as bactérias do solo (Modificado de Halverson, 2005)

A aplicação da biotecnologia, especificamente da biomineralização como método de melhoria dos solos oferece uma alternativa bastante promissora. Whiffin (2007) afirma que desde o 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 a diferentes aplicações.

Valencia *et. al.* (2012) manifestam que todos os trabalhos e invenções relacionados com a biomineralização situam-se no aspecto da melhoria das propriedades e/ou comportamento do material, no entanto, há uma limitação com respeito ao risco ambiental causado pela adição de bactérias e/ou nutrientes estranhos ao meio ambiente.

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

Durante a biomineralização são afetadas as propriedades e comportamento dos solos. Segundo Zilli *et al.* (2003), os solos tropicais apresentam degradação química que as vezes dificulta o tratamento dos mesmos mediante processos biológicos, além disso a carência de nutrientes para serem aproveitados pelas bactérias também representa uma dificuldade. Mas esses solos apresentam uma grande riqueza da biota que é maior ainda sob condições climáticas favoráveis.

No ramo da engenharia civil a aplicação da biomineralização pode ser dividida em várias metodologias (Gómez, 2006), dentre as quais se destacam:

- ✓ Bioinduração: Tem sido a mais estudada e consiste na selagem dos poros do solo mediante a adição de micro-organismos, para que estes produzam uma biopelícula ou *biofilm*, (película constituída por uma matriz de polímeros extracelulares produzida por organismos que estão embebidos dentro da mesma), que proporciona uma redução da permeabilidade (Figura 2.11).

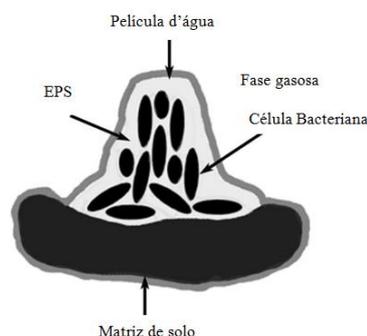


Figura 2.11 Biofilme em um solo não saturado (Modificado de Halverson, 2005)

- ✓ Biorremediação: 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.

De Muynck *et al.* (2012) indica que a primeira patente referente ao estudo da biomineralização foi há quase duas décadas e, desde então, vários grupos de pesquisa têm procurado abordagens alternativas para o uso da biorremediação, também conhecida como biodeposição. A partir dessa época essa alternativa tecnológica ganhou importância e começou a ser aplicada na engenharia para restauração e reforço de materiais como rocha e concreto. Já no campo da bioestabilização ou biocimentação os primeiros estudos foram realizados no início da década de 90 e focaram-se na engenharia geotécnica como uma alternativa para melhorar as propriedades dos solos.

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

Halverson (2005) relata que no processo de bioinduração o crescimento do *biofilm* é considerado como contínuo, sendo uma comunidade de bactérias com um elevado nível de organização, diferentemente do crescimento microbiano no solo que é desigual.

Técnicas de biomineralização *in situ*, cujos resultados indicaram que a adição de um meio nutritivo ativador das bactérias endógenas do solo, motivou a precipitação de CaCO_3 e, conseqüentemente a variação das propriedades físicas e mecânicas do solo *in natura* e compactado foram utilizadas por Valencia (2010). O efeito do tratamento refletiu-se na melhoria da estabilidade e desempenho dos agregados, menor deformabilidade e maior resistência do solo.

Stocks-Ficher *et al.* (1999), realizaram experimentos para precipitar CaCO_3 . Na pesquisa eles adicionaram um meio nutritivo composto de 20 g de ureia, 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* em um solo arenoso. Os resultados obtidos revelaram que a precipitação de CaCO_3 foi gerada em um intervalo de pH entre 8 e 9.

Matínez *et al.* (2003), adicionaram meios em três concentrações com *Bacillus subtilis* no solo para induzir a precipitação de CaCO_3 . O resultado obtido foi a melhoria das propriedades físicas e do comportamento mecânico do solo.

Gómez (2006) agregou *Bacillus pasteurii* e *Bacillus subtilis*, cada espécie com um meio nutritivo denominado de B4, em um solo grosso que foi seco na estufa para evitar a interferência das bactérias nativas. O objetivo foi avaliar a variação do módulo de rigidez. Nos resultados obtidos observou-se que os *Bacillus pasteurii* são mais adequados para melhorar a resistência ao cisalhamento.

Ismail *et al.* (2002) utilizaram um sistema de precipitação *in situ* mediante dois processos, injeção ou molhagem do solo. O meio consistiu em uma solução aquosa com baixa viscosidade, com pH neutro e não tóxica. Como resultado houve precipitação de CaCO_3 que envolveu e formou pontes entre os grãos gerando assim uma ligação entre eles e, conseqüentemente uma cimentação na matriz de solo melhorando sua resistência.

Flórez (2007) adicionou separadamente um meio nutriente e uma mistura do meio com *Bacillus spp.* em um solo arenoso. Nos resultados obteve-se melhoras nas propriedades mecânicas, mas essas foram mais notórias com a adição das bactérias junto com o meio nutritivo.

Whiffin *et al.* (2007) mostraram que é possível obter uma cimentação em grãos de areia mediante a precipitação de carbonato de cálcio gerada a partir da adição de ureia e cloreto de cálcio a velocidade constante numa coluna de solo, gerando assim, uma redução da permeabilidade do solo e impermeabilização do mesmo. Também observaram que a capacidade das bactérias para degradar ureia decresce durante o tempo de reação e que as causas de tal perda podem ser a redução de volume de poros, aumento da quantidade de CaCO_3 precipitado, diminuição na concentração de ureia ou degeneração da viabilidade das bactérias nas condições de cimentação.

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. Observaram que a temperatura não é tão importante para a precipitação, quanto o pH. Como conclusão afirmam que material fino com grande área superficial é um excelente meio para envolver as bactérias.

Outro trabalho nessa mesma linha foi realizado por Dejong *et al.* (2006). Nele o *Bacillus pasteurii* num meio líquido modificado com ureia e uma fonte de cálcio foram colocados em espécimes de areia esterilizados. Os resultados demonstraram que houve uma cimentação entre grãos que incrementou a resistência ao cisalhamento.

Outra aplicação da carbonatogênese induzida em solos foi estudada por Valencia (2009) e

Arrieta (2011), cujo objetivo foi a avaliação da mitigação de processos erosivos adicionando um meio nutritivo para ativar as bactérias nativas do solo laterítico, os resultados revelaram que houve uma neutralização do processo erosivo e uma melhoria nas propriedades físicas e mecânicas do solo.

Atualmente existem equipes de pesquisa reconhecidas no mundo voltadas para o estudo dos processos de biomineralização induzidos com aplicações em engenharia, dentre as quais encontra-se a biocimentação de solos com a finalidade de determinar metodologias que permitam beneficiar propriedades tais como permeabilidade, rigidez e resistência dos mesmos. Os resultados mais promissores tem sido mediante a estimulação dos microorganismos nativos (López, 2008).

2.5 BIOMINERALIZAÇÃO PARA FINS DE PAVIMENTAÇÃO RODOVIÁRIA

Embora nem sempre seja esse o caso, Nogami e Villibor (1995) indicam que os solos lateríticos finos apresentam um comportamento apropriado para uso em camadas de base de rodovias com um nível de tráfego leve a médio. Gidigas (1976) afirma que sob condições adversas de tráfego e umidade os solos lateríticos não apresentam uma boa resposta mecânica, o autor afirma que são aptos só para compor sub-base, mas não para base. No entanto, quando estabilizados, os solos lateríticos podem ser usados nas camadas da estrutura de um pavimento em rodovias com tráfego pesado. Cabe destacar que na realidade da construção rodoviária no Brasil os cascalhos lateríticos são frequentemente utilizados e geralmente apresentam bom desempenho.

São muitas as pesquisas realizadas com aplicações da biomineralização induzida na engenharia civil, mas ainda são relativamente poucos os estudos focados em aplicações específicas de pavimentação rodoviária. Outro aspecto a destacar é que a maioria de tais estudos são realizados com solos que têm características arenosas.

Grupos de pesquisa como Bacest (Bactérias Estructurales – Colômbia) realizam trabalhos focados na avaliação da resposta mecânica de solos de subleito tratados com precipitação de carbonato de cálcio. Atualmente, a Universidade de Brasília se encontra desenvolvendo pesquisas sobre o possível uso da biomineralização em solos finos com o propósito de melhorar as propriedades físicas e mecânicas dos mesmos, tais trabalhos têm gerado resultados promissores em alguns casos o que estimula a continuação dos estudos na área para fins práticos.

Como mencionado, ainda são relativamente poucos os trabalhos de pesquisa realizados

especificamente na melhoria das propriedades mecânicas dos solos com fins de pavimentação rodoviária mediante o uso de biotecnologia. Atualmente existem empresas que oferecem produtos enzimáticos naturais que geram melhorias nas características mecânicas e físicas dos solos, algumas dessas melhorias refletem no aumento do CBR e da resistência à compressão simples. 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, oferecendo alguns benefícios, dentre eles a diminuição dos custos de transporte e obtenção de materiais de empréstimo que eram a princípio inapropriados. Entretanto, os materiais aptos para serem estabilizados com permazyme têm limitações na granulometria e no índice de plasticidade. (SECSASA, 2008)

Segundo Gómez (2006) solos caracterizados como areia siltosa são solos muito mais aptos para serem tratados biologicamente que outros tipos de areia. Outros autores como Echeverri & Santander (2003) *apud* Flores (2007) observaram um aumento do CBR após o tratamento realizado quando foi facilitado o crescimento das bactérias calcificantes nativas do solo.

Lo Bianco & Madonia (2007) trabalharam com três tipos de material de origem diferente: basalto, calcário e sílica, os quais foram tratados biologicamente para realizar ensaios de CBR. Os resultados foram comparados com os obtidos para uma mistura de projeto usada para a construção de camadas de pavimento. A conclusão foi que com o tratamento é possível aumentar o CBR em até 42% em só 10 dias. A técnica utilizada por esses autores foi denominada *Bacteria Method for Unbound Layers* (B.U.L.M.).

Pesquisadores como Victoria Whiffin têm realizado muitos trabalhos de pesquisa com a finalidade de desenvolver processos de melhoria das propriedades mecânicas dos solos. Em 2005 essa pesquisadora menciona dois processos para tais fins *Biosealing* e *Biogrout* (Figura 2.12). O primeiro se refere à selagem da filtração e fluxo da água retida nas estruturas, sejam estas naturais ou feitas pelo homem. Já o *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 infraestrutura, melhoria de aterros entre outros. Segundo Meurs *et al.* (2006) o *Biogrout* tem como objetivo principal a melhoria da resistência

e da rigidez do solo, com aplicações como melhoria da resistência à erosão, reforço em dunas, entre outros.

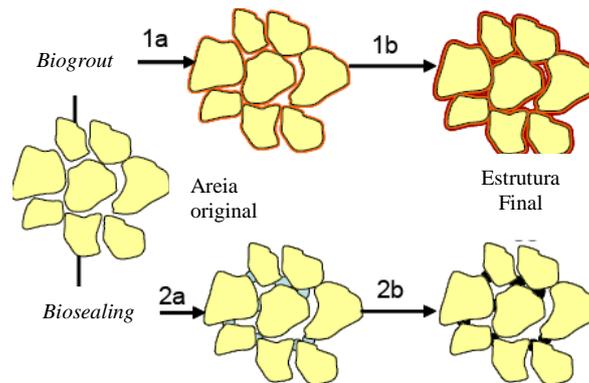


Figura 2.12 Esquematização do princípio de formação de *Biograout* e *Biosealing* (Modificado de Meurs *et al.*, 2006)

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

Donald Gray (2001) *apud* Gómez (2006) assinala que existem muitas vantagens ao usar micro-organismos em processos de melhoria de solos, pois com eles se consegue uma maior tolerância frente à mudanças de umidade, ataques químicos em ambientes tóxicos, condições anaeróbicas e temperaturas extremas. Além disso, os micro-organismos conseguem se desenvolver em ambientes com porosidade muito pequena.

Pesquisas realizadas na Colômbia revelam que o uso da bactéria *Bacillus pasteurii* para obter carbonato de cálcio por meio de biomineralização é eficaz 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. 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 biominaerais produzidos.

É importante que no uso da biotecnologia com fins de estabilização de solos, os profissionais envolvidos tenham um bom conhecimento da bioquímica e da microbiologia dos micro-organismos, 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.

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 do mesmo.

Gómez (2009) realizou ensaios em corpos de prova compactados com a energia Proctor intermediária e Proctor normal os quais foram curados em três umidades diferentes, ótima de compactação, ótima + 3% e ótima - 3%, com a finalidade de verificar a influencia da variação da umidade na precipitação de carbonato de cálcio quando adicionado um meio nutritivo denominado B4 ou uma solução contendo extrato de feijão de porco (*Canavalia ensiformes*), como agentes indutores de tal precipitação. Como resultado se obteve que há grande influência da umidade de cura sobre as propriedades mecânicas do solo. Esta mesma autora observou que há uma umidade de cura similar para ambas as energias de compactação, onde apresenta-se uma melhoria em algumas propriedades mecânicas do solo, tal umidade era aproximadamente igual a 20%.

CAPÍTULO 3

MATERIAIS

3.1 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. O relevo apresenta níveis planos a levemente ondulados cuja vegetação é predominantemente cerrado (Cardoso, 2002).

O território do Distrito Federal está coberto por uma camada detrito-laterítica que possui uma espessura maior que 10 m em algumas regiões. No entanto, o comportamento dessa cobertura é bastante variável e com características muito peculiares (Faria, 1993 *apud*. Lima, 2003).

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

O local de origem do solo de estudo foi o Campo Experimental de Fundações e Ensaios de Campo do Programa de Pós-graduação da Universidade de Brasília (UnB) o qual é apresentado na Figura 3.1. A localização geográfica da área de amostragem é determinada pelas coordenadas 15°45'58" Latitude Sul e 47°52'22" Longitude Oeste (Figura 3.1). O perfil de solo apresenta o intemperismo típico do Distrito Federal e é constituído por uma

camada superficial de solo argilo-arenoso seguido de solo argiloso poroso. O critério de escolha do local foi o conhecimento prévio das características geotécnicas do perfil e sua representatividade em relação aos solos predominantes no Distrito Federal.

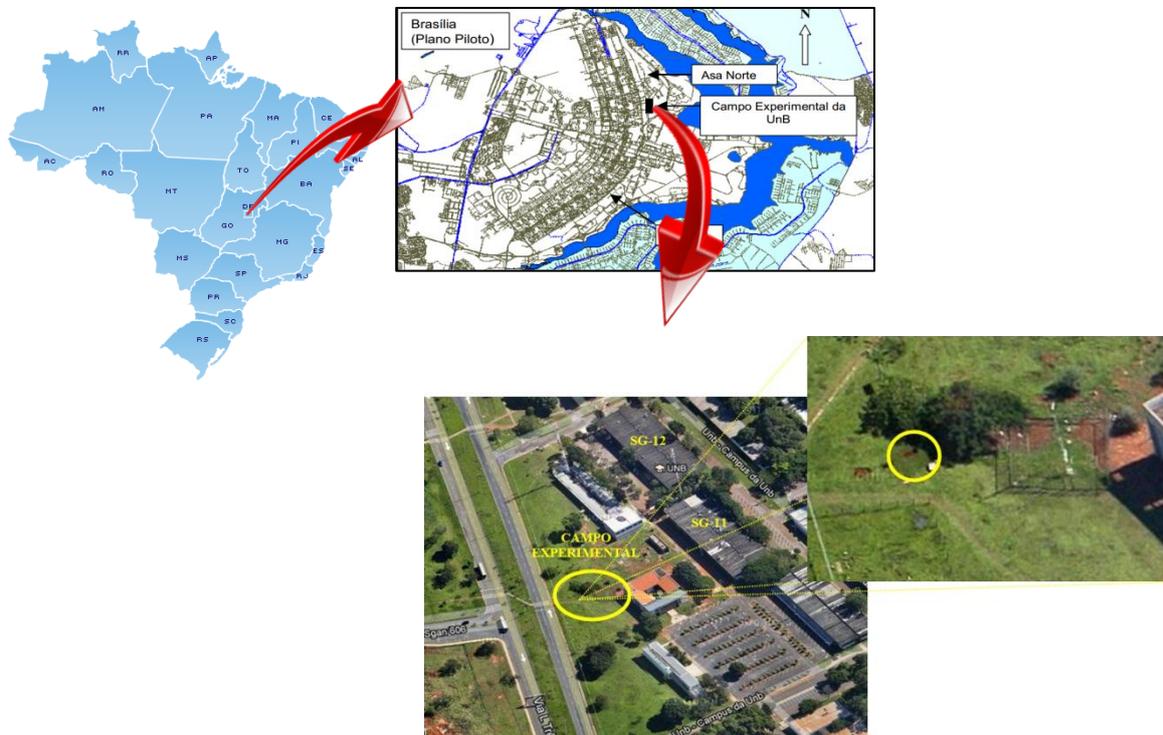


Figura 3.1 Localização do local de amostragem

O Campo Experimental apresenta um perfil de solo que segundo Pastore (1996) *apud* Mota (2003) mostra três horizontes bem definidos:

- ✓ Horizonte de solo residual laterítico intemperizado (0 m a 8,80 m), conformado por duas subcamadas de argila arenosa vermelho escura (0 m a 5,00 m) e uma argila pedregulho-arenosa vermelho escura (5,00 m a 8,80 m).
- ✓ Horizonte de transição (8,80 m a 10,30 m) de solo laterítico (8,80 m a 9,80 m) e poucas estruturas reliquias (9,80 m a 10,30 m).
- ✓ Horizonte de solo saprolítico de ardósia, constituído por intercalações de quartzo (10,30 m a 11,30 m) e um silte argiloso vermelho (11,30 m a 15,00 m).

Segundo Guimarães (2002) o perfil de solo do Campo Experimental está dividido em três subcamadas sendo: 0 a 5,5 m um solo areno siltoso; silte arenoso entre 5,5 m e 8,5 m e a partir de 8,5 m o solo assume uma textura mais siltosa. No entanto, esse mesmo autor menciona que ao correlacionar as características físicas com as mineralógicas e microestruturais, o perfil pode se dividir nas seguintes subcamadas:

- ✓ 0 a 3,5 m: Camada de areia argilo-siltosa porosa, com predominância de gibbsita, macroporos e muitos agregados, com alto índice de vazios onde ocorrem as maiores variações de umidade ao longo do ano. A zona entre 3,0 m e 4,0 m é a zona de transição entre a camada em menção e a subsequente.
- ✓ 3,5 a 8,5 m: Camada de argila areno-siltosa, zona na qual as propriedades físicas, mineralógicas e microestruturais vão gradualmente se alterando até encontrar o residual mais jovem a 8,5 m. A profundidade de 8 m corresponde ao início da zona de transição entre essa camada e a seguinte.
- ✓ 8,5 é a profundidade a partir da qual o solo assume textura mais siltosa.

As amostras de solo coletadas para o desenvolvimento da pesquisa foram do tipo deformadas. O processo de coleta se dividiu em duas etapas, a primeira foi a obtenção da amostra destinada à caracterização do perfil de solo, sendo elas extraídas com ajuda de um trado manual de 15 cm diâmetro.

O perfil de solo estudado foi dividido em 6 camadas com espessura de 1,0 m cada uma. Esclarece-se que os primeiros 0,50 m de solo mais superficiais não foram levados em conta durante o estudo devido à possível presença de uma considerável quantidade de matéria orgânica. Assim, a primeira camada estudada do perfil inicia a partir dessa profundidade. Para caracterizar as camadas foram coletadas amostras de solo em sua parte central como mostrado na Tabela 3.1.

Destaca-se que a finalidade dessa divisão foi realizar uma caracterização física e microbiológica que permitisse definir as três profundidades com melhor desempenho durante a caracterização microbiológica e os testes da bioprecipitação in vitro de CaCO_3 .

Tabela 3.1 Profundidades das amostras coletadas para caracterização do perfil

Camada	Profundidade (m)	Profundidade de coleta (m)
1	0,50 – 1,50	1,00
2	1,50 – 2,50	2,00
3	2,50 – 3,50	3,00
4	3,50 – 4,50	4,00
5	4,50 – 5,50	5,00
6	5,50 – 6,50	6,00

A segunda etapa da coleta corresponde à obtenção do solo destinado à fabricação dos corpos de prova para a caracterização mecânica com e sem tratamento, este processo foi realizado com a escavação manual de uma trincheira de 1,60 m de comprimento e 0,70 m de

largura. A coleta do solo foi realizada para três profundidades 1,00 m, 3,00 m e 6,00 m, as quais foram estabelecidas como as mais apropriadas para o foco da pesquisa, segundo os resultados obtidos da caracterização microbiológica do perfil. Salienta-se que a coleta em cada camada foi realizada na profundidade especificada $\pm 0,10$ m, ou seja, a espessura de coleta foi de 0,20 m.

Após a coleta do solo (Figura 3.2), o armazenamento das amostras coletadas nas duas etapas foi realizado em sacos plásticos duplos selados e guardados em ambiente à temperatura estável na câmara úmida do Laboratório de Geotecnia.



Figura 3.2 Coleta de solo (a) com trado (b) trincheira

3.2 AGENTES PRECIPITADORES

Duas metodologias foram empregadas para favorecer a elevação do pH do solo com a conseqüente precipitação de carbonato de cálcio. Os meios foram aplicados ao solo como sendo a água necessária para conseguir as umidades de compactação estabelecidas durante a pesquisa. Esclarece-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.

Destaca-se que durante a etapa de caracterização microbiológica do perfil cada um dos meios usados nas placas de Petri foi preparado em condições assépticas no laboratório de Microbiologia dos Alimentos da Faculdade de Medicina Veterinária (LAMAL) da UnB. Já quando adicionado ao solo a preparação do meio B4 realizou-se no laboratório de Geotecnia da UnB sem esterilizar nenhum dos componentes.

3.2.1 Meio nutritivo B4

Este meio foi proposto por Lee (2003) e empregado por Valencia (2009), Gómez (2009) e Valencia (2010) onde foram obtidos bons resultados como meio indutor da precipitação de CaCO_3 . A composição para a preparação do meio B4 é 15 g de acetato de cálcio, 4 g de

extrato de levedura e 5 g de glicose para cada 1000 ml de água destilada com um pH de aproximadamente 8.

3.2.2 Meios contendo feijão de porco (*Canavalia ensiformes*) e ureia

O segundo meio usado consistiu na adição direta ao solo da enzima uréase, oriunda do extrato de feijão de porco (*Canavalia ensiformes*), que é uma fonte rica dessa enzima. A finalidade da utilização da mesma foi gerar a hidrólise da ureia presente na composição do meio para posteriormente induzir a precipitação de carbonato de cálcio.

O meio foi constituído de 20g de feijão de porco, 20g de ureia e 15g de acetato de cálcio para cada 1000 ml de água destilada. Tal composição foi aleatória e está justificada no sentido de proporcionar cálcio e ureia suficientes para garantir as reações químicas necessárias durante a precipitação de CaCO_3 .

CAPÍTULO 4

METODOLOGIA

4.1 CARACTERIZAÇÃO MICROBIOLÓGICA DO PERFIL DE SOLO

A caracterização microbiológica foi realizada para cada uma das camadas do perfil mediante o uso de testes de laboratório, testes bioquímicos, para a identificação das colônias microbiológicas endógenas presentes nas mesmas. Todos os trabalhos para tal caracterização foram realizados no laboratório de Microbiologia dos Alimentos da Faculdade de Medicina Veterinária (LAMAL) da UnB. Esta caracterização teve como finalidade determinar o tipo de colônias bacterianas cultiváveis existentes no solo, e definir se estas são aptas para gerar a biomineralização de carbonato de cálcio mediante a adição dos meios nutritivos usados nesta pesquisa para induzi-la.

Nesta pesquisa, a metodologia usada para determinar os tipos de bactérias nativas do perfil de solo se baseou naquela seguida por Valencia (2009), que consiste na separação de 10g de solo de cada camada do perfil em sacos plásticos esterilizados (em condições assépticas), adicionando-se a cada amostra 90 ml de água peptonada para fazer uma diluição de 1:10. Do conteúdo do saco foi retirado 1,0 ml e colocado em um tubo de ensaio, que logo foi homogeneizado com 9 ml de água peptonada-tamponada 0,1% ficando esta diluição com uma concentração de 1:100 como mostrado na Figura 4.1. As duas diluições foram incubadas em estufas bacteriológicas durante 24 horas a 25°C. Terminado esse período cada uma delas foi distribuída em forma de estrias com a alça de platina esterilizada sobre duas placas de Petri contendo Ágar nutriente e duas com Ágar sangue de carneiro 5%. Após a distribuição, as

placas foram incubadas em estufas bacteriológicas durante 48 horas a 25°C, e posteriormente observou-se o crescimento bacteriano. Esclarece-se que as placas foram estriadas em duplicata para realizar a incubação em ambas as formas, aeróbica e anaeróbica, sendo que para esta última foi empregada uma jarra de anaerobiose contendo , a qual permite a incubação sem presença de oxigênio no interior da mesma. Quando incubadas as bactérias foram isoladas em placas de Petri com ágar sangue para verificar se as anaeróbicas são facultativas.

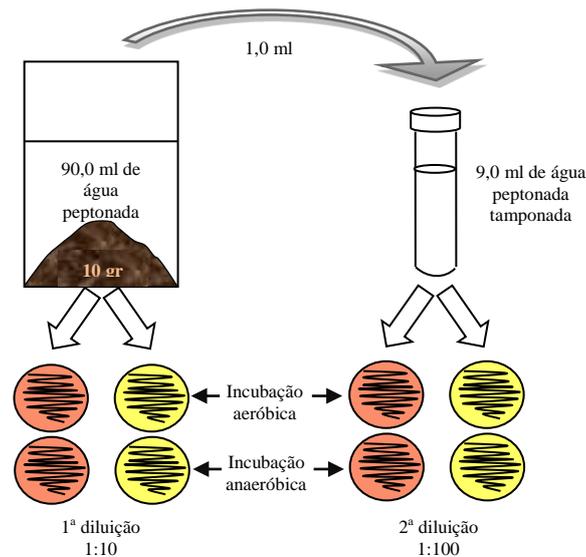


Figura 4.1 Esquema de diluição do solo (modificado de Valencia, 2009)

Já isoladas as bactérias, procedeu-se à identificação das mesmas mediante testes bioquímicos segundo a metodologia de Bergey que identificam o tipo de cepa bacteriana. Nestes testes, cada meio incorpora um substrato que se insere em um meio de cultivo e que a bactéria transforma ou não quando cresce, permitindo assim obter uma ideia do tipo de micro-organismo.

Os testes bioquímicos realizados nesta pesquisa foram divididos em etapas, com a finalidade de aperfeiçoar o processo de caracterização microbiológica do solo. Como etapa inicial, foram realizados testes de coloração de Gram, Catalase, Oxidase e Gram em KOH 3%, assim como a determinação da morfologia mediante o emprego de um microscópio óptico. Segundo os resultados obtidos foram efetuados testes de Oxidação - Fermentação (O/F), Indol, Citrato, Voges Proskauer (VP) e Vermelho de Metilo (VM). Já finalizada a bateria de testes bioquímicos para cada bactéria, procedeu-se à determinação do tipo de bactérias encontrados em cada camada do perfil de solo.

Para maior entendimento dos testes realizados durante a etapa de identificação bacteriana, cada um é descrito a seguir:

- *Coloração de Gram:* Esta técnica permite observar micro-organismos em função da capacidade para reter ou não determinadas substâncias corantes. Essa capacidade depende da carga da célula e do corante. Fundamenta-se na diferença estrutural da parede celular dos grupos de bactérias. As bactérias gram (+) têm uma camada de peptidoglicano na sua parede, já as gram (-) têm essa camada mais fina e têm também outra externa de lipopolisacáridica. Após a primeira coloração (cristal violeta) é realizada uma lavagem com etanol que retira o corante só nas bactérias gram (-), nas gram (+) a cor é retida e as células continuam azuis. As células gram (-) são em seguida tingidas com um corante de contraste (safranina) que gera uma cor rosa (Baron *et. al*,1994).
- *Determinação da morfologia bacteriana:* A morfologia celular também serve para caracterizar as bactérias, as quais podem ser bacilos, cocos ou espirilos, estes últimos são pouco comuns no solo.
- *Teste de KOH 3% (hidróxido de potássio):* Este teste é baseado na reação diferencial produzida pelo contato direto da cepa bacteriana com o hidróxido de potássio. O procedimento para realizar o teste consiste em colocar a cepa bacteriana sobre uma lâmina de vidro, depois se põem duas gotas de KOH 3% e com ajuda de uma alça se mistura a cepa durante 30 segundos. Para verificar a reação, a alça é elevada aproximadamente 1,0 cm durante o processo de mistura, se observados fios viscosos a bactéria é Gram (-), no caso contrário a bactéria é Gram (+).
- *Prova de Catalase:* Quando uma pequena quantidade de um organismo que produz catalase é introduzida em peróxido de hidrogênio, rapidamente são formadas bolhas de oxigênio e o produto da atividade enzimática é obtido. Este teste deve ser realizado em colônias livres de Agar sangue, pois o Agar sangue inibe a produção das bolhas nas bactérias que são catalase positivas (Baron *et. al*,1994).
- *Prova de Oxidase:* A pequena quantidade de ácido produzido por fermentadores e certos oxidantes pode ser mascarada por grandes quantidades de produtos alcalinos do metabolismo proteico. As reações de fermentação de carboidratos podem ser determinadas através de testes de tais organismos em um meio com proteínas mínimas (Baron *et. al*,1994). O teste consiste em colocar um pouco da colônia em contato com a fita de oxidase e se aguardar alguns segundos para observar o resultado. O teste é positivo caso a fita de oxidase passe a ter uma coloração roxa, e negativo caso a sua coloração passe a ser amarela.

- *Indol*: Bactérias que produzem enzima triptofanase são capazes de degradar o aminoácido triptofano em ácido pirúvico, amônia e indol. Mediante este teste a liberação de indol é detectada em um cultivo bacteriano. Para realizar o teste a colônia é cultivada durante 24-48 horas em caldo contendo triptofano em abundância. Posteriormente se adicionam 5 gotas do reagente de Kovacs. Se é produzido um anel de cor vermelha na superfície do caldo o teste é positivo.
- *Triplo açúcar ferro (TSI)*: É um meio nutriente que permite observar a capacidade de fermentar açúcares (glucose, sacarose e lactose) e a possível produção de ácido sulfídrico (H₂S) e gás. Para realizar este teste semeia-se a colônia enfiando-a adentro do ágar com a agulha e depois estriando na superfície do Ágar. Os resultados podem expressar a fermentação de sacarose e lactose na superfície deixando-a de cor amarela. A fermentação de glicose é observada quando o Ágar vira amarelo no fundo do tubo. Caso haja formação de sulfeto de hidrogênio o tubo adquire cor muito escura. Quando há deslocamento do Agar indica que houve produção de gás. O teste é negativo quando não se apresenta nenhum dos fenômenos descritos e o meio continua vermelho.
- *Hidrólise de gelatina*: Este teste tem como objetivo determinar a capacidade do micro-organismo de excretar a enzima gelatinase, a qual degrada a gelatina. Se há hidrólise de gelatina, o meio mantém-se líquido depois de refrigerado indicando uma reação positiva. No caso contrário o meio solidificar-se-á após a refrigeração.
- *Vermelho de Metila (VM)*: Este teste permite determinar a formação de ácidos produzidos durante a fermentação de um carboidrato. Para determinar o tipo de reação devem-se colocar gotas de vermelho de metila. Caso ocorra reação positiva o meio torna-se vermelho, indicando um pH ácido (pH 4,2) e a fermentação de glicose. No caso contrário, o meio fica amarelo e o pH é aproximadamente 6,3.
- *Voges Proskauer (VP)*: Permite determinar a formação de acetil-metilcarbinol a partir da fermentação de glicose. Adiciona-se alfa-naftol (5%) e KOH (40%) ao meio depois de incubada a bactéria. O teste é positivo se o meio fica de vermelho a rosa claro indicando a presença de acetil-metilcarbinol. Quando o resultado do teste for negativo o meio fica de incolor a âmbar muito claro.
- *Oxidação – Fermentação*: O propósito do ensaio é determinar se um organismo pode metabolizar glicose mediante processos de oxidação ou fermentação. Para realizar o teste são usados três tubos, um para controle, outro para oxidação incubada em condições aeróbicas e outro para fermentação, o qual é incubado em condições anaeróbicas colocando

aproximadamente um centímetro de óleo mineral na superfície para evitar a presença de oxigênio. Se o tubo aeróbico fica amarelo indica que há oxidação, e se o tubo anaeróbico fica também amarelo, há fermentação. Pode ocorrer que ambos os tubos fiquem amarelos ou não respectivamente indicando ou não oxidação e fermentação ao mesmo tempo.

- *Redução de nitrato:* Serve para determinar a capacidade de um organismo de reduzir nitrato em nitritos. Para realizar o teste são semeados e incubados tubos com caldo nitrato durante no mínimo 18 horas. Posteriormente adicionam-se os reativos A e B de Griess-Ilosvay (aproximadamente 1 ml), se é gerada uma mudança de cor durante os seguintes 30 segundos, tornando o meio vermelho a prova é positiva.
- *Ureia:* Este teste serve para determinar se uma bactéria produz a enzima urease, a qual hidrolisa a ureia. Neste teste são produzidos amônia e anidrido carbônico. A prova é realizada semeando a bactéria na superfície do meio que está com pH neutro e se inocula, quando a prova é positiva a formação de amônia alcaliniza o meio de cultivo deixando-o de cor rosa. Quando o resultado é negativo, o meio torna-se amarelo.
- *Citrato:* Determina se um organismo pode crescer usando o citrato como única fonte de carbono provocando alcalinização do meio que se manifesta quando esse se torna azul devido a conter o indicador de pH chamado azul de brotimol. Para fazer o teste é necessário semear a bactéria em meio de citrato de *Simmons* e verificar se há crescimento e mudança de cor.
- *Agar MacConkey:* Este meio é utilizado para o isolamento de *Bacillus* Gram (-) de grande desenvolvimento, aeróbicos e anaeróbicos facultativos, mediante a inibição do crescimento dos *Bacillus* Gram (+). Permite diferenciar bactérias que fermentam ou não lactose. Quando existe fermentação diminui o pH ao redor da colônia gerando uma mudança na cor do meio. Caso não haja fermentação as colônias não apresentam cor.
- *Descarboxilase de aminoácidos:* Algumas espécies bacterianas produzem enzimas que geram a descarboxilação dos aminoácidos convertendo-os em aminas. Isso gera um incremento no pH do meio. O teste é realizado colocando-se em três tubos meio contendo o indicador de pH púrpura de bromocresol e um dos três aminoácidos usados (lisina, ornitina ou arginina a 1% respectivamente). Cada tubo é selado com óleo mineral e incubado com a bactéria. Também se deve incubar um tubo com o meio, mas sem aminoácidos, visando ter um controle. A prova é positiva quando o pH aumenta gerando um meio de cor púrpura, caso contrário esse fica de cor similar à do tubo de controle.

Testes tais como fermentação de sacarose e lactose também foram, quando necessários, realizados visando complementar a bateria de testes bioquímicos, e assim ajudar na identificação das bactérias, pois em alguns casos os testes já explicados não permitiram definir claramente o tipo de micro-organismos presentes no solo.

Quando concluídos todos os testes bioquímicos foram usados fluxogramas e tabelas de identificação de bactérias apresentados nos livros de Baron *et al.* (1994) e Silva & Oliveira (2007) para definir o gênero de cada uma delas. Depois de identificadas, as bactérias são conservadas de forma individual em pequenos frascos contendo ágar nutriente, os quais são armazenados na geladeira para mantê-las vivas durante o tempo da pesquisa.

4.2 DETERMINAÇÃO DA BIOPRECIPITAÇÃO IN VITRO DE CaCO_3

Uma vez finalizado o processo de caracterização e identificação microbiológica do perfil de solo, cada uma das bactérias isoladas foi semeada em placas de petri, uma delas contendo meio B4 e ágar e a outra contendo enzima urease e ágar visando verificar em qual dos meios gerava-se o melhor crescimento bacteriano e a melhor precipitação de CaCO_3 . Esclarece-se que a quantidade de ágar adicionada aos meios foi de 12 g para cada 1000 ml de água. O processo para inocular as bactérias foi realizado colocando 4 pontos de cada colônia bacteriana na placa de Petri (Figura 4.2). Cabe salientar que no caso das placas com feijão de porco, unicamente foram avaliadas as bactérias urease positivas, pois aquelas que são urease negativas não apresentam um bom crescimento em meios nutritivos com altos conteúdos de ureia como é o caso do meio que foi usado na pesquisa (Hammes *et. al.*, 2003).



Figura 4.2 Incubação de bactérias isoladas na placa de petri com meio indutor de precipitação B4

Para realizar os testes com o feijão de porco foram preparados meios de cultura contendo feijão de porco e outros sem adição dele, visando verificar o crescimento das colônias

bacterianas. Cada meio foi preparado em duplicata com a finalidade de esterilizar uma das placas e deixar a outra sem esterilizar, visando efetuar comparações entre os resultados que permitissem aplicações mais próximas à realidade, ou seja, procurou-se analisar um procedimento que simulasse o que normalmente seria feito em campo. Salienta-se que também foram usados dois tipos de ureia, pura e aquela que serve como fertilizante de plantas. O objetivo de empregar estes dois tipos de ureia foi verificar se o tratamento do solo funcionaria e, assim poder minimizar custos de insumos. É importante salientar que a verificação da precipitação com meio B4 sem esterilizar também foi verificada. Com base no descrito, os testes para a verificação da precipitação de CaCO_3 com feijão de porco foram realizados como exposto na Figura 4.3.

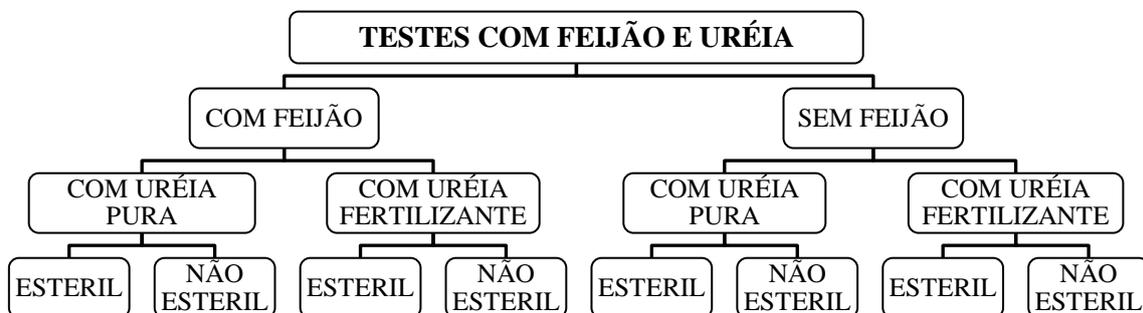


Figura 4.3 Descrição dos testes de precipitação contendo feijão de porco.

Quando semeadas as bactérias nos meios B4 e com feijão de porco, todas as placas foram incubadas na estufa a 25°C durante 15 dias, tempo necessário para observar se houve algum tipo de crescimento bacteriano e de precipitação (Baskar et al., 2006).

4.3 MICROSCOPIA PARA DETERMINAR CARBONATOS

Quando terminado o período de incubação de cada bactéria nos meios usados na pesquisa descritos no item anterior, as placas de petri foram retiradas da estufa e levadas ao laboratório petrográfico do Instituto de Geociências da UnB para verificar a presença de carbonatos produzidos pelas bactérias.

Quando colocadas no microscópio, as placas foram observadas com dois tipos de luz, com nicóis paralelos e com nicóis cruzados. A finalidade dessas duas formas de observar as placas é ver a variação na luz que permite diferenciar entre os cristais de carbonato amorfos e os que estão bem formados.

4.4 PROVAS DE CARBONATO DE CÁLCIO COM HCl

Como o foco da pesquisa é gerar a indução da precipitação de carbonato de cálcio, via processos metabólicos dos micro-organismos endógenos do solo, é necessário realizar a verificação da produção de tal mineral nas precipitações *in vitro*. O CaCO_3 é um mineral que reage com os ácidos. Isso facilita a possibilidade de fazer testes para determinação da presença destes no solo, o que torna comum este tipo de teste.

No caso específico de solos alguns testes como o emprego de ácido clorídrico (HCl) são muito frequentes. O teste consiste em se aplicar uma quantidade de ácido sobre a amostra de solo, normalmente só é necessário uma gota, e verificar se são geradas bolhas de ar que são facilmente visíveis ao olho nu. Caso elas surjam, o teste é positivo e indica a existência de CaCO_3 no solo e, caso contrário indica que este composto mineral não faz parte da composição mineralógica do solo.

As bolhas observadas ao adicionar o ácido clorídrico (HCl) são o resultado da reação que se gera quando o carbonato de cálcio (CaCO_3) reage, liberando cloreto de cálcio (CaCl_2), gás carbônico (CO_2) e água (H_2O) como descrito na equação 9.



Durante a pesquisa estes testes foram realizados em duas etapas, a primeira consistiu na realização do mesmo sobre os precipitados produzidos diretamente pelas bactérias nas placas de petri contendo os meios empregados depois de 15 dias de incubadas. Salienta-se que para eliminar a possibilidade da existência de CaCO_3 nas bactérias puras, essas também foram testadas quando incubadas em ágar nutriente.

O procedimento seguido foi iniciado pegando-se parte das bactérias inoculadas e do precipitado ao redor da mesma com a alça e colocando-os em uma lâmina de vidro (identificando cada uma). Posteriormente pingou-se uma gota de HCl (concentração 70,0%) sobre cada precipitado e cada bactéria para observar se ocorria ou não produção de bolhas de ar (efervescência). Os resultados das bactérias puras foram comparados com os obtidos para as bactérias em meio indutor da precipitação de CaCO_3 .

A segunda etapa foi realizada diretamente sobre o solo proveniente dos corpos de prova após serem realizados os respectivos ensaios de caracterização mecânica do solo. O procedimento do ensaio é muito simples e consiste em pingar uma gota de HCl sobre uma pequena quantidade de solo e observar se acontece alguma reação de efervescência. Este teste

também se realizou em amostras de solo não tratadas a fim de verificar se elas encontram-se isentas de carbonato.

Partindo dos resultados obtidos para os itens 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4 foram definidas as três camadas de solo a serem estudadas nas etapas seguintes da pesquisa.

4.5 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO PERFIL

Após a coleta do solo foram realizados ensaios para a caracterização física de cada uma das camadas do perfil de solo. A caracterização consistiu na determinação do teor de umidade, massa específica dos grãos, limites de Atterberg e caracterização MCT (Miniatura Compactada Tropical) expedita.

Todos os ensaios executados durante esta etapa da pesquisa foram realizados no Laboratório de Geotecnia da UnB, seguindo os procedimentos estabelecidos pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e metodologias estabelecidas pelo Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER).

4.5.1 Determinação do teor de umidade natural de cada camada

Quando coletado o solo do perfil no campo, amostras de solo de cada camada foram separadas para realizar os ensaios de determinação de umidade natural no laboratório. O método de ensaio foi o da estufa regulamentado pela norma NBR 6457/86.

4.5.2 Massa específica dos grãos de solo (Gs)

Os ensaios de determinação da massa específica dos grãos foram realizados para o solo de cada uma das camadas do perfil. A norma usada para executar os ensaios foi a NBR 6508/84.

4.5.3 Limites de Consistência

Os limites de consistência permitem determinar o valor do índice de plasticidade (IP) a partir da diferença entre o limite de liquidez (w_L), que foi obtido segundo a norma NBR 6459/84 e, o limite de plasticidade (w_p) obtido conforme à norma NBR 7180/84. Partindo dos valores dos limites de consistência foi classificado o solo mediante o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS).

Esclarece-se que os ensaios para determinar os limites de consistência foram realizados para amostras de solo secas ao ar conforme previsto em norma.

4.5.4 Caracterização Miniatura Compactada Tropical (MCT) Expedita

A classificação MCT expedita ou método dos anéis é muito usada na atualidade, pois permite determinar adequadamente a classe MCT dos solos tropicais, além de ser uma metodologia bastante simples (Nogami & Villibor, 2009). Segundo essa metodologia os solos podem ser classificados em dois grandes grupos segundo o seu comportamento, laterítico ou não laterítico, a partir dos valores de penetração e de contração diametral obtido durante o ensaio.

O método de classificação MCT foi apresentado por Nogami & Villibor com a finalidade de obter uma identificação mais apropriada dos solos tropicais visando sua aplicação na pavimentação, pois nenhuma das propostas tradicionais teve o desejável desempenho na previsão de comportamento para estes solos. Desde então, varias modificações do método têm sido desenvolvidas para realizar a caracterização dos solos tropicais. Em 1991 foi observado que a classificação MCT expedita ou método dos anéis, devido a sua simplicidade, permitia determinar adequadamente a classe MCT dos solos mais rapidamente (Nogami & Villibor, 2009).

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 1,0 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 pelas 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 verificada a desagregação em água.

Na classificação de solos lateríticos pelo procedimento MCT expedito utiliza-se a Figura 4.4. 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 fazer 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 eles se cruzam definindo a classificação do solo.

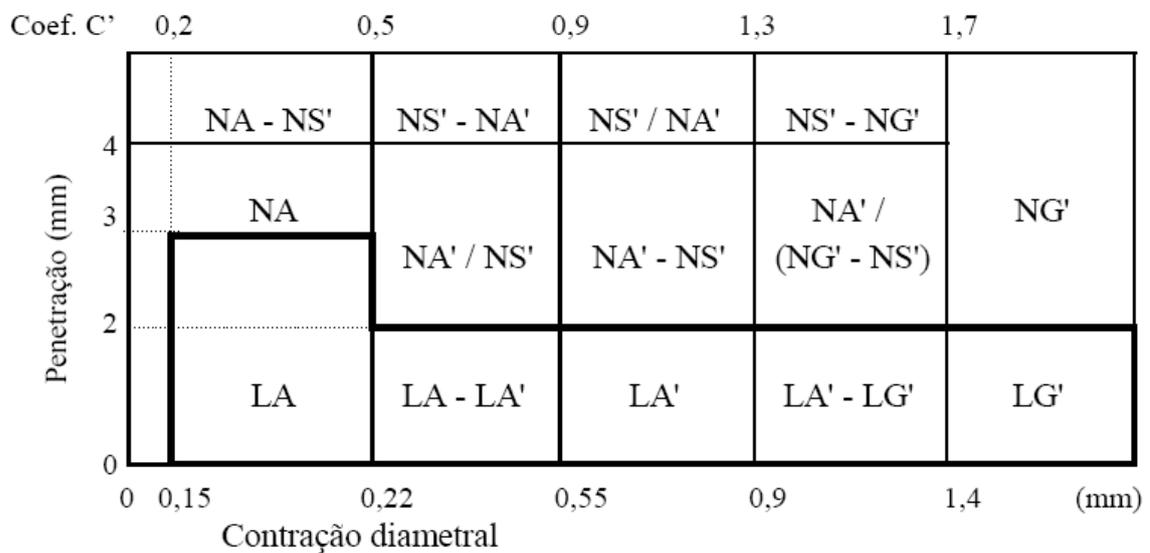


Figura 4.4 Carta de classificação da metodologia MCT expedita

Partindo da explicação anterior foram realizados ensaios de caracterização MCT expedita para cada uma das camadas do perfil de solo, com a finalidade de verificar as variações das características lateríticas com a profundidade.

4.6 CARACTERIZAÇÃO COMPLEMENTAR DAS CAMADAS ESTUDADAS ANTES DE FABRICAR OS CORPOS DE PROVA

Após os ensaios de caracterização física de todas as camadas do perfil foram realizados ensaios complementares nas três camadas de estudo da pesquisa, visando ter os dados necessários para continuar com a etapa de caracterização mecânica das mesmas quando realizado o tratamento com os meios.

4.6.1 Análise Granulométrica por sedimentação

Foram realizados ensaios de granulometria para determinar a distribuição granulométrica e o teor de agregados nas três camadas de solo estudadas. A metodologia do ensaio se baseia na norma NBR 7181/84 tendo sido adotada a dispersão das partículas com uso de defloculante e sem uso do mesmo.

Os ensaios foram realizados com amostras de solo ainda com a umidade natural, colocadas, segundo o caso de ensaio sem ou com defloculante, respectivamente, em água destilada ou em solução defloculante diluída (durante 24 horas). Posteriormente as amostras foram peneiradas na peneira N° 10. O material que passou foi usado para o ensaio de sedimentação realizado normalmente como estabelecido na norma já mencionada. Os grãos retidos foram secos e submetidos à análise granulométrica por peneiramento.

4.6.2 Ensaio de Minicompactação

Esses ensaios foram realizados, na energia intermediária usando-se 6 golpes com o soquete pesado de cada lado do corpo de prova, conforme estabelece a norma DNER-ME 228/94. A preparação das amostras naturais consistiu em secar o solo até ele atingir a umidade necessária para a compactação. Posteriormente, a metade do solo correspondente a cada ponto foi passada pela peneira de 4,76 mm e outra metade deixou-se sem passar, assim foram obtidas duas curvas de compactação para o solo natural, a fim de verificar os efeitos da preparação do solo sobre as características de compactação do mesmo.

Ensaio adicionais foram realizados para as amostras de solo das três camadas, com o intuito de verificar o comportamento de cada solo quando da adição do nutriente. Em todos os casos o solo foi seco ao ar partindo da umidade natural até atingir uma umidade que permitisse adicionar o nutriente em quantidade igual a 3,0 %. Com as amostras já prontas, realizaram-se dois ensaios de compactação, o primeiro para o solo logo depois da adição do nutriente, o segundo com cura de 24 horas depois de agregado o meio. A finalidade foi avaliar a possibilidade de permitir garantir uma melhor homogeneização do solo após acrescentar o meio B4.

4.6.3 Ensaio preliminar de compressão simples

Foram executados ensaios de compressão simples em corpos de prova compactados na umidade ótima para cada camada, a fim de verificar o efeito do tratamento na resistência à compressão simples do solo.

A preparação das amostras para o estudo consistiu em secar o solo partindo da umidade natural até atingir a umidade ótima de compactação menos 3,0%, posteriormente colocou-se o aditivo com um aspersor para alcançar a umidade necessária para a compactação homogeneizando o solo para garantir uma boa distribuição da água adicionada. A mistura preparada foi colocada em sacos plásticos hermeticamente fechados; posteriormente foi armazenada em ambiente à temperatura de aproximadamente 25 °C por 24 horas. Foram então compactados os corpos de prova de 5,0 cm de diâmetro e 10,0 cm de altura. A sequência do procedimento é apresentada na Figura 4.5.

Salienta-se que a compactação foi realizada mediante um processo semiestático com o uso de uma prensa hidráulica, na qual se fixa uma taxa de deslocamento do pistão aplicando-se, portanto, uma carga crescente até atingir o peso específico desejado, momento em que o processo é interrompido.

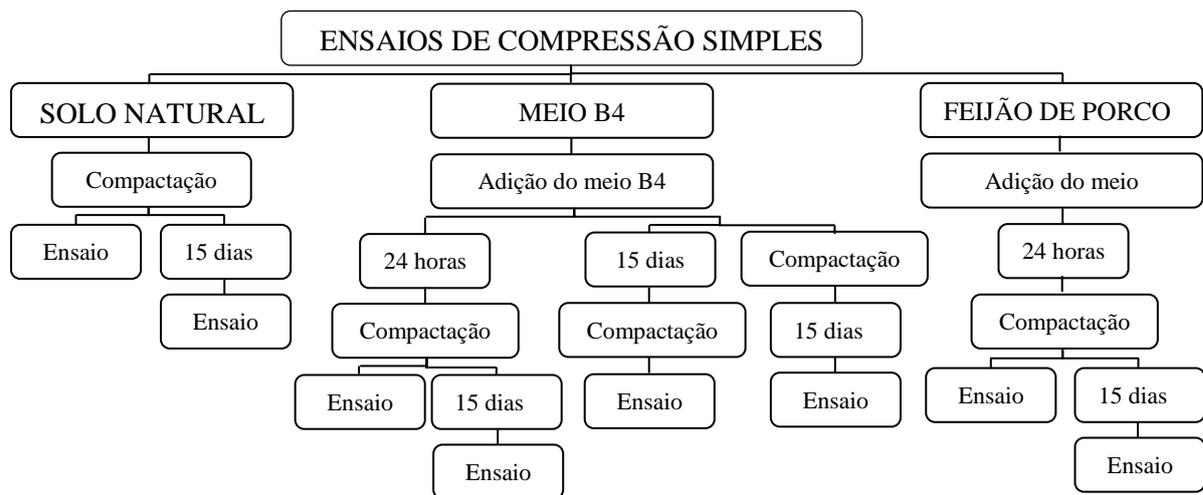


Figura 4.5 Fluxograma dos ensaios de compressão simples

Os corpos de prova para estes ensaios foram compactados em 3 camadas sucessivas. Esses mesmos ensaios também foram realizados para corpos de prova do solo de cada camada sem tratamento com o intuito de obter um padrão de comparação dos resultados. A especificação técnica adotada como referência para realizar esses ensaios foi a norma NBR 12770/92.

4.6.4 Análise mineralógica por difração de raios-X

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. A técnica usada para realizar as análises foi o método do pó que consiste em pulverizar e compactar a seco as amostras na lâmina com cavidade, para posteriormente serem levadas ao difratômetro de raios-X. A análise foi feita em equipamento RIGAKU Ultima IV operando com tubo de cobre, no intervalo de 3 a 80° - ângulo 2 teta de difração, velocidade de varredura de 5°/minuto e passo de 0,05°.

4.6.5 Determinação do pH

O pH é muito importante em solos, pois este exerce grande influência sobre as características de floculação e agregação das partículas e por consequência no arranjo estrutural entre vazios e sólidos do solo (Farias, 2003). Para realizar as medidas de pH foi empregado um potenciômetro, mais conhecido como pH-metro, o qual mede a concentração de íons de hidrogênio na solução de solo.

Foram efetuadas determinações de pH em água e KCl, na relação 10 ml de solo e 25 ml de água ou de solução de KCl (1M) conforme o caso para as três camadas de solo usadas na pesquisa. A diferença entre os valores de pH ($\Delta\text{pH} = \text{pHKCl} - \text{pHH}_2\text{O}$), quando positiva indica alto conteúdo de óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio e quando negativa, tem-se predominância de argilas silicatadas. Destaca-se que essas determinações foram realizadas para o solo das três camadas sem nenhum tratamento com meio.

4.7 DETERMINAÇÃO DO POTENCIAL AGREGADOR DO NUTRIENTE B4

Para determinar se o meio nutritivo B4 devia ser adicionado ao solo antes ou depois do processo de compactação, foram realizados ensaios de granulometria para determinar o potencial agregador ou desagregador do nutriente no solo quando adicionado às três camadas estudadas.

Os ensaios foram realizados após a adição do nutriente de 1, 2, 3 e 4 horas. Foram feitos também ensaios sobre amostras com um tempo de cura de 15 dias com o nutriente. Para estes ensaios também se usou defloculante. Cabe ressaltar que para ter um padrão de comparação,

também foi realizado o ensaio para amostras de solo sem adição de nutriente, com e sem defloculante, de forma imediata e na umidade natural de campo.

A metodologia seguida é a descrita pela norma NBR 7181/84, com algumas variações como descrito a seguir. Todos os ensaios foram realizados com amostras de 80 g úmidas, isso devido a que uma secagem até a umidade higroscópica do solo poderia interferir na vida microbiana existente dentro de cada amostra, o que seria refletido no nível de precipitação de carbonato de cálcio quando adicionado o nutriente ao solo. Tem-se ainda que a secagem é susceptível de afetar a própria estabilidade dos agregados presentes no solo (Roseno e Camapum de Carvalho, 2007).

A preparação das amostras com adição de nutriente se faz deixando secar cada uma delas até atingir uma umidade de 15%. Quando atingido o peso desejado é adicionado o nutriente B4, para que a amostra chegue à mesma umidade da amostra de solo natural, é importante fazer uma boa homogeneização para garantir a distribuição do meio em todo o solo. A partir do momento da aplicação do tratamento foi medido o tempo de ação do nutriente para cada amostra (1, 2, 3, 4 horas e 15 dias) e quando concluído cada período, foi realizado o ensaio de granulometria.

4.8 CARACTERIZAÇÃO ESTRUTURAL PRELIMINAR

A estrutura faz referência ao arranjo e à união dos agregados do solo e dentre outros, é um fator que pode exercer grande influencia sobre as características físicas e comportamentos mecânico e hidráulico do mesmo. Portanto, é de suma importância o conhecimento dos agrupamentos e organização das partículas que constituem o solo, pois dessa forma tem-se uma ideia da estabilidade do mesmo, além de possibilitar um melhor entendimento das prováveis variações que se apresentem durante o processo de biomineralização.

A caracterização estrutural foi realizada a partir de imagens obtidas com uma lupa de luz natural de alta resolução da “*ProScope HR*” da *Advantgarde* que pertence ao Programa de Pós-graduação em Geotecnia da UnB. Esse equipamento permite a obtenção de imagens com aumentos de 50 vezes, 100 vezes, 200 vezes e 400 vezes.

As amostras utilizadas para realizar esta caracterização são provenientes dos corpos de prova compactados durante os ensaios de compactação miniatura realizados para definir a curva de compactação do solo antes de depois de realizado o tratamento.

4.9 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DO SOLO COMPACTADO COM E SEM ADIÇÃO DO MEIO B4

Para esta etapa da pesquisa optou-se por adotar uma série de ensaios destinados ao estudo do comportamento mecânico do solo. A compactação dos corpos de prova foi realizada no laboratório de Geotecnia da UnB. Adotou-se o processo semiestático mediante o uso de uma prensa hidráulica, para uma energia de compactação equivalente à do Proctor Intermediário.

É importante ressaltar que foram confeccionados corpos de prova em duas condições de umidade de compactação a fim de avaliar a variação das propriedades do solo em função da umidade de compactação, umidade ótima e umidade ótima – 3,0 %, esse último foi denominado como solo compactado no ramo seco. O processo para atingir cada uma dessas umidades consistiu na secagem do solo a partir da umidade natural até um conteúdo de água menor em 3,0% que o teor de umidade estabelecido para a compactação. Quando obtido esse teor de umidade, foi adicionado o meio indutor como sendo a água necessária para atingir a umidade de compactação estabelecida. O solo foi homogeneizado e colocado em sacos de plástico selados, os quais foram armazenados na câmara úmida durante 24 horas. Uma vez terminado esse período de repouso os corpos de prova foram compactados e preparados para a cura, que foi realizada mediante dois processos, o primeiro consistiu em recobrir os corpos com filme de PVC e de alumínio e coloca-los dentro de sacos de plástico hermeticamente fechados. Posteriormente, os corpos foram armazenados na câmara úmida em caixas de isopor seladas a fim de manter constante a umidade e temperatura das amostras durante o tempo estabelecido para a cura.

O segundo tipo de cura foi enterrando todos os corpos de prova numa trincheira localizada no Campo Experimental do Programa de Pos-Graduação em Geotecnia da UnB a uma profundidade de 1,0 m, pois temia-se que o isolamento dos corpos de prova da atmosfera adotada na primeira metodologia pudesse inibir a atuação bacteriana. A Figura 4.6 expõe os dois tipos de cura usados durante a pesquisa.



(a)



(b)

Figura 4.6 Tipos de cura (a) Enterrado (b) Câmara úmida

Cabe destacar, que além dos corpos de prova com tratamento, se confeccionaram outros sem adição de nutriente, em condições de compactação, armazenagem e ensaio similares às dos corpos com adição de meio B4. Tal procedimento teve por objetivo avaliar eventuais efeitos tixotrópicos sobre o solo. Partindo da explicação anterior foram obtidos os tipos de amostras descritos na Tabela 4.1, os quais foram os mesmos para os corpos de prova compactados tanto no ramo seco, quanto na umidade ótima.

Tabela 4.1 Tipos de amostras usadas durante a pesquisa

CAMADA	NOTAÇÃO	ESPECIFICAÇÃO
1,0 m	NE	Solo sem nenhuma adição enterrado
	TE	Solo tratado enterrado
	N	Solo sem nenhuma adição curado em laboratório
	T	Solo tratado curado em laboratório
3,0 m	NE	Solo sem nenhuma adição enterrado
	TE	Solo tratado enterrado
	N	Solo sem nenhuma adição curado em laboratório
	T	Solo tratado curado em laboratório
6,0 m	NE	Solo sem nenhuma adição enterrado
	TE	Solo tratado enterrado
	N	Solo sem nenhuma adição curado em laboratório
	T	Solo tratado curado em laboratório

Os períodos de cura estabelecidos para as amostras compactadas no ramo seco foram de 7 dias, 15 dias, 30 dias e 90 dias. Já nos corpos de prova compactados na umidade ótima tais idades foram de 15 dias, 45 dias e 70 dias. Nota-se que as idades de cura variaram entre o solo compactado no ramo seco e o compactado na umidade ótima, isso deveu-se a que inicialmente foram realizados todos os ensaios com os corpos de prova compactados no ramo

seco e, com os resultados obtidos, optou-se por adotar as idades de cura citadas para os corpos cuja umidade de compactação foi a ótima.

Terminado cada período de cura, os corpos de prova foram retirados do local de armazenamento para a execução dos ensaios de caracterização do comportamento mecânico. Aqueles destinados à determinação da curva característica foram retirados 15 dias antes de finalizar o período de cura com o objetivo de colocar os papéis filtro e esperar o tempo de equilíbrio requerido para determinar a sucção do solo.

4.9.1 Resistência à compressão simples

Os corpos de prova para estes ensaios foram compactados em 5 camadas. Cada um deles com diâmetro de 50 mm e altura de 100 mm. Durante o processo de compactação a superfície da camada já compactada era escarificada a fim de garantir uma boa aderência entre essa e a seguinte. A velocidade de aplicação da carga durante o ensaio foi de 1,0 mm/min. Todos os ensaios foram realizados seguindo o procedimento descrito pela norma NBR 12770/92.

4.9.2 Ensaio de Mini CBR

Quando finalizado o período de cura, os corpos foram colocados em cilindros de PVC tripartidos, mantidos juntos com abraçadeiras metálicas, com o intuito de evitar variações na pressão de confinamento dos corpos de prova que conduzissem a divergências nos resultados. As abraçadeiras foram apertadas com o mesmo torque mediante o emprego de uma parafusadeira elétrica. Segundo Delgado (2002), esse tipo de confinamento está longe de ser semelhante ao obtido quando a amostra se mantém dentro do molde onde foi compactada. Apesar de tal condição poder afetar os resultados, ela foi adotada para todos os corpos de prova durante a execução dos ensaios, pois acredita-se que ela limita a influência do desconfinamento se simplesmente retirados os corpos de prova dos moldes.

A metodologia seguida para a execução dos ensaios de mini CBR é a estabelecida pela norma DNER-ME 254/97.

4.9.3 Determinação da curva característica de retenção de água

Durante a pesquisa determinações de sucção matricial foram realizadas pela técnica do papel filtro em corpos de provas, seguindo a metodologia exposta pela norma americana ASTM D5298/92, com algumas modificações usadas por Lima (2003), por exemplo, usando-se três papéis filtro. Para determinar a sucção são usados três papéis filtro sobrepostos, o

primeiro deles colocado em contato direto com o corpo de prova. Salienta-se que o papel filtro central é de diâmetro menor, conforme apresentado na Figura 4.7 e apenas o primeiro entra em contato direto com o solo e é passível de contaminação por solo sendo por isso descartado. Já os outros dois papéis são usados para determinar a sucção de cada corpo de prova, sendo o do meio o principal e o outro usado para eventuais correções que se fizerem necessárias.

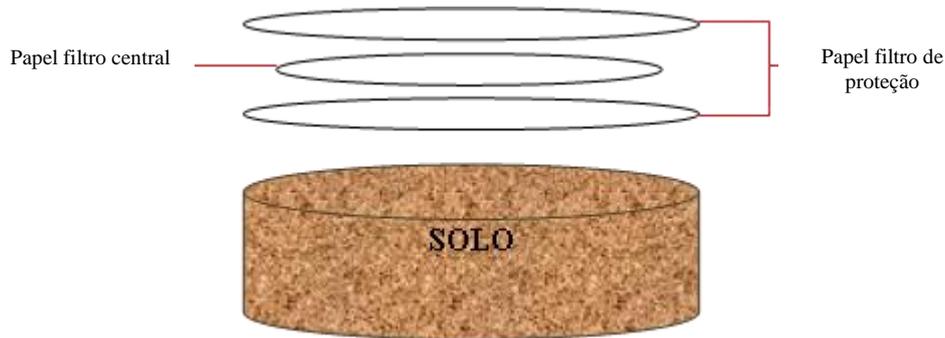


Figura 4.7 Montagem do ensaio de sucção

4.9.4 Ensaios de compressão diametral

Para a execução dos ensaios de compressão diametral a metodologia adotada quanto ao princípio do ensaio foi a estabelecida pela norma DNER-ME 138/94. Quando terminado o ensaio é determinada a umidade e o peso específico, este utilizando-se o método da balança hidrostática (NBR-10838/88). É importante salientar que os corpos de prova empregados para o ensaio são os mesmos usados para a determinação da curva característica, razão pela qual apresentavam diferentes umidades. Após a pesagem dos papéis filtro cada corpo é submetido ao ensaio. O ensaio é realizado com uma velocidade de aplicação da carga de 1,0 mm/min.

4.10 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO SOLO COMPACTADO COM E SEM ADIÇÃO DO MEIO B4

O solo destinado aos ensaios de caracterização física é proveniente dos corpos de prova após os ensaios de caracterização do comportamento mecânico, objetivando avaliar a estabilidade e as características do solo depois de induzida a precipitação de CaCO_3 . Cada ensaio foi realizado sobre condições iguais, tanto para o solo natural quanto para o solo com tratamento.

A preparação das amostras foi iniciada destorroando-se os corpos de prova logo após os ensaios destinados ao estudo do comportamento mecânico, sem que o solo se submetesse a

qualquer processo de secagem. A amostra foi em seguida homogeneizada e armazenada em sacos de plástico a fim de manter a umidade até o momento dos ensaios. Os ensaios de caracterização física foram realizados deixando transcorrer no mínimo 24 horas e no máximo dois dias após a preparação do solo.

Os ensaios realizados durante a etapa de caracterização física foram os seguintes:

- Limites de consistência
- Caracterização MCT (Miniatura Compactada Tropical) Expedita
- Massa específica dos grãos (Gs): Estes ensaios foram realizados mediante o emprego de um pentapicnometro modelo pentapyc 5200e da “*Quantachrome Instruments*”. Esse equipamento usa o principio de Arquimedes (deslocamento de fluido) e a lei de Boyle (expansão de gás) para determinar a densidade e o volume verdadeiros de materiais sólidos. O uso do gás garante uma maior acurácia, pois ele penetra com maior facilidade nos poros finos. Embora possam ser usados vários tipos de gás é recomendável usar o hélio. O equipamento é mostrado na Figura 4.8.



Figura 4.8 Pentapicnômetro

- Análise granulométrica: As análises nesta etapa realizaram-se mediante o emprego do granulômetro a laser modelo “Microtrac s3500” no Laboratório de Geotecnia de UnB (Figura 4.9). Três tipos de análises foram feitas para verificar o efeito do tratamento, solo em água, solo com ultrassom e, solo com ultrassom mais defloculante e novamente ultrassom. Destaca-se que quando usado o defloculante, uma gota do mesmo foi pingada no reservatório do granulômetro e deixou-se atuar durante dois minutos antes de aplicar novamente o ultrassom, em seguida, procedeu-se a realização da análise. O tipo de defloculante empregado nos testes foi o surfactante (octilfenol etoxilado – TRITON-X 100), o qual foi recomendado e fornecido pela empresa distribuidora do equipamento.

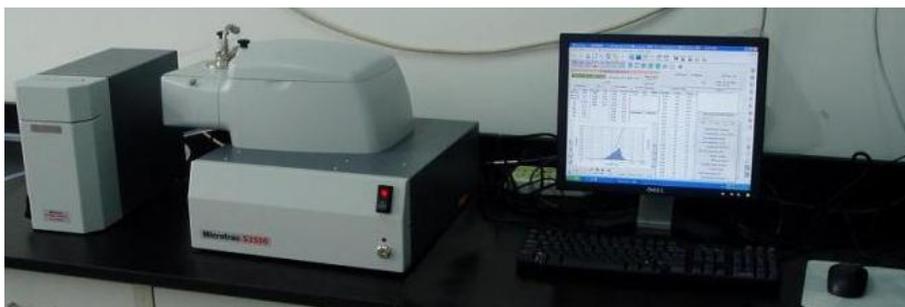


Figura 4.9 Granulômetro a laser

4.11 DETERMINAÇÃO DO pH APÓS O TRATAMENTO

Estas medidas de pH foram realizadas para as amostras de solo após os ensaios de caracterização mecânica na última idade de cura, tanto nas amostras compactadas no ramo seco, quanto nas compactadas na umidade ótima. Cabe ressaltar que o procedimento seguido para as determinações foi o descrito no item 4.6.5.

4.12 CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA APÓS O TRATAMENTO

Durante a pesquisa as análises mineralógicas para cada camada foram realizadas pela técnica de difração de raios-X, como descrito no item 4.6.4, no laboratório de DRX do Instituto de Geociências – UnB, as quais visam à verificação das mudanças mineralógicas produzidas no solo quando tratado. Por tal motivo as análises foram feitas para o solo oriundo dos corpos de prova, com e sem adição de meio B4, empregados para caracterização do comportamento mecânico após a última idade de cura das amostras nos dois tipos de umidade de compactação trabalhados durante a pesquisa.

Deve-se salientar que esta metodologia tem limitação quanto ao teor dos minerais na composição do solo, ou seja, para materiais que estão em teores muito baixos, menores do que 5 %, possivelmente não serão detectados pelo difratômetro ou o serão apenas na forma de traço.

4.13 MICROSCOPIA ELECTRONICA DE VARREDURA

Foram realizadas análises de MEV em amostras para cada uma das profundidades estudadas com e sem tratamento, com a finalidade de verificar a presença de carbonato de cálcio produzida pela adição do meio B4. O processo de preparação das amostras consistiu em congelamento das amostras com nitrogênio líquido a -195°C , logo em seguida, foram

colocadas em uma estufa de vácuo a 105° C durante no mínimo 12 horas. Posteriormente foi realizado o processo de metalização das mesmas para permitir a condutividade elétrica. O microscópio eletrônico de varredura (MEV) empregado para as análises pertence à Universidade Nacional de Colombia - Sede Medellín.

Cabe salientar que as amostras de solo avaliadas são provenientes dos corpos de prova compactados e submetidos aos ensaios da caracterização do comportamento mecânico, na idade de cura de 90 dias no caso da compactação realizada no ramo seco e, de 70 dias nos corpos de prova compactados na umidade ótima.

CAPÍTULO 5

A PRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

5.1 CARACTERIZAÇÃO MICROBIOLÓGICA DO PERFIL DE SOLO

Depois de realizadas as diluições de 1:10 e 1:100 do solo a fim de isolar as bactérias presentes no perfil de solo, foram obtidos diferentes tipos de cepas correspondentes a cada camada. As bactérias isoladas foram incubadas em ágar sangue e ágar nutriente durante 24 horas a uma temperatura de 25°C (Figura 5.1). Os estudos de caracterização bacteriológica foram efetuados para todo o perfil em amostras coletadas metro a metro até a profundidade de 6 m. A partir deste estudo definiram-se as camadas de solo a serem usadas nos demais estudos previstos para a pesquisa.



Figura 5.1 Isolados bacterianos

Após isoladas, cada uma das bactérias foram submetidas a uma série de provas bioquímicas (Figura 5.2) visando à identificação e classificação das mesmas como descrito no

item 4.1. Todos os resultados das provas bioquímicas são expostos no Anexo A (Tabela A.1, Tabela A.2, Tabela A.3, Tabela A.4, Tabela A.5 e Tabela A.6).

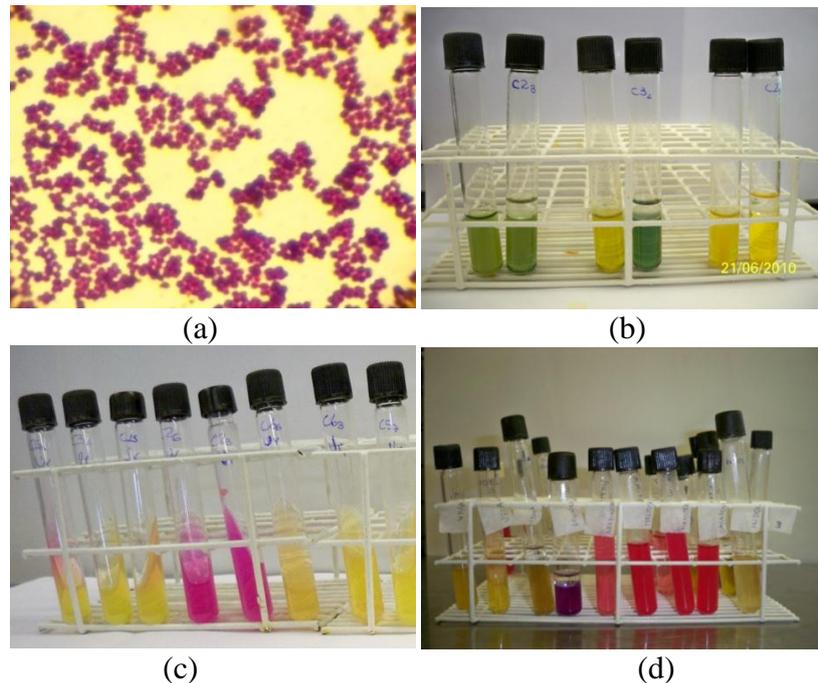


Figura 5.2 Testes bioquímicos realizados sobre as amostras oriundas das camadas do perfil de solo (a) Coloração de GRAM (b) Prova de O/F (c) Teste de ureia (d) Outros Testes

Cabe salientar que durante o processo de realização dos ensaios houve alguns testes iniciais que foram realizados em todas as cepas e, segundo os resultados, avaliou-se a necessidade da realização de mais uma bateria de testes para finalizar a identificação. No caso dos bastonetes do gênero *Bacilos* ou *Bacillus* “Gram-positivos”, a identificação da família específica não foi realizada, pois segundo a literatura esse gênero de bactéria sempre tem apresentado bons resultados para precipitar carbonato de cálcio via metabólica. Entretanto, para os bastonetes Gram-negativos e para as demais cepas foram realizados todos os testes necessários para identificar a que tipo de bactéria corresponde cada uma. Quando finalizadas as provas bioquímicas foram identificadas um total de 35 bactérias em todo o perfil de solo, como descrito na Tabela 5.1.

Na tabela citada observa-se uma grande quantidade de *Bacillus* ssp. no perfil, o que inicialmente permitiu inferir que o solo poderia ser apropriado para atingir uma boa precipitação de CaCO_3 via metabolismo bacteriano. As bactérias enumeradas nesta tabela são anaeróbias facultativas e dos tipos que normalmente existem no solo, como o caso dos *Bacillus* spp. e das *Pseudomonas* spp., as quais podem crescer em placas de ágar em porcentagens de até 67% e 15% respectivamente (Alexander, 1980).

Tabela 5.1 Bactérias identificadas para cada camada do perfil de solo

CAMADA 1 0 m-1,0 m	CAMADA 2 1,0 m – 2,0 m	CAMADA 3 2,0 m – 3,0 m	CAMADA 4 3,0 m – 4,0 m	CAMADA 5 4,0 m – 5,0 m	CAMADA 6 5,0 m – 6,0 m
<i>Bacillus</i> spp.	<i>Serratia rubidaea</i>	<i>Serratia rubidaea</i>	<i>Serratia rubidaea</i>	<i>Serratia rubidaea</i>	<i>Actinobacillus</i> spp.
<i>Serratia rubidaea</i>	<i>Pasteurella anatipestifer</i>	<i>Bacillus</i> spp.	<i>Bacillus</i> spp.	<i>Actinobacillus</i> spp.	<i>Serratia rubidaea</i>
	<i>Enterobacter cloacae</i>	<i>Actinobacillus</i> spp.	<i>Actinobacillus</i> spp.	<i>Bacillus</i> spp.	<i>Bacillus</i> spp.
	<i>Pseudomonas</i> ssp.	<i>Enterobacter cloacae</i>			
	<i>Bacillus</i> spp.	<i>Pseudomonas</i> ssp.			
	<i>Actinobacillus</i> spp.				

É importante aclarar que em cada camada foram determinadas varias colônias de *Bacillus* ssp., mas não as famílias específicas, portanto, na Tabela 5.1 só foram enumeradas as especies encontradas por profundidade, sendo que encontraram-se 4, 2, 3, 2 e 3 cepas, para 1,0 m, 2,0 m, 4,0 m, 5,0 m e 6,0 m respetivamente. Já no caso dos *Actinobacillus* ssp. aconteceu algo similar nas camadas de 2,0 m e 5,0 m onde foram achadas duas espécies para cada uma e na camada de 6,0 m encontraram-se 3 cepas.

Os resultados foram de vital importância para a escolha das três camadas de solo destinadas à produção dos corpos de prova a serem usados na pesquisa. Inicialmente foram selecionadas as camadas de 1,0 m e 6,0 m. Para definir a última camada a ser estudada foram utilizados os resultados das precipitações *in vitro* para cada bactéria, os quais são descritos no item seguinte.

Na definição das camadas de solo a serem estudadas levou-se em consideração ainda a dinâmica de alteração do perfil de solo considerando-se que regionalmente geralmente os três primeiros metros são os mais ativos em termos de hidratação e desidratação sazonal. A profundidade de 6,0 m por sua vez, corresponde a mesma distância desse limite de 3,0 m, ou seja, dista 3,0 m desse ponto central.

5.1.1 Precipitação *in vitro* com nutriente B4

Para poder verificar se as bactérias identificadas no perfil são aptas para fazer o tratamento com meio nutritivo B4 foram realizados testes de precipitação *in vitro*. Depois de incubadas as bactérias durante 15 dias a 25°C, as placas foram retiradas da estufa e observou-se o crescimento final de cada uma. Salienta-se que durante o período de incubação também foi realizado um acompanhamento visual das placas visando verificar mudanças e produção de precipitados em cada um dos pontos (colônias) semeados nas placas.

Algumas das observações mostraram que com três dias de incubação já é possível perceber o crescimento bacteriano e a geração de precipitados ao redor da colônia. Quando atingido o tempo de 15 dias se notou que em todas as camadas a maioria das bactérias havia metabolizado muito bem o meio nutritivo, gerando uma série de precipitados com cristais que eram muito visíveis, sendo possivelmente CaCO₃.

Com os resultados ratificou-se a escolha inicial das camadas provenientes de 1,0 m e 6,0 m de profundidade como duas das três camadas que seriam usadas para os demais estudos da pesquisa. A camada de 3,0 m, escolhida como terceira camada a ser estudada, também apresentou crescimentos bacterianos e precipitados de forma satisfatória. Na Figura 5.3

podem ser observadas bactérias correspondentes às três camadas mencionadas, onde se percebem claramente as colônias bacterianas e os precipitados que foram gerados com 3 dias e 15 dias de incubação das placas. Para confirmar os resultados foram realizadas microscopias petrográficas com a finalidade de verificar a presença de cristais de carbonato. Estes resultados serão discutidos no item 5.1.3.

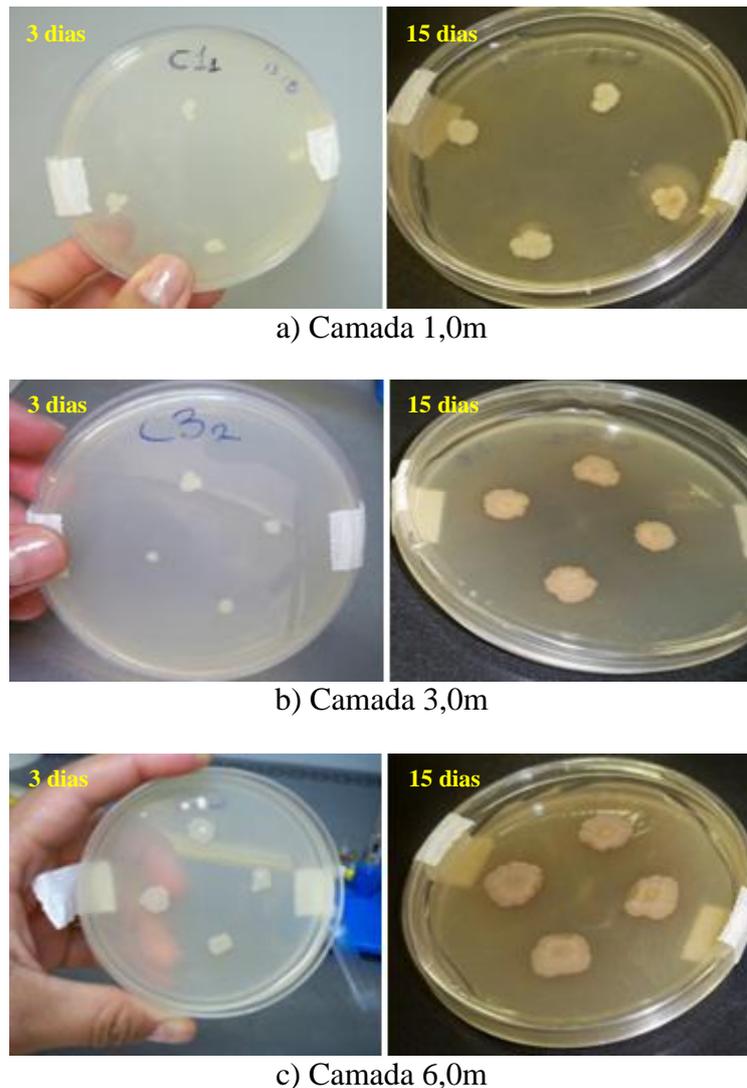


Figura 5.3 Precipitados com 3 e 15 dias de incubação em meio B4

De forma geral e segundo os resultados obtidos nesta etapa da pesquisa, o meio B4 é apto para ser empregado na etapa de caracterização mecânica do solo, sendo adicionado ao solo para verificar a efetividade do tratamento como meio de melhoria do comportamento mecânico.

5.1.2 Precipitação *in vitro* com feijão de porco

Para verificar se o meio contendo feijão de porco e ureia apresenta bons resultados como meio indutor para a precipitação biológica de carbonato de cálcio, também foram realizados testes *in vitro* como descrito no item 4.2. Quando os meios foram distribuídos nas placas de petri, semearam-se as bactérias urease positivas colocando quatro pontos da colônia como apresentado na Figura 5.4, posteriormente essas foram colocadas na estufa a 25°C durante 15 dias.

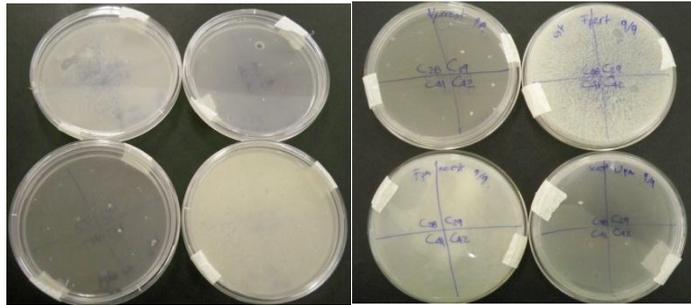


Figura 5.4 Bactérias incubadas em meios com feijão de porco e ureia

Passado o período de incubação, as placas foram retiradas da estufa para avaliar o crescimento bacteriano, observando-se os resultados expostos na Tabela 5.2. Todos os meios foram preparados em duplicata sendo um com e outro sem esterilização, a fim de verificar o crescimento da cepa nessas duas condições do meio. Foram realizados testes com os meios contendo por um lado, ureia fertilizante e por outro, ureia pura.

Da Tabela 5.2 pode-se notar que o meio sem feijão de porco permite um melhor crescimento das bactérias do que quando esse está na composição do mesmo, ou seja, ele funcionou como inibidor. No entanto, tal crescimento em ausência do feijão de porco não é tão acentuado quanto o gerado mediante o uso do meio nutritivo B4. Conclui-se assim, que o meio B4 é o mais apto para ser utilizado como indutor da precipitação biológica de carbonato de cálcio e será ele o composto a ser utilizado na continuidade da pesquisa. Cabe destacar que González (2009) também usou esse meio por apresentar bons resultados na precipitação de carbonato de cálcio em outro solo do Distrito Federal.

Para reforçar a observação anterior, foi realizada uma comparação do crescimento bacteriano entre os dois meios no terceiro dia. Observa-se que as bactérias cresceram muito mais com o meio B4 que com os meios contendo ureia e feijão de porco como é apresentado

na Figura 5.5 onde se apresenta uma colônia de *Serratia rubidaea* em ambos os meios de cultura.

Tabela 5.2 Crescimento das bactérias urease positivas em meio com ureia e feijão de porco

Prof. (m)	Bactéria	Feijão + Ureia pura		Feijão + Ureia fertilizante		Ureia pura		Ureia fertilizante	
		Estéril	Não Estéril	Estéril	Não Estéril	Estéril	Não Estéril	Estéril	Não Estéril
1,0	<i>Bacillus</i> spp.	C	C	NC	CP	CP	NC	C	NC
1,0	<i>Bacillus</i> spp.	NC	NC	NC	CP	C	CP	CP	NC
2,0	<i>Pasteurella anapestifer</i>	CP	NC	NC	NC	C	CP	CP	NC
2,0	<i>Pasteurella anapestifer</i>	C	NC	NC	NC	C	NC	CP	NC
2,0	<i>Actinobacillus</i> spp.	NC	NC	CP	CP	CP	C	C	C
2,0	<i>Actinobacillus</i> spp.	NC	NC	NC	NC	C	C	C	C
4,0	<i>Serratia rubidaea</i>	NC	NC	NC	CP	C	C	CP	C
4,0	<i>Serratia rubidaea</i>	NC	NC	NC	CP	C	C	C	C
4,0	<i>Serratia rubidaea</i>	C	NC	NC	NC	C	C	C	C
5,0	<i>Serratia rubidaea</i>	NC	NC	NC	NC	C	CP	CP	C
5,0	<i>Serratia rubidaea</i>	NC	NC	NC	CP	NC	C	CP	C
5,0	<i>Bacillus</i> spp.	CP	NC	NC	CP	C	C	C	C
6,0	<i>Bacillus</i> spp.	NC	NC	NC	NC	CP	C	C	NC
6,0	<i>Bacillus</i> spp.	NC	NC	NC	NC	CP	C	C	C
NC → Não cresceu		CP	→ Pouco crescimento	C	→ Cresceu				

Já com 15 dias as diferenças são ainda muito mais notórias, pois o desenvolvimento das colônias bacterianas foi muito maior no meio B4 do que nos outros meios preparados. Tal fato confirma que as bactérias metabolizam melhor no meio B4, gerando assim, maior precipitação do que nos meios com ureia e ureia com feijão de porco.

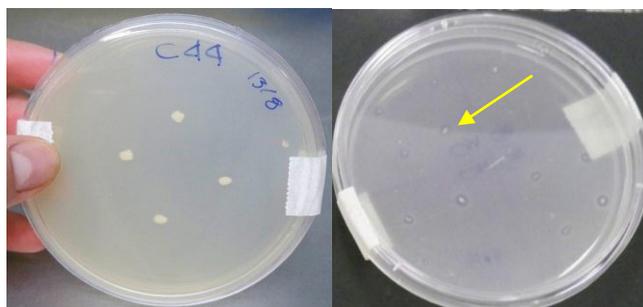
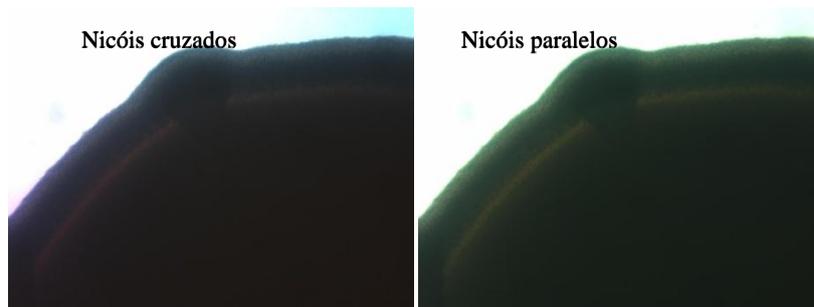


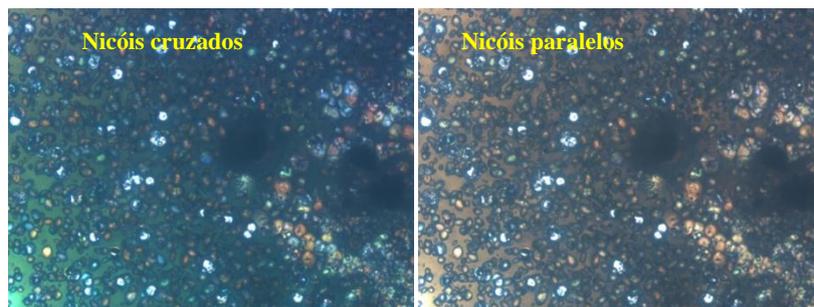
Figura 5.5 Crescimento bacteriano *in vitro* (a) Bactéria C44 incubada em B4 (b) Bactéria C44 incubada em meio com ureia e feijão de porco

5.1.3 Microscopia para determinar carbonatos

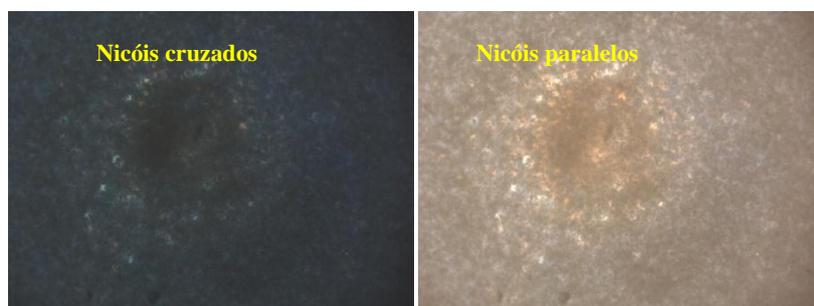
A Figura 5.6 apresenta microscopias realizadas nos precipitados produzidos por algumas bactérias com ambos os tipos de luz usadas para obter as imagens do microscópio (nicóis cruzados e nicóis paralelos). Observa-se que no perfil houve bactérias que geraram precipitados com cristais amorfos (Figura 5.6 a.), outras que com pouco tempo de semeadas, três dias, já apresentavam cristais bem formados (Figura 5.6 b.) e que com o tempo completo de incubação de 15 dias (Figura 5.6 c.) a quantidade de tais cristais de carbonato era muito maior.



(a) *Bacillus* spp. da camada de 4,0 m com cristais amorfos



(b) *Pseudomonas* spp. da camada de 3,0 m com 7 dias de incubação com cristais bem formados

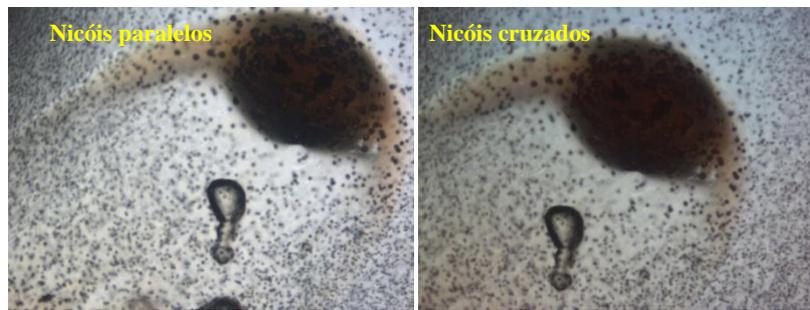


(c) *Pseudomonas* spp. da camada de 3,0 m com 15 dias de incubação com cristais bem formados

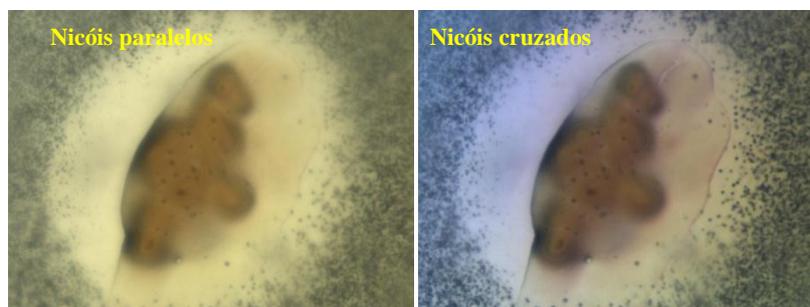
Figura 5.6 Imagens do microscópio petrográfico em meio nutritivo B4 (4 aumentos)

Por outro lado, também foram obtidas imagens das bactérias urease positivas em meio com feijão de porco, com resultados pouco alentadores quando comparados com os apresentados

pelo meio nutritivo B4. As fotos obtidas revelam a presença de cristais, mas estes são menos representativos em quantidade e forma que aqueles obtidos para o meio nutritivo B4, além de apresentar características amorfas.



(a) *Pasteurella anapestifer* da camada de 2,0m



(b) *Serratia Rubidaea* da camada de 4,0 m

Figura 5.7 Imagens do microscópio petrográfico em meio com ureia e feijão de porco (4 aumentos)

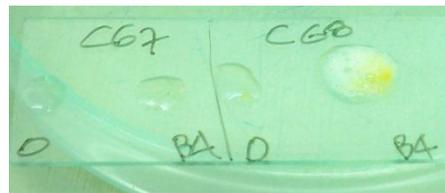
Partindo dos resultados do microscópio petrográfico para o meio contendo ureia e feijão de porco, decidiu-se colocar o meio diretamente no solo e realizar corpos de prova cilíndricos para verificar se há alguma mudança na resistência à compressão simples ou se é observada uma precipitação que implique na necessidade de uma avaliação mais profunda do comportamento do solo ao adicionar esse meio. Os resultados desses ensaios serão avaliados a partir do item 5.4.

5.1.4 Testes de presença de carbonato de cálcio por meio de reação com HCl

Durante as microscopias observou-se que as bactérias em meio B4 formaram uma boa quantidade de precipitados e que, possivelmente, esses são carbonato de cálcio. Portanto, para confirmar se os precipitados gerados pelas bactérias presentes no perfil de solo efetivamente são de carbonato de cálcio, realizaram-se testes de efervescência com ácido clorídrico (HCl) diluído, pois a calcita, diferentemente de outros minerais muito parecidos como quartzo, gesso, fluorita, entre outros, efervesce fortemente em contato com este ácido.

Os resultados revelaram que em todas as bactérias puras inoculadas em ágar nutriente não foi produzida nenhuma efervescência, no entanto, quando essas foram inoculadas em meio B4, uma grande quantidade apresentou efervescência ante a presença de HCl, indicando assim que, efetivamente, houve precipitação de CaCO_3 devido à metabolização do meio B4 por parte das bactérias. Destaca-se, porém, que nem todas apresentaram efervescência o que confirma a atividade bacteriana complexadora nos casos em que ela ocorreu.

A efervescência das colônias semeadas em meio B4, quando comparada com as colônias sem nenhum tratamento, é facilmente perceptível ao olho nu como é apresentado na Figura 5.8, onde se observa que quando não há efervescência a gota de HCl permanece como se fosse água sobre a colônia. No entanto, quando há carbonato a reação é imediata. Destaca-se que as colônias marcadas com a letra “O” correspondem à colônia inoculada em forma natural e, as marcadas com o “B4” são as mesmas inoculadas em meio B4.



Não efervesce

Efervesce

Figura 5.8 Provas de carbonatos com HCl em meio B4

Observando os resultados confirma-se que as camadas de 1,0 m, 3,0 m e 6,0 m apresentam uma boa quantidade de bactérias com precipitados de carbonato de cálcio, portanto, essas foram escolhidas como as três camadas a serem usadas para realizar os estudos durante as etapas posteriores apresentadas na pesquisa.

Quando o teste do HCl foi realizado sobre as bactérias incubadas nos meios contendo feijão de porco não foram apresentadas reações perceptíveis ao olho nu, por tal motivo reafirmou-se que o uso de tal meio não é tão efetivo quanto o meio B4 na precipitação de carbonato de cálcio. Colocou-se ainda este meio diretamente no solo para verificar se há alguma reação química ou física que induz a precipitação de CaCO_3 . O resumo dos resultados obtidos neste teste encontra-se na Tabela A.7 do Anexo A.

5.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO PERFIL DE SOLO

O perfil de solo apresenta características físicas que permitem inferir que ele é do tipo laterítico, sendo que as duas camadas superiores (0 a 2,0 m) são constituídas por areia argilosa

laterítica, segundo a classificação MCT. Estas camadas possuem um índice de plasticidade médio de 11% e peso específico dos sólidos de 26,7 kN/m³. As camadas inferiores correspondem, segundo a mesma classificação, a uma argila laterítica com peso específico dos sólidos em torno de 26,8 kN/m³ e índice de plasticidade entre 10 e 13%. Segundo a classificação de solos pelo Sistema Unificado todas as camadas pertencem a uma só classe de solo, silte de baixa plasticidade, o que indica que o perfil está composto por solos não apropriados para pavimentação segundo essa classificação. A Tabela 5.3 apresenta os resultados obtidos na caracterização física do perfil.

Tabela 5.3 Resultados de caracterização física do perfil

Camada	Prof (m)	w _{nat} (%)	W _L (%)	W _P (%)	IP (%)	G _s	γ _s (kN/m ³)	Contração (mm)	MCT	SUCS
1	1,0	27	36	23	13	2,74	26,9	0,83	LA'-LG'	ML
2	2,0	27	35	27	9	2,71	26,6	1,64	LA'-LG'	ML
3	3,0	31	39	29	10	2,72	26,7	1,63	LG'	ML
4	4,0	31	41	31	10	2,75	27,0	1,68	LG'	ML
5	5,0	30	43	32	12	2,72	26,7	1,83	LG'	ML
6	6,0	30	45	32	13	2,72	26,7	1,88	LG'	ML

Já quando são comparados os resultados da caracterização MCT com as análises granulométricas com e sem uso do defloculante (Tabela 5.4) para as três camadas de interesse da pesquisa observa-se que o solo da camada de 1,0 m corresponde a uma areia siltosa com baixo teor de argila, resultado que é coerente com as características obtidas mediante a caracterização MCT. Por outro lado, quando não é aplicado o defloculante, as camadas de 3,0 m e 6,0 m possuem uma caracterização similar à obtida para a camada de 1,0 m. Quando o defloculante é utilizado as características granulométricas das mesmas passam a indicar que trata-se de um solo com predominância de material arenoso e argiloso, permitindo assim observar que as características e o comportamento do material está fortemente influenciado por essas duas frações granulométricas.

Tabela 5.4 Resultados de caracterização física do perfil

FRAÇÃO	1,0 m		3,0 m		6,0 m	
	Sem Defloc	Com Defloc	Sem Defloc	Com Defloc	Sem Defloc	Com Defloc
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
Pedregulho	0	0	0	0	0	0
Areia	75	59	58	40	65	37
Silte	24	24	40	29	34	13
Argila	1	17	2	31	2	50

Já quando a classificação das três camadas selecionadas para a pesquisa é realizada pela metodologia AASTHO, observa-se que a mais superficial corresponde a um solo do tipo arenoso que pertence ao grupo A-2-6, cujas características permitem seu uso em sub-bases de pavimentos, com um desempenho moderado e alto em aterros. As outras duas camadas não seriam aptas para pavimentação, correspondendo aos grupos A-5 na profundidade de 3,0 m e A-7 em 6,0 m.

Graficamente (Figura 5.9) observa-se que a variação das propriedades físicas obtidas para o perfil segue um padrão bastante coerente com o apresentado por Guimarães (2002) e Delgado (2003), os quais descreveram o perfil do solo do Campo Experimental da UnB em profundidades similares.

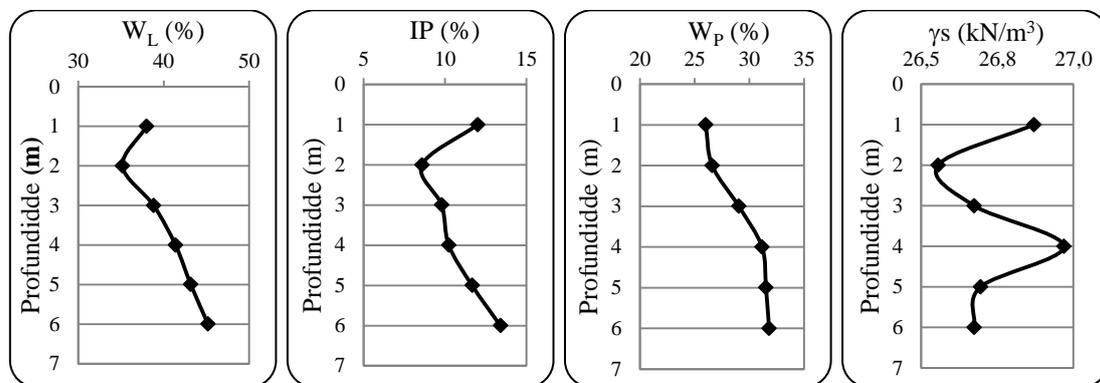


Figura 5.9 Caracterização física do perfil de solo.

Somado ao descrito anteriormente, todos os resultados são muito próximos aos apresentados por Araki (1997) para outro perfil de solo típico dos solos no Distrito Federal, apontando assim para ser o perfil de solo um típico perfil regional.

Quando se faz referencia à variação da umidade natural no perfil (Figura 5.10), observa-se que, em geral, as umidades são notavelmente altas, tal fato deve-se a que a coleta do solo foi realizada no 1 de março de 2011, época correspondente ao final do período chuvoso na região do Distrito Federal.

Por outra parte, observa-se que a variação da umidade com a profundidade segue um padrão coerente com as características do solo de cada camada. As duas camadas mais superficiais, 1,0 m e 2,0 m, apresentam menor umidade, já as camadas inferiores adjacentes contem um teor de umidade mais alto, mas tal conteúdo de água diminui com a profundidade a partir de 3m.

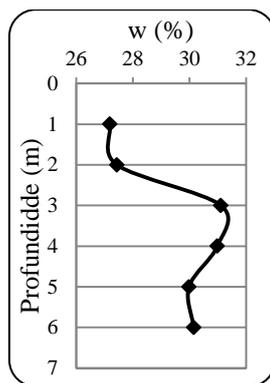


Figura 5.10 Umidade natural do perfil de solo no Campo Experimental

Estes resultados são coerentes com os obtidos para a classificação MCT no sentido de que nela foi obtida para os dois primeiros metros a classificação como solo fronteiro entre arenoso e argiloso laterítico e a partir daí apenas como solo argiloso laterítico.

5.3 CARACTERIZAÇÃO PRELIMINAR DAS CAMADAS DE SOLO ESTUDADAS

5.3.1 Determinação do pH

A Tabela 5.5 apresenta os valores de pH obtidos para cada uma das camadas de solo estudadas demonstrando que os solos de todas as camadas são predominantemente ácidos, com valores de pH variando entre 5,00 e 6,40 quando medido em solução de cloreto de potássio (KCl), e entre 5,60 e 6,60 para as determinações realizadas em água.

Observa-se ainda que os valores para ΔpH são negativos na camada mais superficial e para a mais profunda do perfil indicando um solo com predominância de argilas silicatadas, ressalva-se, no entanto, que o valor negativo da camada mais superficial pode estar ligado a aditivos químicos adicionados ao solo em ação antrópica tendo em vista ser o solo mais superficial o mais intemperizado. Isso se comprova pelos menores valores de pH registrados para a camada de 1m de profundidade. Já na camada de 3,0 m tal valor é positivo indicando que esta é rica em óxidos e hidróxidos de alumínio (Al) e ferro (Fe), mas para validar tais observações é necessário complementar os resultados com as análises mineralógicas. Cabe destacar que a profundidade de 3,0 m corresponde aproximadamente ao limite da zona ativa que é aquela com variações de umidade importantes ao longo do ano.

Comparando os resultados obtidos com os apresentados por Delgado (2002), as tendências são similares para os solos coletados a 1,0 m e 3,0 m, mas distinto para o solo coletado a 6,0m. Embora uma das camadas apresente valores de pH distantes dos obtidos por Delgado

(2002), os valores de ΔpH são idênticos, indicando que o solo apresenta características similares as já apresentadas para o solo do Campo Experimental em pesquisas anteriores.

Tabela 5.5 Valores de pH das camadas de solo selecionadas para a pesquisa

CAMADA	pH		ΔpH
	pH (KCl)	pH (H ₂ O)	
1,0 m	4,97	5,56	-0,59
3,0 m	6,38	5,97	0,41
6,0 m	6,04	6,61	-0,57

5.3.2 Ensaios de granulometria e agregação com B4

Como descrito no item 4.7 a verificação do efeito do nutriente B4 quando adicionado ao solo foi realizada a partir de ensaios de granulometria por sedimentação, variando-se o tempo de cura após a adição do nutriente nas três camadas do perfil escolhidas para a pesquisa. Nos resultados obtidos nessas análises (Figura 5.11 e Figura 5.12), verifica-se que o nutriente inicialmente desagrega um pouco as partículas de solo e em seguida tende a reagregá-las.

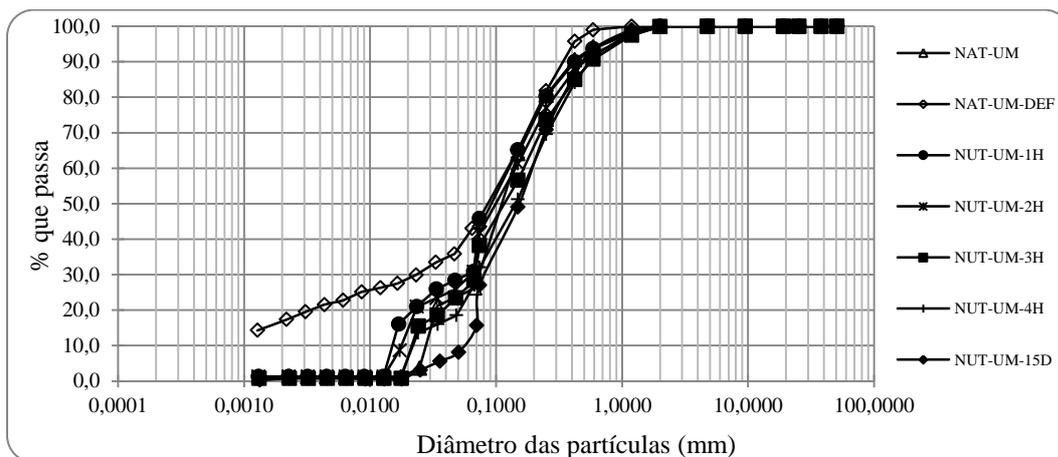
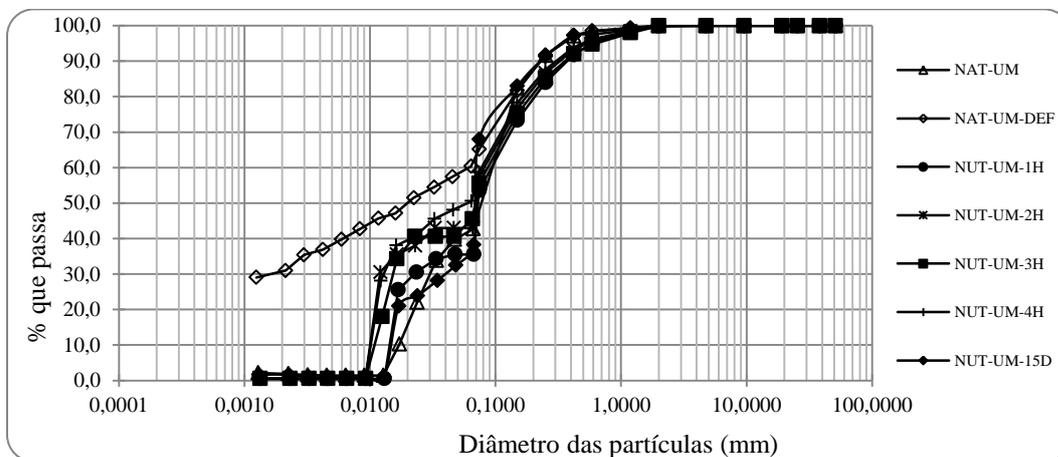
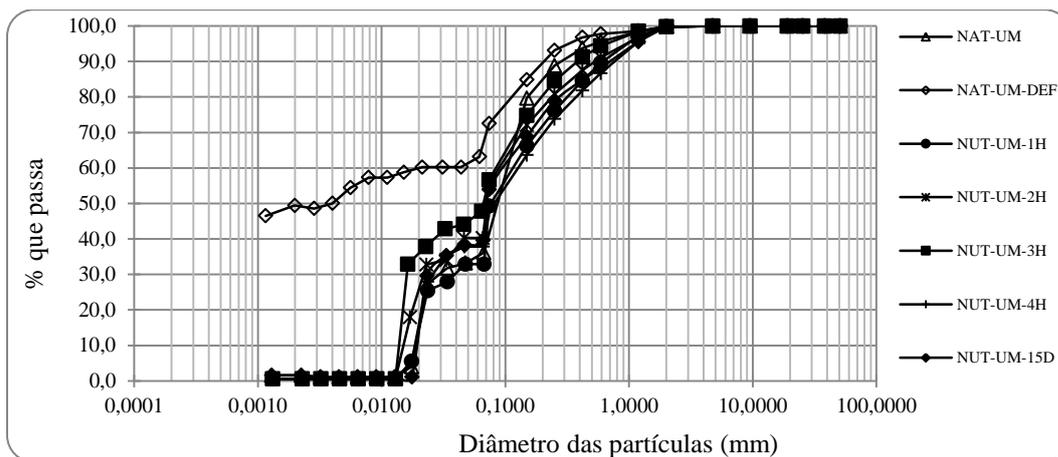


Figura 5.11 Análises de agregação da camada de 1,0 m (Valencia, 2010)



(a)



(b)

Figura 5.12 Análises de agregação (a) camada de 3,0 m; (b) camada 6,0 m

O efeito desagregador é retardado na medida em que se aprofunda no perfil de solo e a reagregação é mais perceptível na medida em que a camada é mais superficial. A desagregação inicial se deve provavelmente ao pH básico oriundo da adição do meio B4 e espera-se que a aglutinação que se segue seja oriunda da precipitação de carbonato de cálcio.

Partindo dos resultados obtidos para as três camadas de solo (Tabela 5.6), é indiscutível que a adição do nutriente gera uma mudança na agregação das partículas, mas para afirmar se tal efeito é positivo ou não, para os fins estabelecidos dentro da pesquisa, é necessário realizar as análises da mineralogia, da estrutura do solo e do comportamento mecânico para cada profundidade, já que, quando foram realizados os testes de precipitação in vitro as boas respostas das bactérias na geração de precipitados de CaCO_3 indicaram que o tratamento poderia ser bastante promissor para aplicações em campo.

Tabela 5.6 Teores granulométricos no ensaio de agregação com meio B4

CAMADA	FRAÇÃO	NAT	1 h	2 h	3 h	4 h	15 d
1,0 m	Pedregulho	0	0	0	0	0	0
	Areia	75	70	71	73	76	88
	Silte	24	29	28	26	23	11
	Argila	1	1	1	1	1	1
3,0 m	Pedregulho	0	0	0	0	0	0
	Areia	58	64	57	56	50	64
	Silte	40	35	43	44	49	34
	Argila	2	1	1	1	1	2
6,0 m	Pedregulho	0	0	0	0	0	0
	Areia	65	67	59	53	62	61
	Silte	34	32	40	46	37	38
	Argila	2	1	1	1	1	2

5.3.3 Ensaios de compactação

Nos ensaios de minicompactação com e sem a adição do meio B4 verificou-se que a compactação dos corpos de prova pode ser realizada após 24 horas da adição do nutriente, pois permite a melhor homogeneização do produto no solo e, a mudança da curva de compactação entre o período de cura de 1 hora e 24 horas é praticamente insignificante, o que corrobora os resultados contidos na Tabela 5.6.

Na Figura 5.13 observa-se que todas as curvas apresentam uma forma regular, em cone parabólico, típica dos solos cujos valores de limite de liquidez encontram-se entre 30 e 40 % (Das, 2001). Foram realizadas duas curvas de compactação para o solo natural de cada camada a fim de verificar e minimizar o efeito da preparação do solo sobre os valores de umidade ótima e peso específico aparente seco máximo.

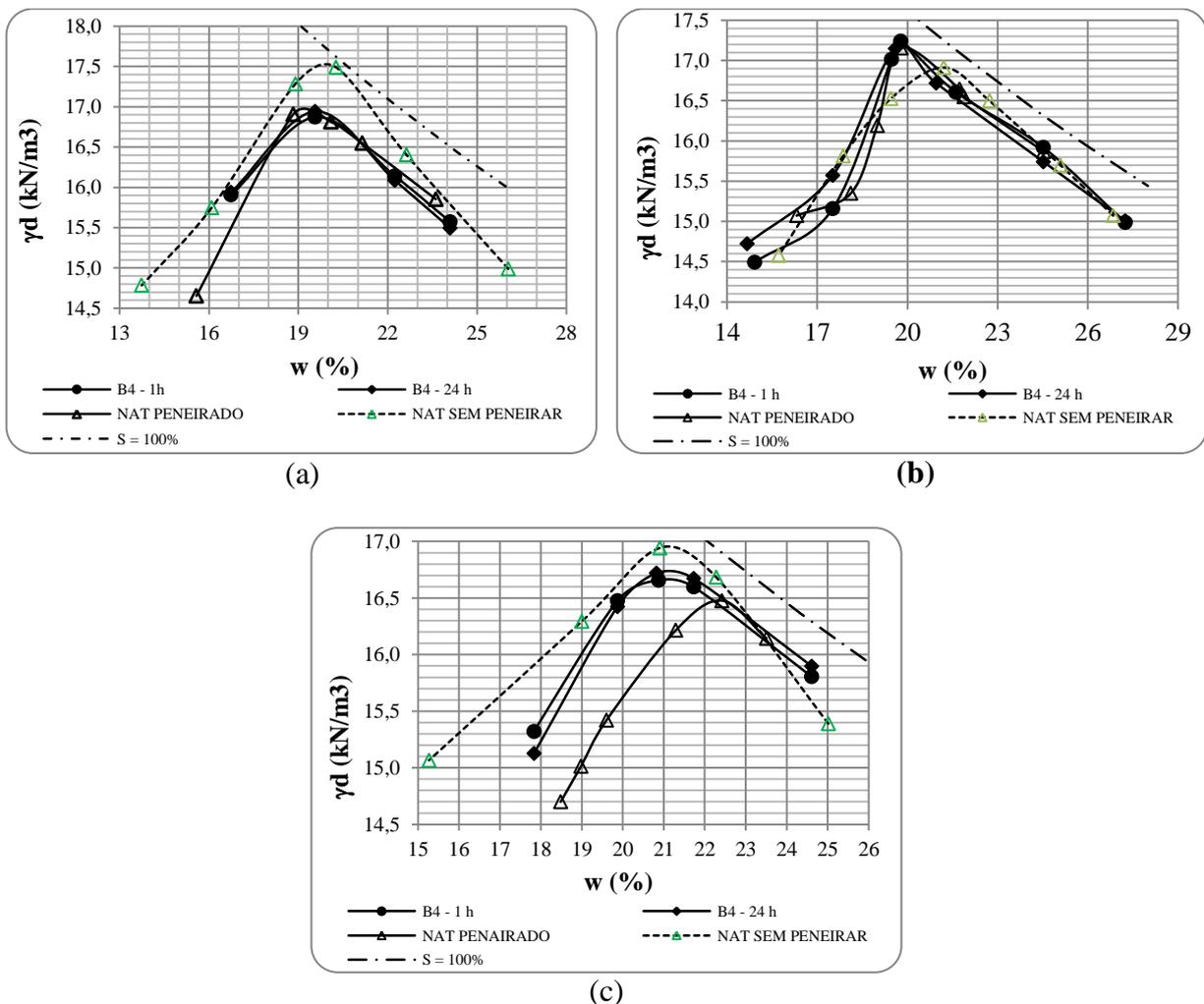


Figura 5.13 Ensaios de minicompactação com e sem nutriente B4 (a) 1,0 m (b) 3,0 m (c) 6,0 m

Essa preparação do solo consistiu em deixá-lo secar ao ar até obter a umidade requerida para cada ponto. Posteriormente, uma parte de cada amostra foi passada pela peneira de 4,75 mm e a outra metade não foi peneirada, realizando-se em seguida os ensaios de compactação miniatura.

Os resultados colocaram em evidência o efeito que a preparação do solo antes da compactação tem sobre os resultados destes ensaios, o qual demonstrou para as profundidades de 1,0 m e 6,0 m que quando o solo não é peneirado os valores de γ_d aumentam indicando que o peneiramento gerou um solo mais homogêneo e, que o arranjo dos grãos durante o ensaio gera uma estrutura diferente daquela obtida sem desmanchar os torrões. Diante desta influência optou-se por usar o solo nas misturas sem secagem prévia e com destorroamento por peneiramento para garantir um solo mais homogêneo. A Tabela 5.7 apresenta os valores de peso específico aparente seco máximo e umidade ótima das três profundidades, com distintas formas de preparação do solo.

Tabela 5.7 Pesos específicos máximos e umidades ótimas das 3 camadas sem tratamento

PROPRIEDADE	1,0 m		3,0 m		6,0 m	
	Peneirado	Sem Peneirar	Peneirado	Sem Peneirar	Peneirado	Sem Peneirar
Gs	2,74	2,74	2,72	2,72	2,72	2,72
γ_d (g/cm ³)	1,70	1,75	1,72	1,69	1,49	1,70
W _{ótima} %	19	20	20	21	22	21

A fim de verificar a ocorrência ou não de mudanças nas propriedades físicas do solo quando adicionado o nutriente, foram realizados, ensaios de limites de consistência no solo de cada camada após destorroamento das amostras compactadas na umidade ótima de cada curva de compactação com e sem nutriente.

Os resultados (Tabela 5.8) confirmam que efetivamente ocorrem pequenas mudanças nas propriedades do solo após a adição do meio B4, sendo que o sentido de tais mudanças variou com a profundidade da camada amostrada, tais mudanças são refletidas nos limites de plasticidade e conseqüentemente nos valores de IP que na camada de 1,0 m diminuiu notoriamente, enquanto que nas outras camadas após 24 horas aumentou. A influência do meio pode estar associada a fenômenos químicos ou simplesmente físicos devidos a agregações e desagregações, sendo ainda possível estar associada ao próprio nível de repetibilidade do ensaio.

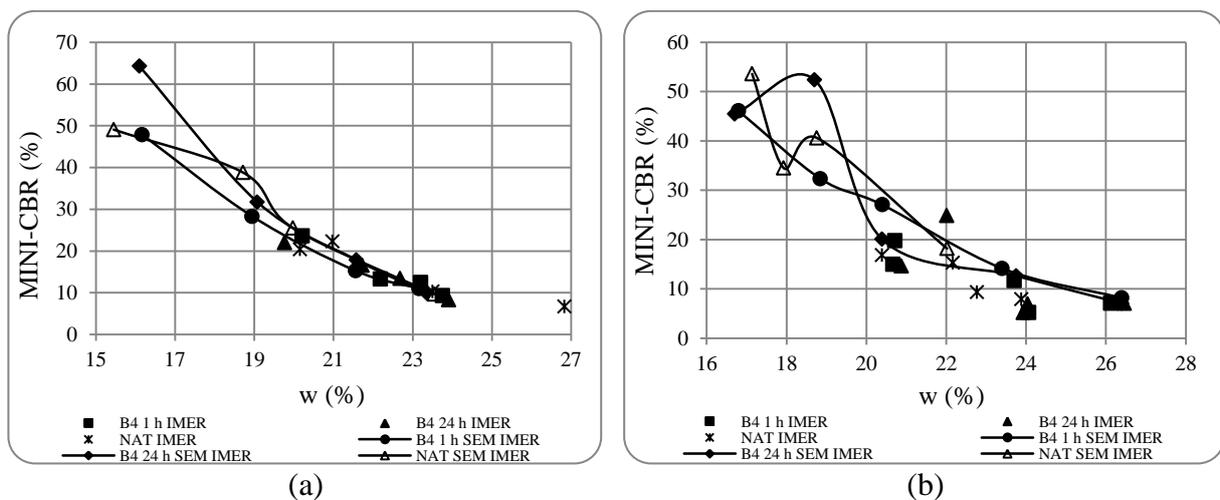
Tabela 5.8 Limites de consistência para solos com e sem nutriente na umidade ótima de compactação

CAMADA	AMOSTRA	LL (%)	LP (%)	IP (%)
1,0 m	NAT	36	23	13
	B4 1h	36	26	10
	B4 24h	36	27	9
3,0 m	NAT	39	29	10
	B4 1h	40	29	11
	B4 24h	40	26	14
6,0 m	NAT	45	32	13
	B4 1h	43	27	16
	B4 24h	43	29	14

5.3.4 Ensaios de mini-CBR sobre o solo natural e com adição do meio B4

Os corpos de prova oriundos do ensaio de compactação miniatura foram armazenados na câmara úmida durante um mês para posteriormente serem realizados ensaios de mini-CBR com e sem imersão, sendo inicialmente feito o ensaio sem imersão de um lado do corpo de prova e com imersão do outro. Os resultados desses ensaios estão exibidos na Figura 5.14, onde é possível observar que aparentemente não há alteração nos valores de mini-CBR quando adicionado o meio B4 ao solo.

Contudo, o desempenho dos corpos de prova durante os ensaios apresentou um comportamento bastante lógico, pois, à medida que a umidade aumenta, os valores do mini-CBR diminuem e, quando imersos, tanto o solo tratado quanto o natural exibem resultados muito similares.



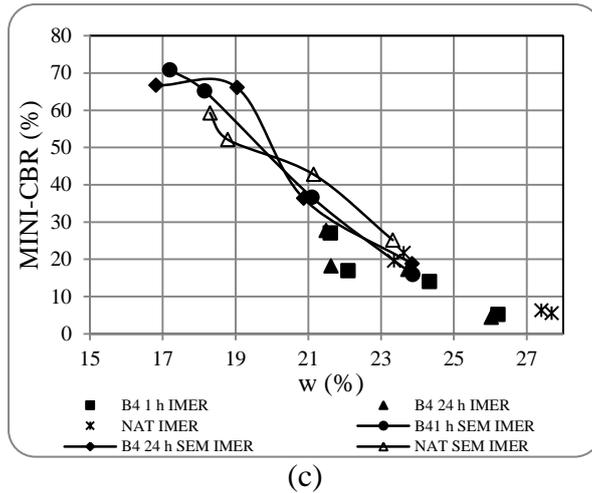
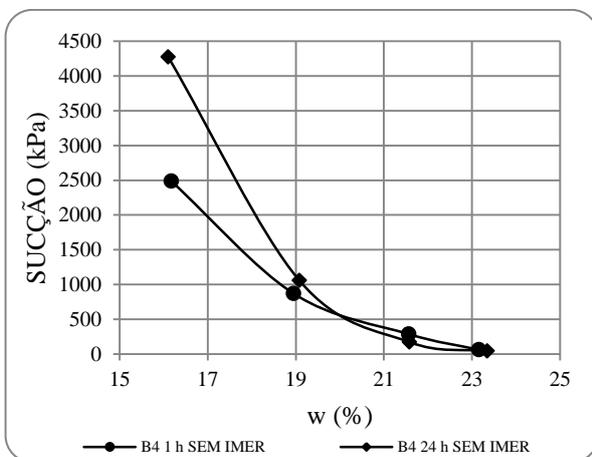


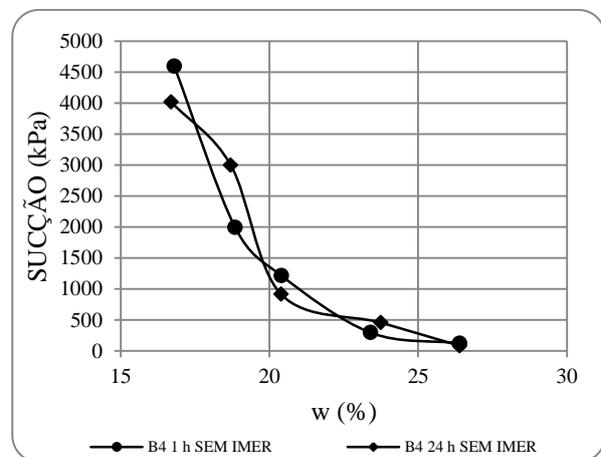
Figura 5.14 Mini-CBR nos pontos da curva de compactação (a) 1,0 m (b) 3,0 m (c) 6,0 m

No entanto, para poder fazer afirmações conclusivas, se faz necessário realizar estudos complementares considerando-se tempos de cura mais prolongados, pois como avaliado apenas permite verificar se química e estruturalmente o meio B4 interviu na compactação e no comportamento mecânico não sendo ainda possível avaliar a influência de eventual cimentação formada ao longo do tempo.

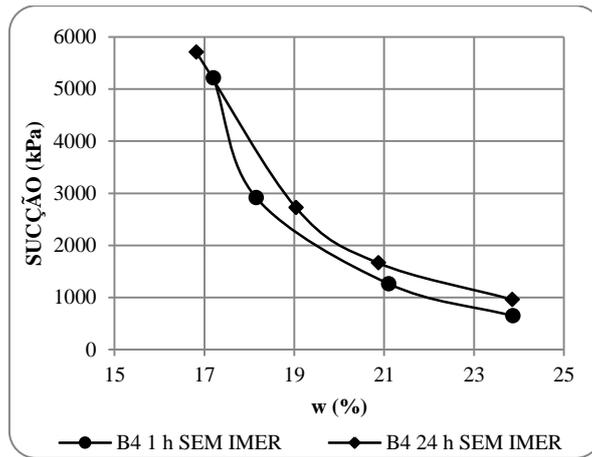
Valores de sucção foram determinados para as amostras com adição de nutriente, e notou-se que os valores são bastante coerentes, visto que quanto mais úmido o corpo de prova menor a sucção, conforme observado por meio da Figura 5.15. Destaca-se que nessa figura 1h e 24h referem-se ao tempo decorrido entre a mistura do nutriente ao solo e sua compactação. As sucções por sua vez, foram determinadas pela técnica do papel filtro mantendo seu contato entre estes e o solo por um tempo de 20 dias.



(a)



(b)

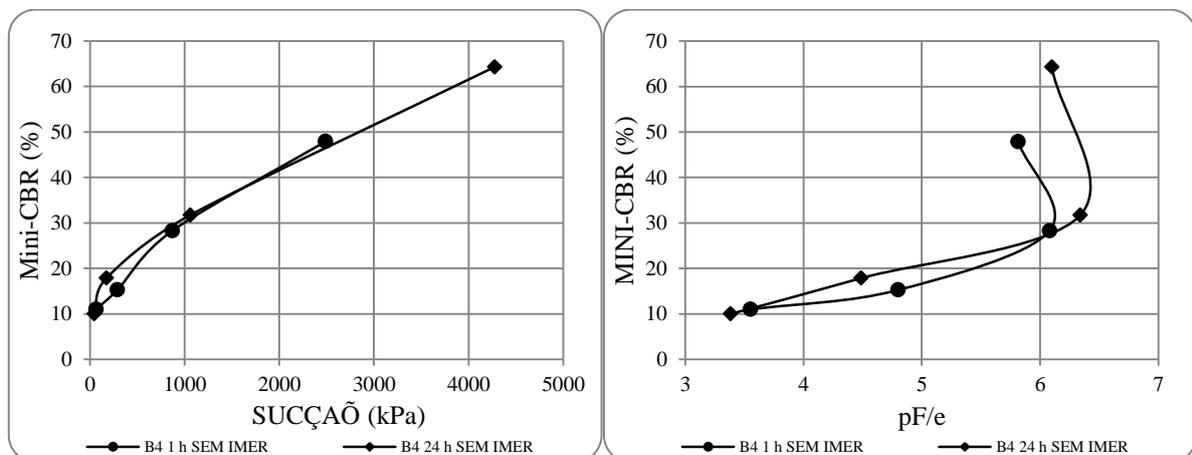


(c)

Figura 5.15 Curvas de retenção: (a) 1,0 m; (b) 3,0 m; (c) 6,0 m

Quando plotado o mini-CBR em função da sucção (Figura 5.16) acontece algo similar, quanto maior o valor da sucção maior o índice de suporte. No entanto, se eliminado o efeito do índice de vazios, observa-se que a tendência também é coerente. Logo, no caso das amostras com menor teor de umidade nas três camadas, existem algumas aparentes irregularidades, pois a curva sofre um arqueamento que pode indicar que nessas umidades inferiores a 17% existe alguma influência do índice de vazios nos valores do mini-CBR.

Tal comportamento pode estar indicando que para a ação bacteriana é importante determinadas condições de porosidade e grau de saturação, pois observa-se no gráfico de pF/e que para o ponto mais seco na curva de compactação seja o aumento do índice de vazios seja a diminuição da sucção não são suficientes para propiciarem a queda nos valores de mini-CBR.



(a)

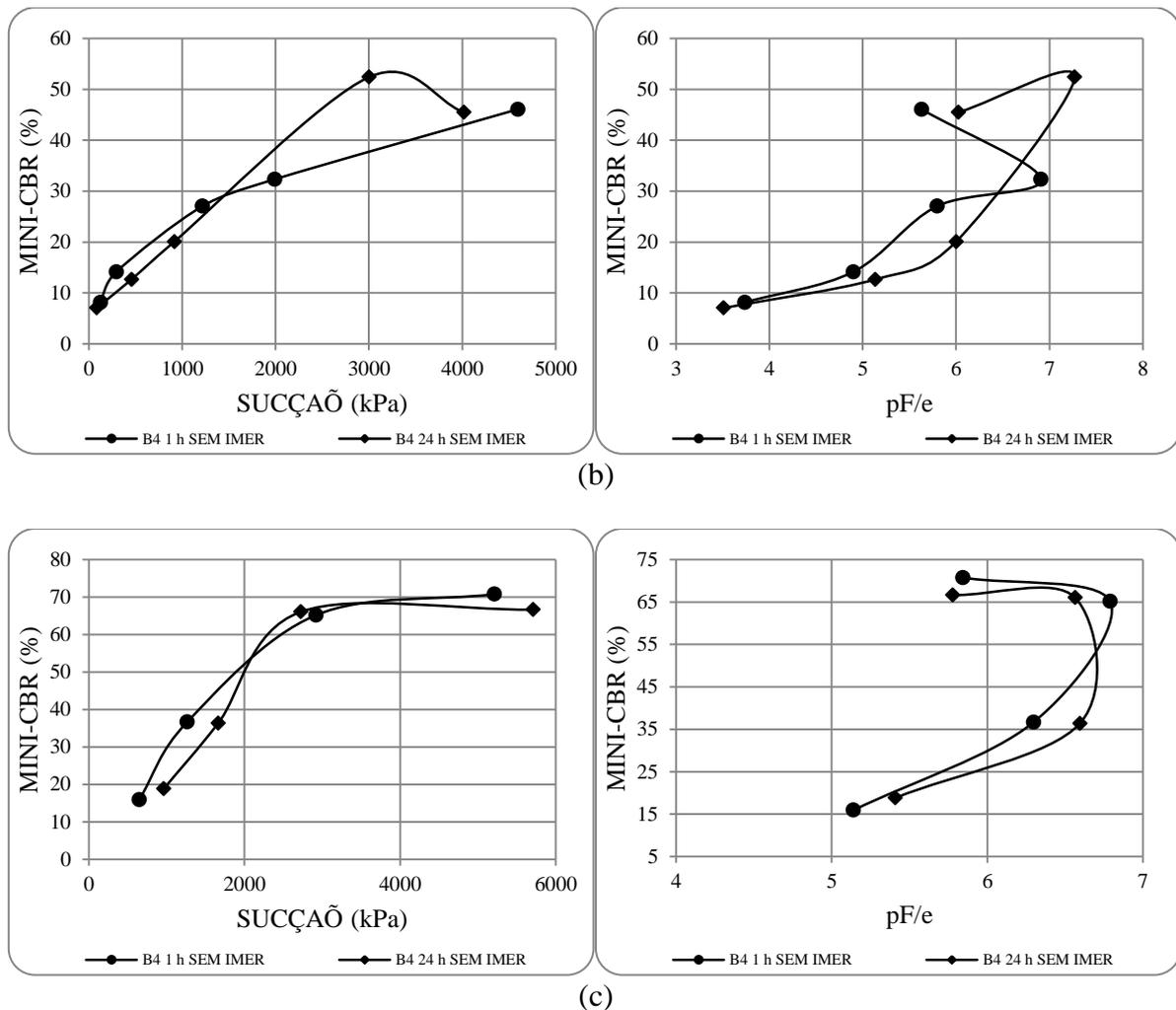


Figura 5.16 Mini-CBR vS. sucção com e sem influência do índice de vazios (a) 1,0 m (b) 3,0 m (c) 6,0 m

De forma geral, todas as curvas apresentam um comportamento regular indicando que se o meio gera alguma variação nas propriedades, tal influência não está representada nos valores do mini-CBR obtidos após 30 dias de cura.

5.3.5 Caracterização estrutural dos corpos de prova provenientes das curvas de compactação

Foi realizada uma caracterização estrutural preliminar em cada corpo de prova proveniente dos ensaios de mini-compactação com a finalidade de verificar, antes da preparação das amostras destinadas à caracterização geotécnica, quais as diferenças na estrutura obtidas devido ao processo de compactação.

Observou-se que quando adicionado o nutriente B4 existiam pequenos fios que não foram notados no solo natural, obtendo-se assim um indício que o meio B4 produz variações dentro do solo. Provavelmente esses fios são precipitados gerados pela metabolização bacteriana do

meio (Figura 5.17). Percebe-se também, principalmente para as profundidades de 3,0 m e 6,0m, que o meio B4 aparentemente gera certo desarranjo estrutural do solo, aparentando uma tendência a destruição dos agregados. Este desarranjo estrutural poderia estar compensando eventuais ganhos oriundos de precipitações de carbonato. De forma geral, todas as curvas apresentam um comportamento regular indicando que se o meio gera alguma variação nas propriedades, tal influência não está representada nos valores do mini-CBR obtidos após 30 de cura.

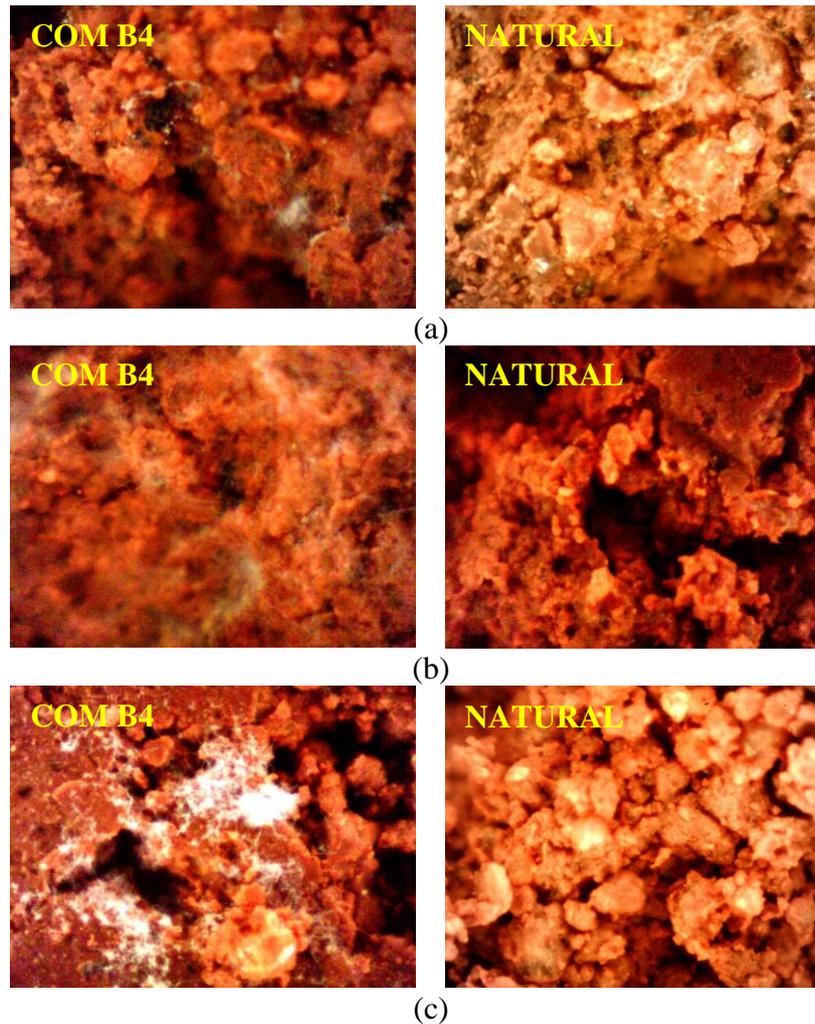


Figura 5.17 Caracterização estrutural para as três camadas aumentos de 200X (a) 1,0 m (b)3,0 m (c) 6,0 m

5.3.6 Caracterização mineralógica das três camadas de solo

As análises mineralógicas realizadas para cada profundidade nesta pesquisa revelam que o perfil de solo está bastante intemperizado, com predominância de quartzo e gibsita nas três camadas, sendo este último mineral o maior indicador do alto grau de intemperismo do perfil

(Figura 5.18). Já a caulinita não foi encontrada na camada de 3,0 m, a qual apresenta o argilomineral goetita.

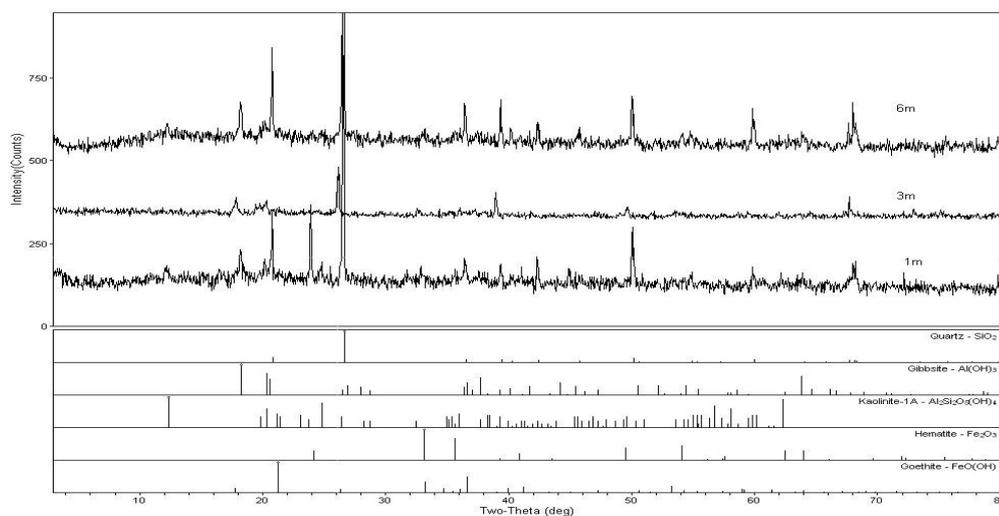


Figura 5.18 Difratoograma de Raios X de todas as camadas.

De forma geral, os minerais encontrados nos testes de DRX confirmam o exposto pelas determinações de pH, que indicaram predominância de argilas silicatadas e oxi-hidróxidos de alumínio e de ferro. Para melhor entendimento, a Tabela 5.9 apresenta a composição mineralógica obtida nas análises de DRX para cada camada.

Tabela 5.9 Minerais presentes em cada camada

CAMADA	MINERAIS
1,0 m	Quartzo
	Gibbsite
	Caulinita
	Hematita
3,0 m	Quartzo
	Gibbsite
	Goetita
6,0 m	Quartzo
	Gibbsite
	Caulinita

5.4 CARACTERIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DAS CAMADAS ESTUDADAS COMPACTADAS NO RAMO SECO

Cabe ressaltar que todos os corpos de prova foram fabricados sob as mesmas condições de umidade e energia de compactação, tanto para as amostras tratadas quanto para aquelas que estavam em estado natural. Foram realizados ensaios de caracterização mecânica para cada

uma das camadas de estudo e os resultados de tais ensaios permitiram observar que as resistências dos corpos de prova tratados são muito similares a aquelas obtidas para os corpos de prova naturais, o que pode ser indicio de que o tratamento não está gerando uma melhoria das propriedades geotécnicas nas amostras de solo. Analisaram-se os comportamentos dos corpos de prova sob dois processos de cura, enterrados no campo e armazenados em laboratório, de forma separada. Tais resultados também foram avaliados de forma conjunta com o intuito de verificar a influencia do método de cura sobre a variação das características geotécnicas de cada amostra de solo.

A seguir são apresentados os resultados dos ensaios de caracterização do comportamento mecânico realizados para os corpos de prova compactados no ramo seco

5.4.1 Curva característica de retenção de água

O processo de compactação tende a eliminar os macroporos no solo, tendência que induz a curva característica a perder o aspecto bimodal que caracteriza os solos tropicais altamente intemperizados, contudo, as curvas continuam tendo nuances dessa característica típica.

Nota-se que as curvas para o solo tratado e não tratado (Figura 5.19) apresentam poucas diferenças que marcam comportamentos significativamente diferentes. Observa-se que para os dois tipos de cura a forma tende a ser bimodal, que o ponto de entrada de ar nos microporos corresponde ao mesmo valor de sucção, o qual é aproximadamente de 6000 kPa na camada de 1,0 m e, de 8000 kPa nas outras duas. Em suma, as quatro curvas obtidas para cada camada tendem a ser coincidentes.

Para melhor entendimento dos gráficos é importante explicar os nomes de cada uma das series que se apresentam, cabendo esclarecer que a parte inicial do nome indica a profundidade de coleta do solo:

- *te*: Solo tratado com processo de cura enterrado
- *ne*: Solo não tratado com processo de cura enterrado
- *t*: Solo tratado e curado em laboratório
- *n*: Solo não tratado e curado em laboratório

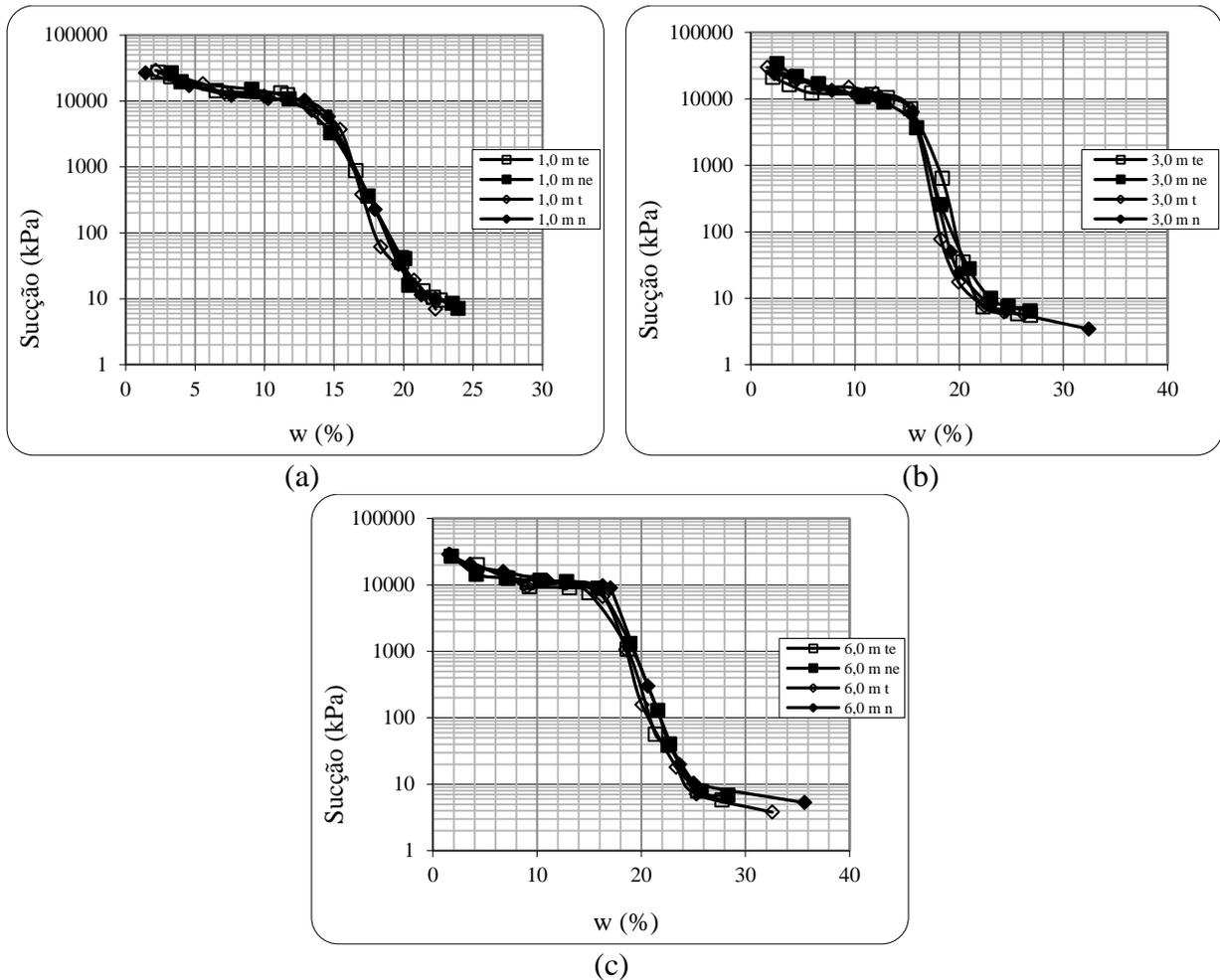


Figura 5.19 Curvas características e de retenção de água (a) 1,0 m (b) 3,0 m (c) 6,0 m

Quando a curva característica é determinada em função do grau de saturação (Figura 5.20) percebe-se que há uma maior variação em especial na zona compreendida entre o término da entrada de ar nos macro e início nos microporos. No entanto, a variação é pequena e pode estar associada à repetibilidade na determinação dos índices de vazios dos corpos de prova.

Para verificar melhor a distribuição dos poros nas amostras de solo, foram feitos gráficos das curvas características transformadas em relação ao índice de vazios, como proposto por Camapum de Carvalho & Leroueil (2004), os quais afirmam que esse tipo de curva facilita a análise do comportamento dos solos tropicais quando leva em conta a dimensão e distribuição dos poros.

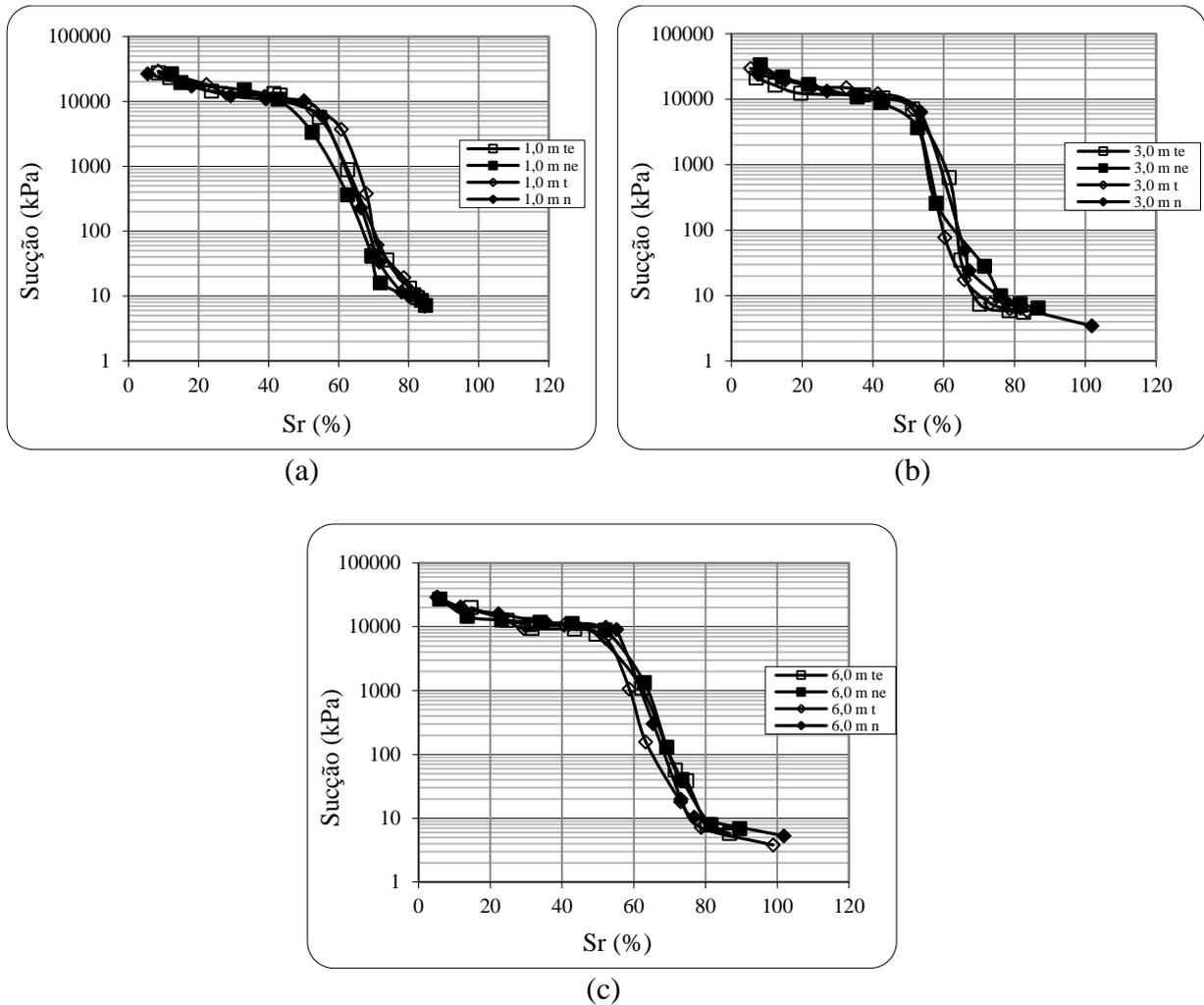


Figura 5.20 Sucção em função da saturação (a) 1,0 m (b) 3,0 m (c) 6,0 m

Observa-se que as curvas transformadas (Figura 5.21) são praticamente coincidentes para cada profundidade, exceção feita para a região de microporos na profundidade de 1,0 m. Nota-se para o conjunto de resultados apresentados que todas as curvas características, independentemente do tratamento, são marcadas pela bimodalidade. Dessa forma também é possível inferir que o tratamento não gera uma mudança da propriedade de retenção de água dos solos lateríticos estudados.

Para melhor visualização do comportamento e com o intuito de determinar se o tratamento tem algum efeito forte sobre as curvas de retenção de água, a sucção em pF (pF corresponde ao logaritmo da sucção em cm de coluna de água) também foi transformada em relação ao índice de vazios interagregado ($e_{(inter)}$) (Figura 5.22). Camapum de Carvalho *et. al.* (2002) mostraram que tal tratamento das curvas de retenção pode conduzir a um melhor entendimento do comportamento.

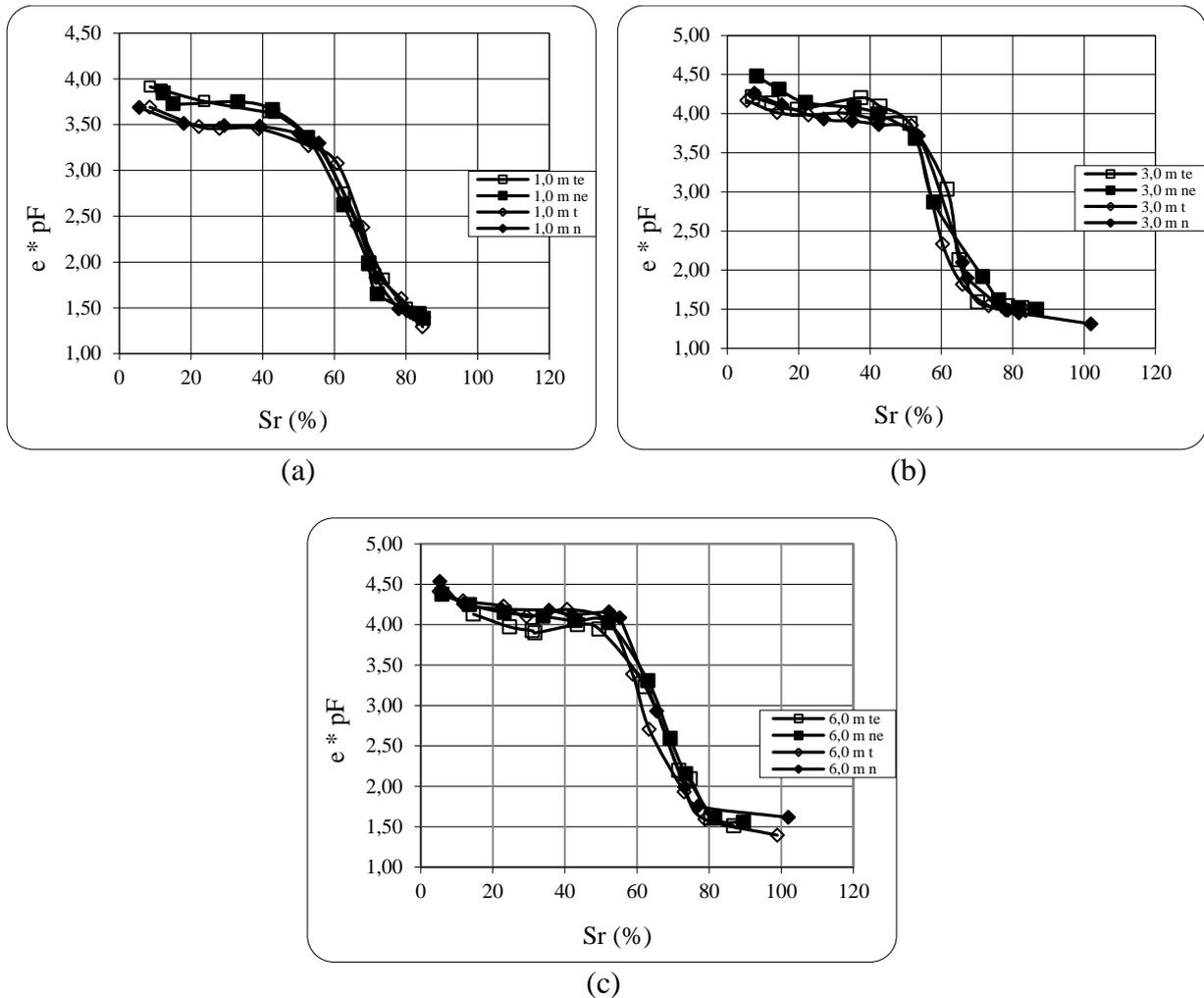


Figura 5.21 Curvas características transformadas com relação a índice de vazios “e” (a) 1,0 m (b) 3,0 m (c) 6,0 m

Deve-se salientar que esses índices podem refletir melhor o efeito do tratamento sob a resistência, pois espera-se que a adição do meio gere pontes entre os grãos do solo, aumentando a agregação e, portanto, a resistência do mesmo.

Observa-se que ao utilizar o índice de vazios interagregado as curvas características não apresentam variações que impliquem em melhoria do comportamento causada pela adição do meio B4, pois, as curvas do solo tratado são praticamente idênticas às do solo natural.

Cabe destacar que os cálculos dos índices de vazios intragregados não devem dar diferentes, neste caso houve algumas mudanças entre os valores obtidos, por tanto, preferiu-se trabalhar com a média dos mesmos.

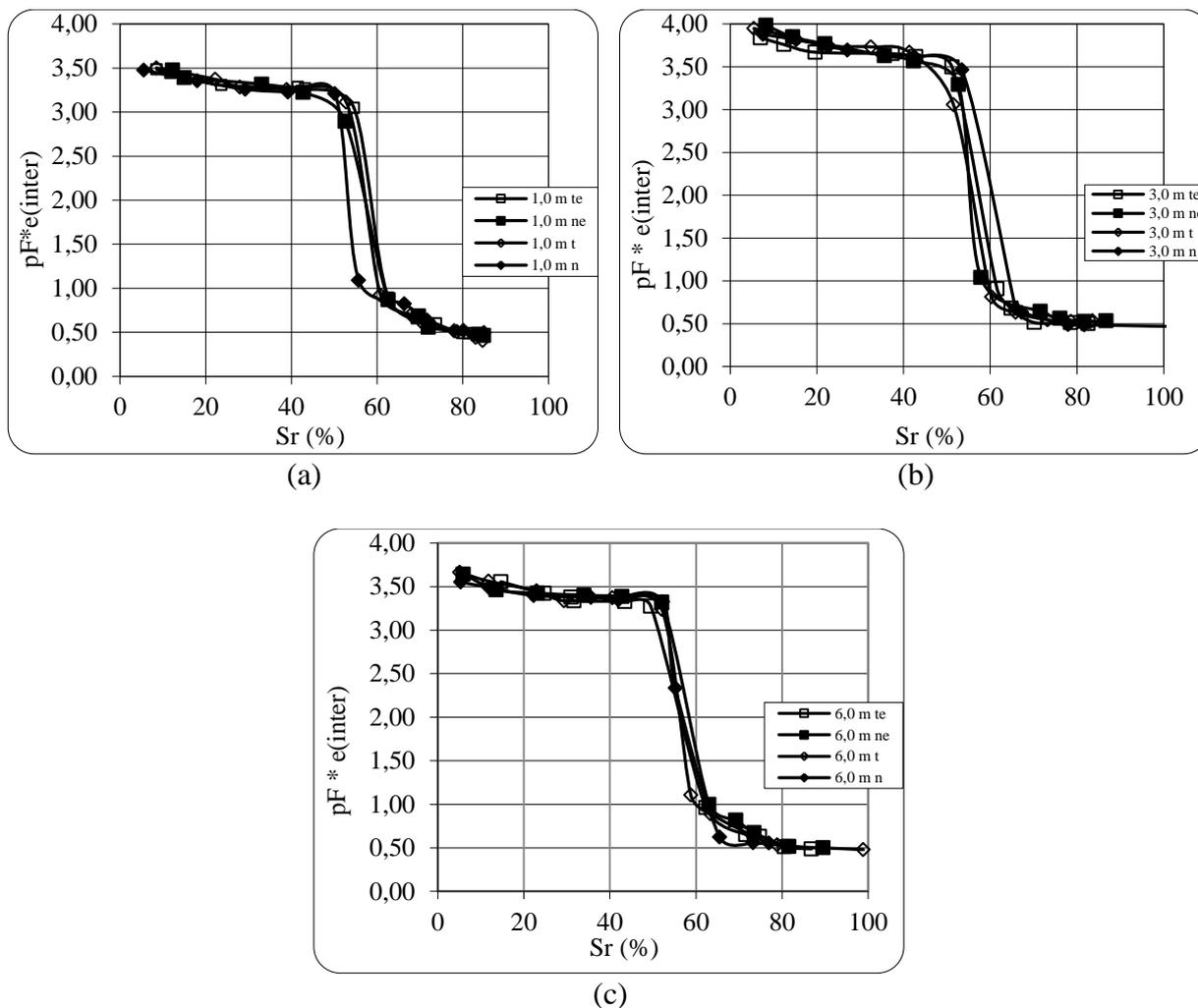


Figura 5.22 Curvas características transformadas com relação aos índices de vazios intra-agregado e interagregado (a) 1,0 m (b) 3,0 m (c) 6,0 m

5.4.2 Compressão diametral (σ_t)

Para os ensaios de compressão diametral foram utilizados os corpos de prova empregados na determinação das curvas características, ou seja, após a cura as umidades foram ajustadas por secagem ou molhagem para a determinação da sucção de cada ponto da curva e posteriormente executaram-se os ensaios de compressão diametral. Desse modo foi possível averiguar a influência da umidade de ruptura e dos tratamentos sobre a resistência dos corpos de prova.

As análises foram realizados plotando-se curvas da resistência à tração em função da umidade (Figura 5.23), do grau de saturação (Figura 5.24). Em seguida plotou-se ainda gráficos da resistência à tração em função da sucção em pF normalizada em relação ao índice de vazios, pF/e (Figura 5.25), segundo a proposta de Camapum de Carvalho e Pereira (2002).

Nesse último caso utilizou-se a normalização da sucção em relação ao índice de vazios global e em relação ao índice de vazios interagregado.

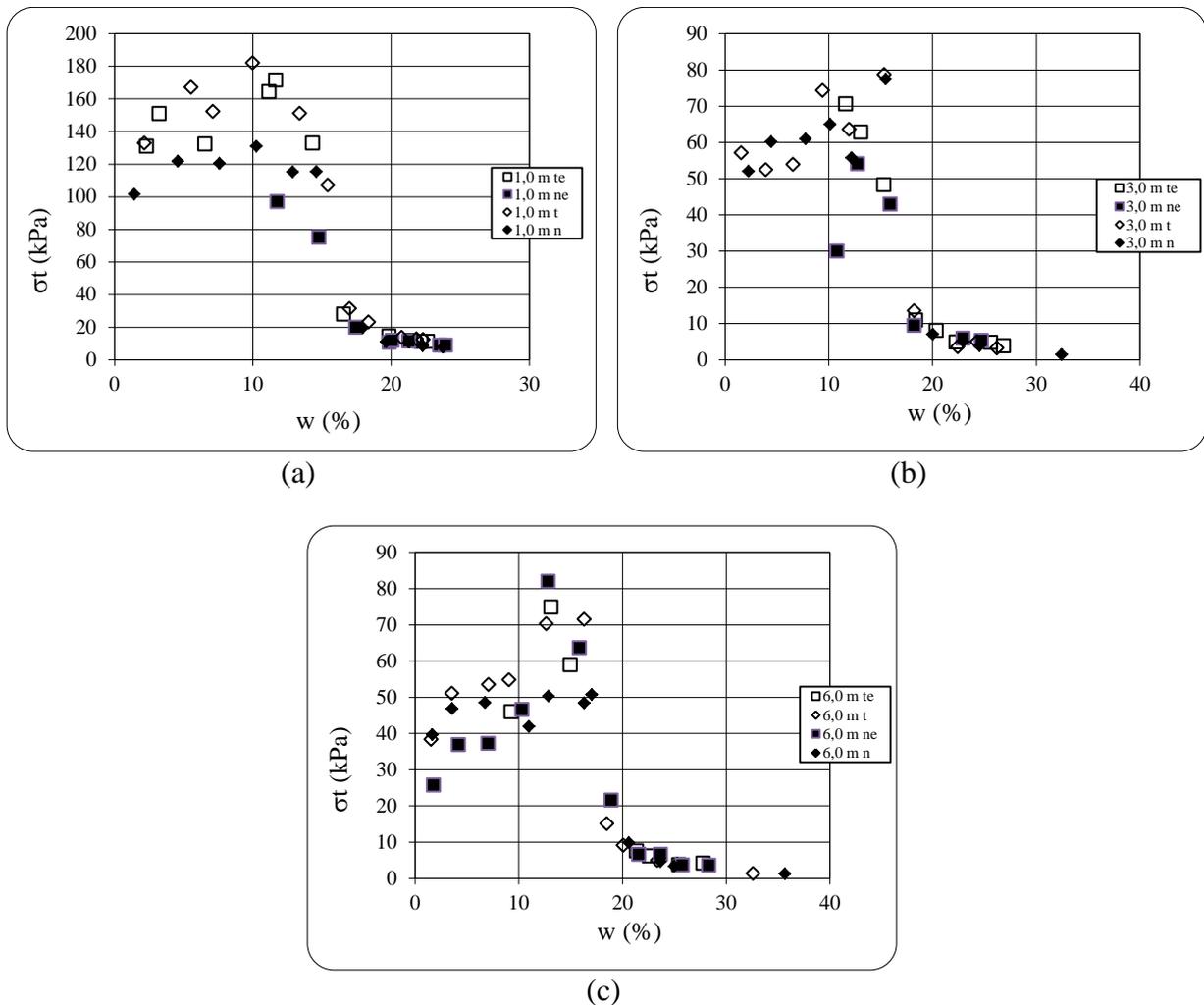


Figura 5.23 Relação $w\%$ - σ_t (a) 1,0 m (b) 3,0 m (c) 6,0 m

O conjunto de resultados obtidos nos ensaios de tração indireta e mostrados nessas figuras indicam que apenas para a profundidade de 1,0 m em umidade inferiores a da zona dos macroporos ocorreu melhoria do comportamento mecânico do solo tanto na condição de cura de laboratório como na condição enterrada. Para as profundidades de 3,0 m e de 6,0 m tal melhoria não é clara aparecendo apenas uma pequena tendência de melhoria em especial nos gráficos em função de pF/e .

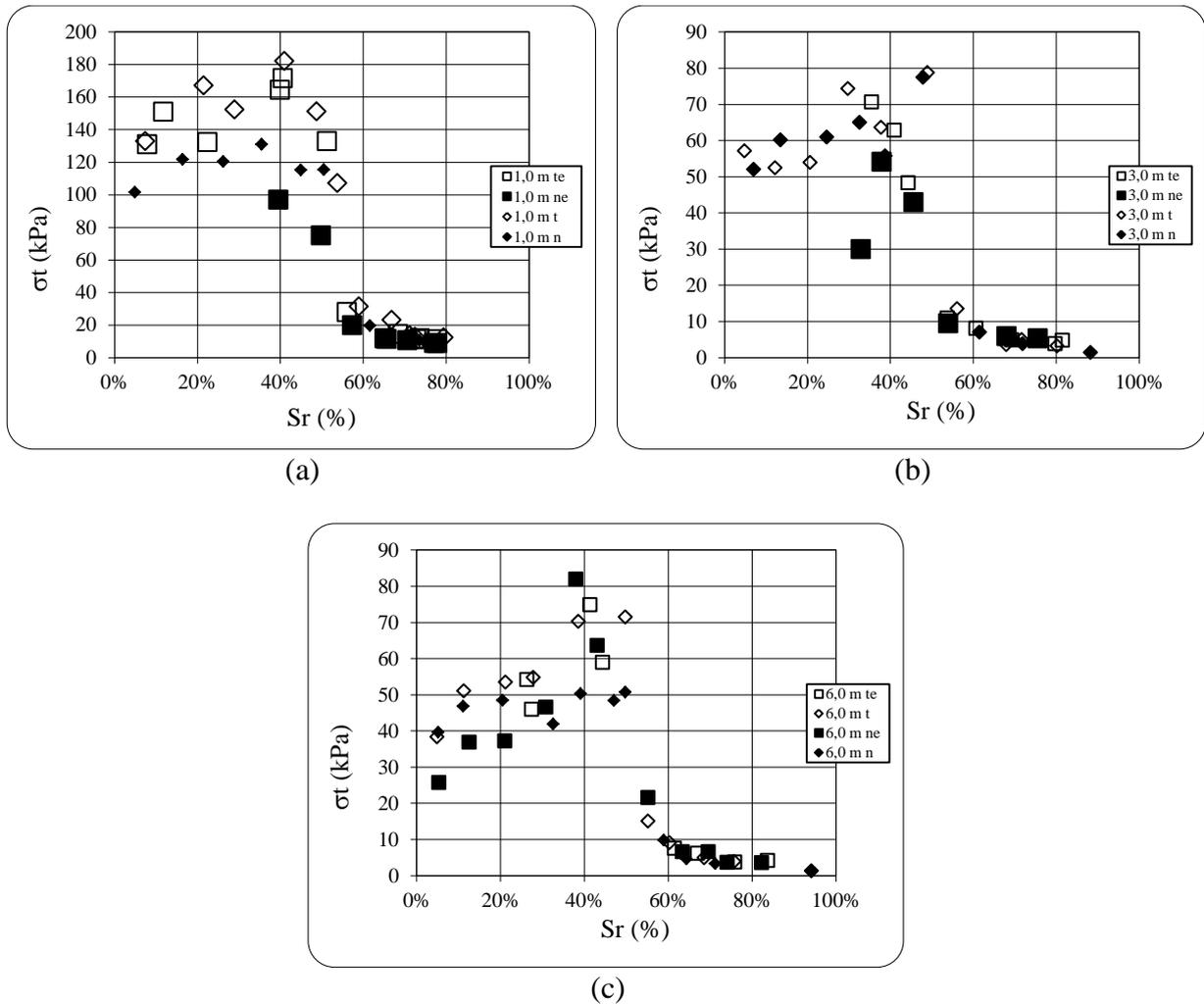
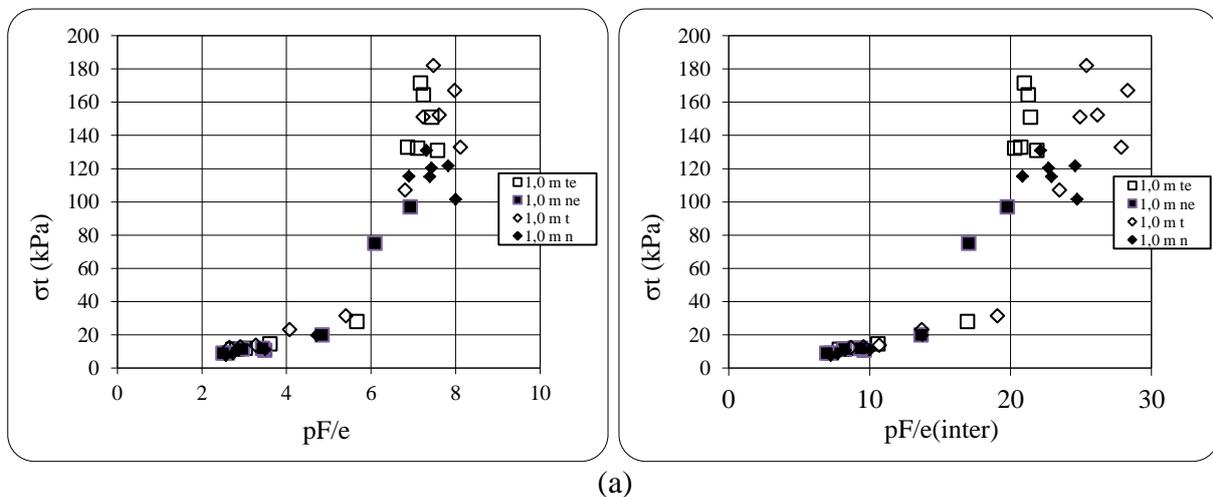


Figura 5.24 Relação Sr% - σ_t (a) 1,0 m (b) 3,0 m (c) 6,0 m

Os gráficos obtidos para a resistência à tração em função de pF/e e de $pF/e_{(inter)}$ (Figura 5.25) permitem avaliar melhor a influência da porosidade e da sucção no comportamento do solo tendo uma relevante importância prática.



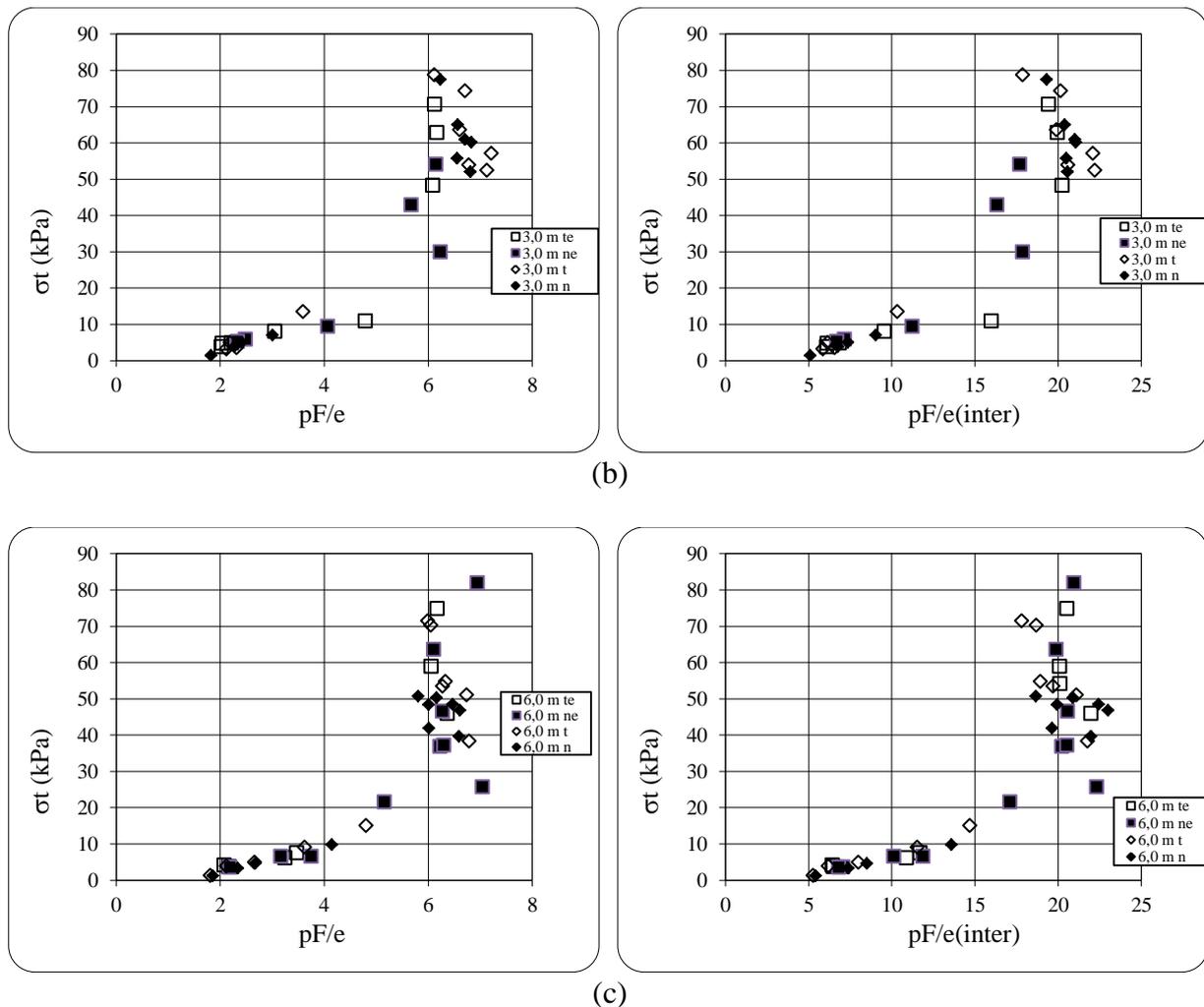


Figura 5.25. Relações “e - σ_t ” e “ $e_{(inter)}$ - σ_t ” (a) 1,0 m (b) 3,0 m (c) 6,0 m

Na figura em menção observa-se que a adição do meio B4 gerou uma melhoria da resistência à tração que confirma os resultados apresentados na Figura 5.23 e Figura 5.24. Cabe destacar que também foi avaliada a evolução da resistência à compressão diametral ao longo do tempo (Figura 5.26).

Os resultados revelam que para os corpos de prova enterrados, a resistência foi muito similar tanto para o solo natural quanto para o solo tratado. Já para aqueles curados no laboratório houve mudanças muito notórias a partir dos 15 dias de cura, as quais atingiram o maior valor aos 30 dias.

Também percebe-se que quando a cura é de 90 dias o comportamento tem uma tendência muito similar a aquela seguida para uma cura de 30 dias, indicando assim, que essa última é suficiente para atingir bons resultados após a adição do meio nutritivo.

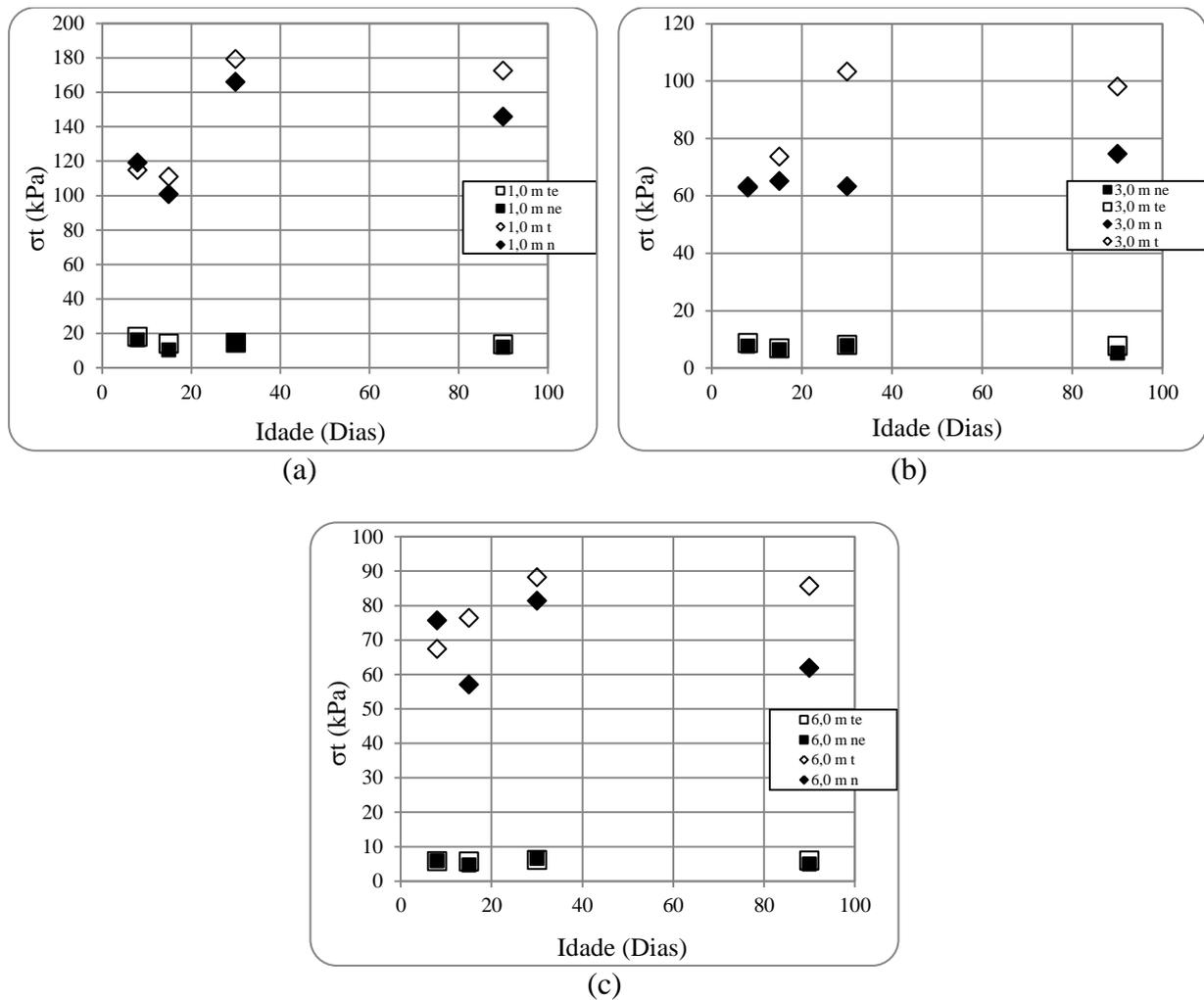


Figura 5.26 Evolução da resistência à compressão diametral com o tempo de cura (a) 1,0 m (b) 3,0 m (c) 6,0 m

Para facilitar as análises dos resultados apresentados na Figura 5.26 foram realizados gráficos que correlacionam pF/e com a idade e a resistência à tração do solo (Figura 5.27), observa-se que a variável que mais influencia o comportamento do solo é a sucção, já a idade passa a ser uma variável secundária nas condições de tratamento adotadas.

Observa-se também que a partir de 30 dias de cura as resistências não apresentaram variações importantes. As superfícies de ajuste mostradas na mesma figura permitem uma melhor visualização do comportamento obtido nos ensaios.

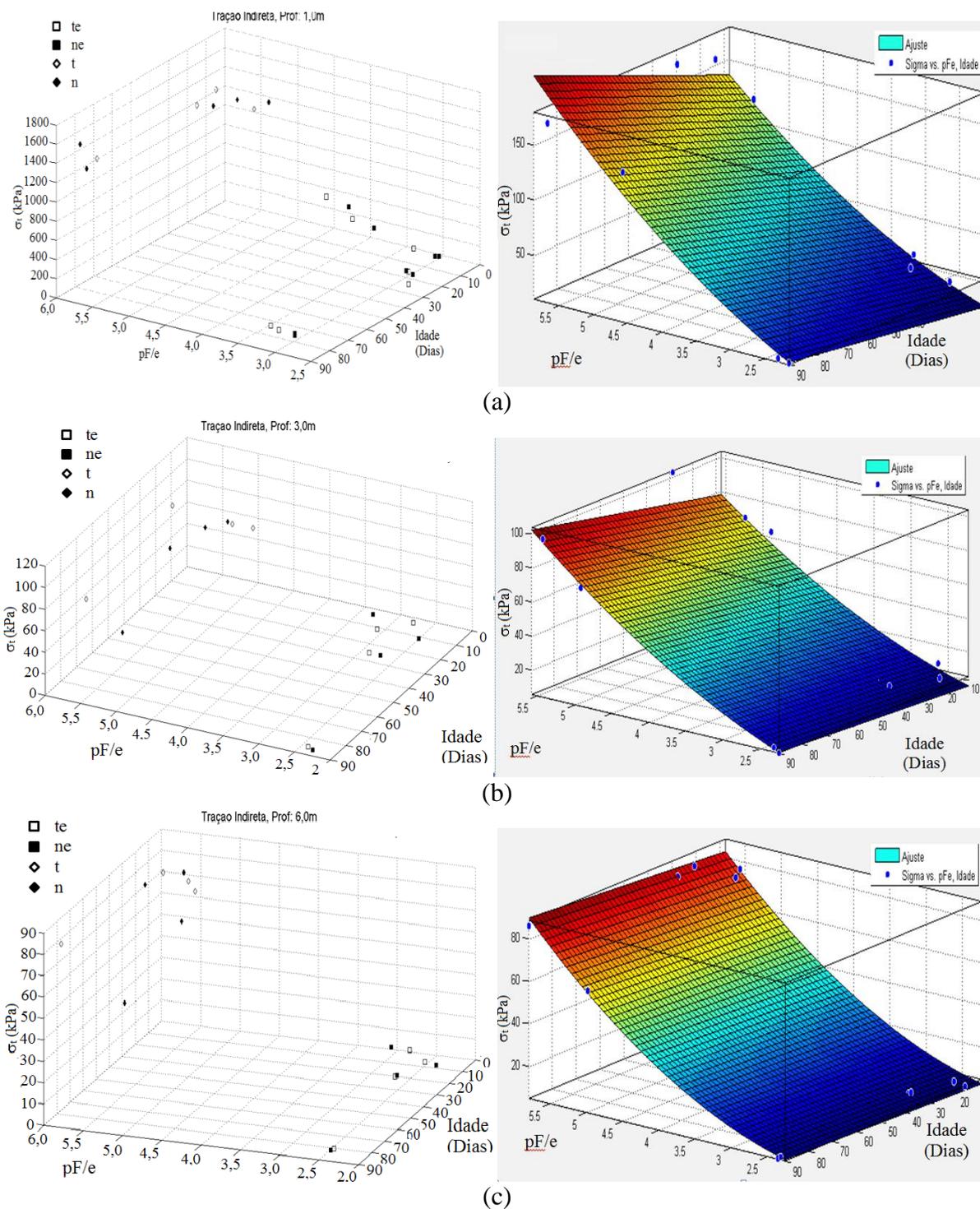


Figura 5.27 Relação pF/e – Idade de cura - σ_t (a) 1,0 m (b) 3,0 m (6,0 m)

A Figura 5.28 mostra que nas amostras não enterradas, para profundidades de 3,0 m e de 6,0 m, surge uma tendência à melhoria da resistência à tração quando do tratamento com o meio B4. Já nos corpos de prova enterrados observa-se que essa tendência não é a mesma, sendo que as resistências dos espécimenes tratados são muito similares às apresentadas por aqueles no estado natural.

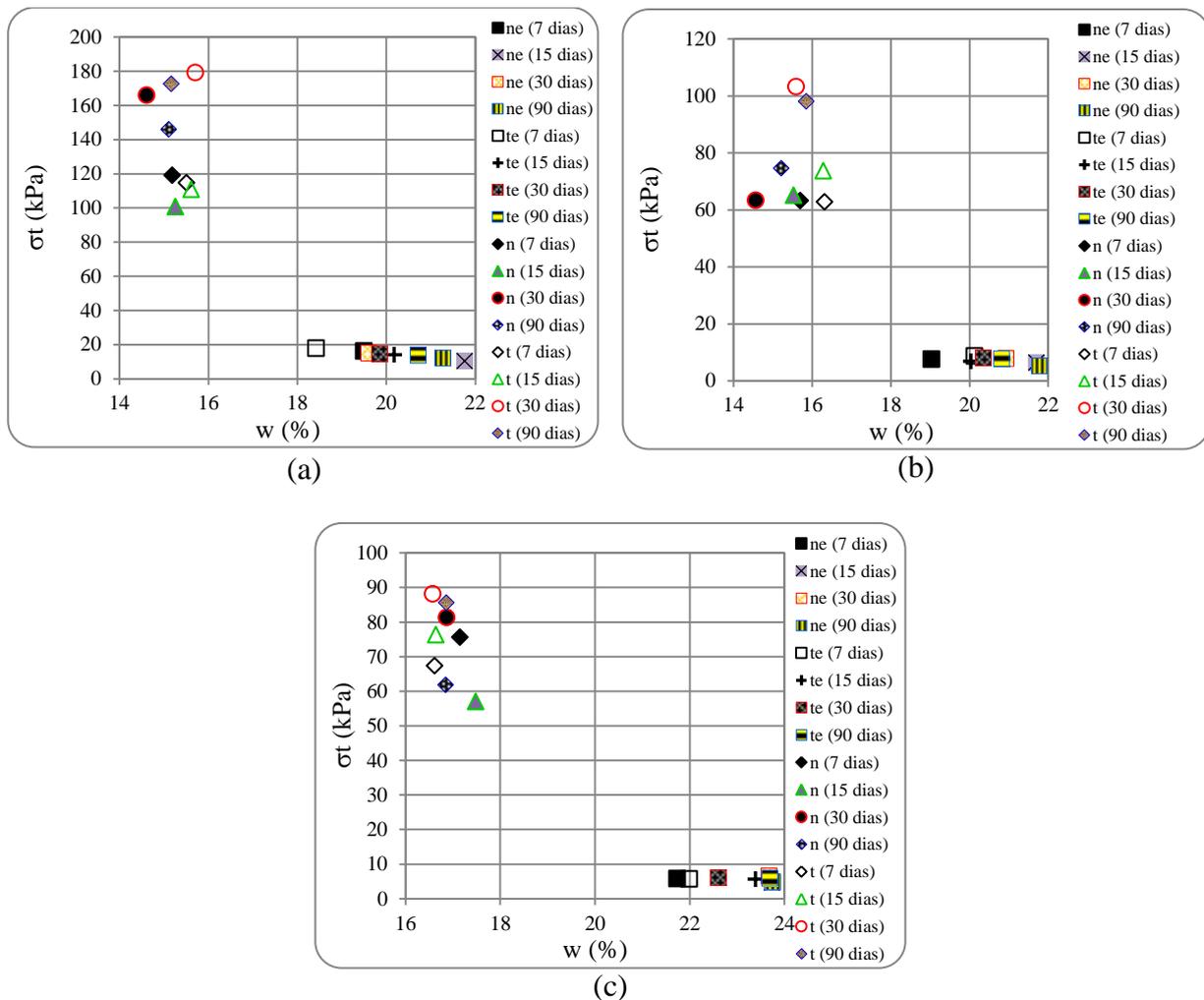


Figura 5.28 Relação $w\%$ - σ_t nas diferentes idades (a) 1,0 m (b) 3,0 m (c) 6,0 m

Também foram realizados gráficos para correlacionar a umidade com a idade de cura e a resistência à tração (σ_t) como apresentado na Figura 5.29. Os resultados revelam que a umidade também exerce grande influência sobre o comportamento do solo sendo o tempo de cura menos relevante para as condições de tratamento adotadas.

De modo geral pode-se definir que para os corpos de prova ensaiados observou-se que a umidade e, conseqüentemente, a sucção são as variáveis com maior influência sobre a resistência à tração indireta do solo compactado no ramo seco da curva de compactação nas três camadas estudadas. No entanto, para as condições de tratamento adotadas não é claro o efeito produzido pela adição do meio B4 no solo, especialmente quando a cura se deu com os corpos de prova enterrados.

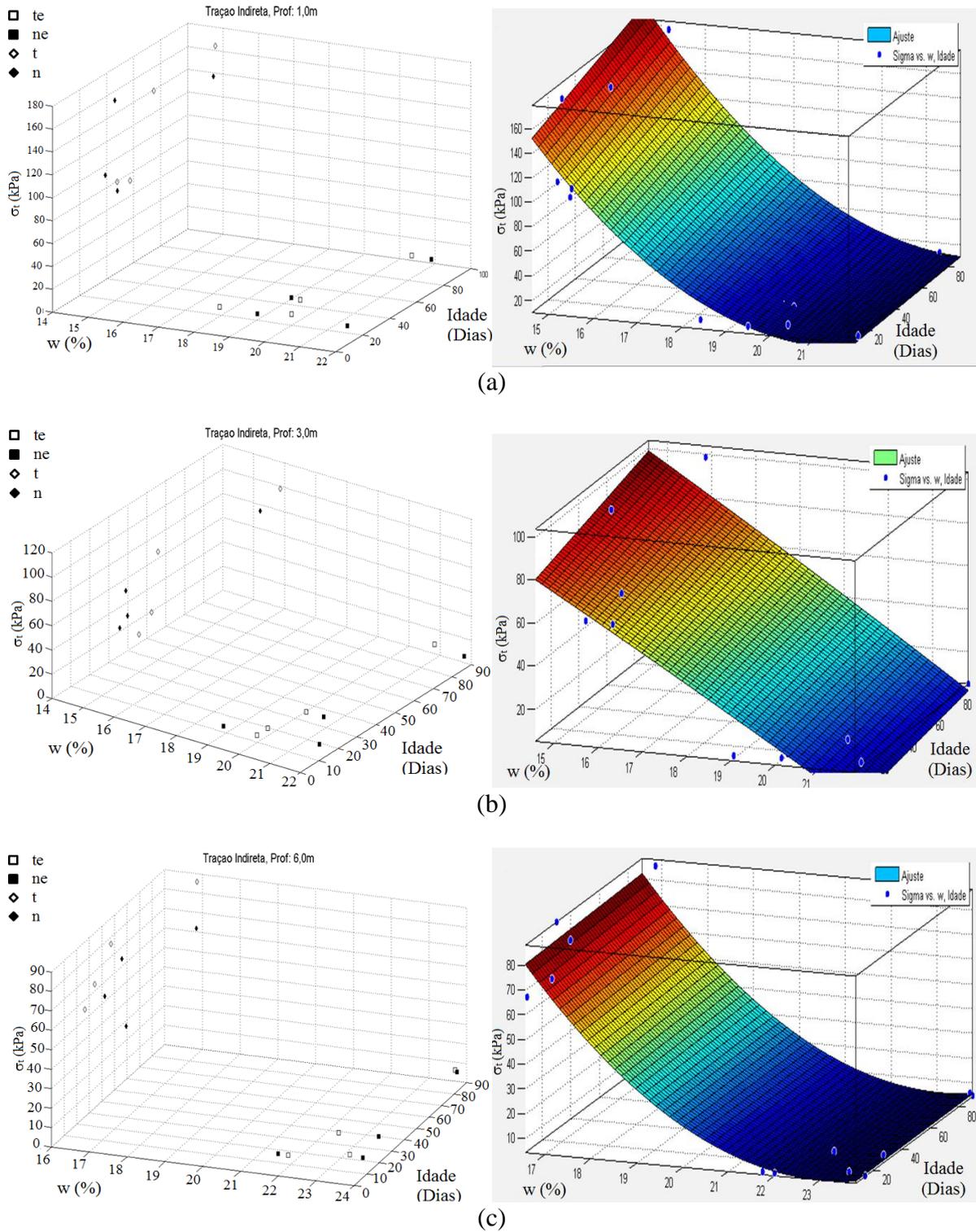


Figura 5.29 Relação w (%) - Idade de cura - σ_t (a) 1,0 m (b) 3,0 m (6,0 m)

Durante a execução dos ensaios de resistência a tração observou-se que todas as rupturas apresentadas pelos corpos de prova, tanto para os naturais quanto para aqueles com tratamento, foram muito similares com uma trinca diametral bem marcada (Figura 5.30).

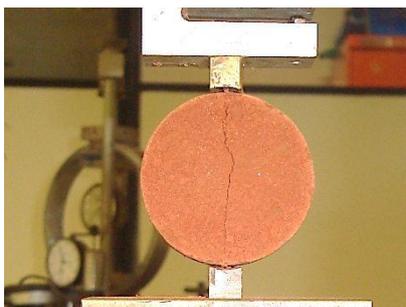


Figura 5.30 Ruptura típica dos corpos de prova em compressão diametral

5.4.3 Resistência à compressão uniaxial (σ_{USC})

A Figura 5.31 ilustra as relações entre a resistência à compressão simples e a umidade de cada um dos corpos de prova para cada idade e tipo de cura. Pode-se verificar que os valores de resistência obtidos sem tratamento têm uma tendência a serem ligeiramente superiores aos obtidos com a adição do meio B4 para as umidades menores que as correspondentes as zonas de macroporos.

Apesar das diferenças verificadas poderem se situar na faixa de repetibilidade do ensaio, tal comportamento é compatível com os resultados de plasticidade, pois a resistência à compressão simples reflete a coesão do solo e está diretamente associada às características plásticas do solo, o que não significa inicialmente, estar diante de um solo pior para uso em pavimentação.

Cabe ressaltar que ocorre uma importante redução da resistência com o aumento da umidade, passando a exibir apenas pequenas variações quando as umidades são superiores a 20%, ou seja, quando elas se encontram na região dos macroporos o que reflete a grande influência da sucção no comportamento mecânico desses solos.

Tal comportamento está de acordo, por tanto, com o exposto pelas curvas características, as quais apresentam uma queda significativa na sucção a partir de umidades similares e, ao atingir umidades mais elevadas do que 20% as diferenças de sucção com o acréscimo da umidade são muito pequenas. Nota-se que nos resultados apresentados os valores de resistência máxima não mudam muito após a adição do meio B4, indicando preliminarmente que o tratamento não estaria sendo efetivo quanto à influência na coesão.

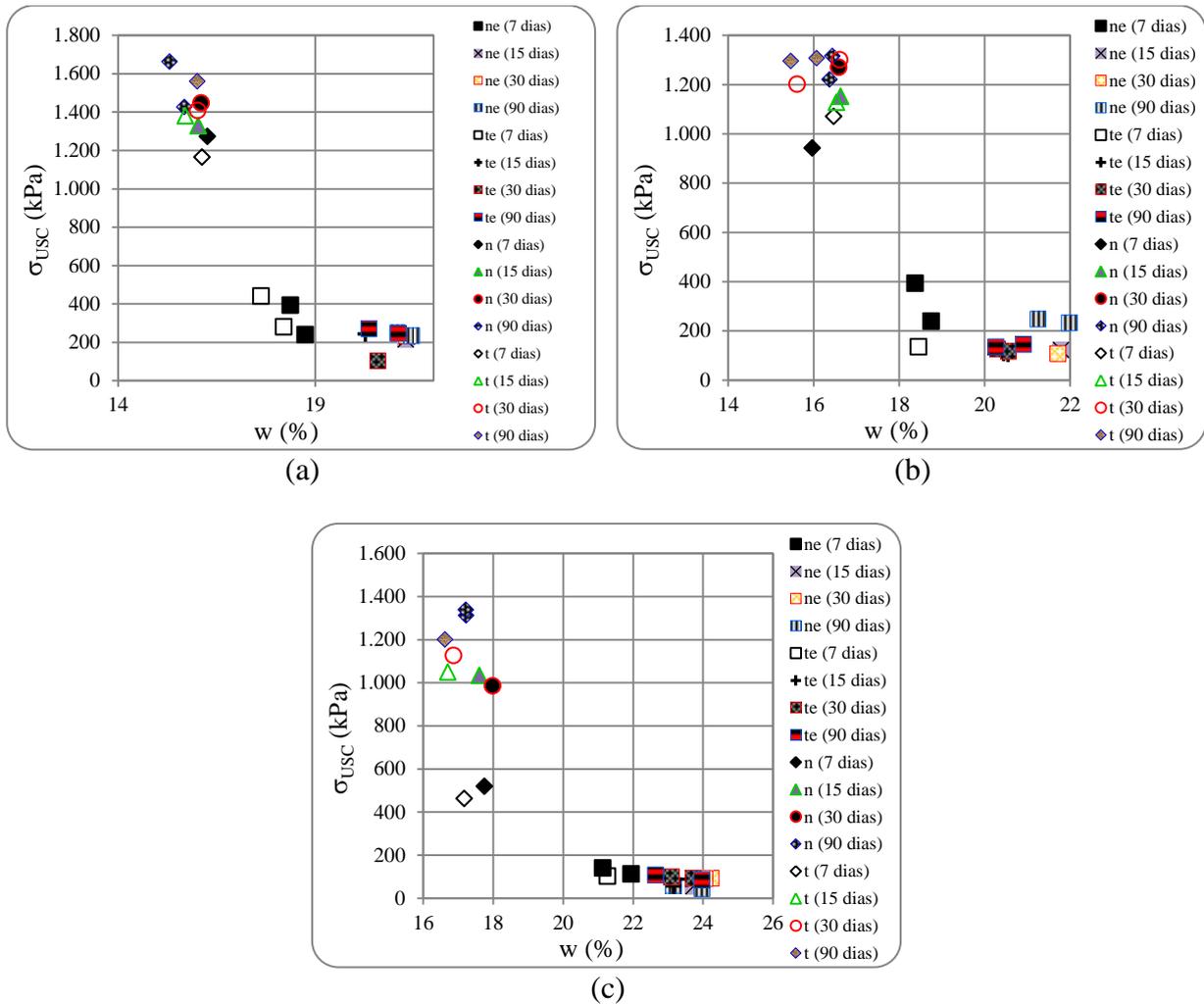


Figura 5.31 Relação $w\%$ - σ_{USC} (a) 1,0 m (b) 3,0 m (c) 6,0 m

Ao realizar a correlação entre a umidade, a idade de cura e a resistência à compressão simples de cada uma das camadas estudadas (Figura 5.32), observa-se também que a variável que mais afeta o comportamento do solo é a umidade e por consequência a sucção. Já a idade perde relevância após 30 dias de cura dos corpos de prova. Isso é melhor visualizado na superfície de ajuste realizada para os resultados obtidos.

Ao relacionar as resistências à compressão simples com a sucção (Figura 5.33) é possível verificar que em questão de resistência à compressão simples não se observa uma melhoria ou piora do solo tratado em relação ao não tratado. Percebe-se também que o comportamento em função da sucção do solo tratado expõe uma tendência muito similar à apresentada pelo solo natural.

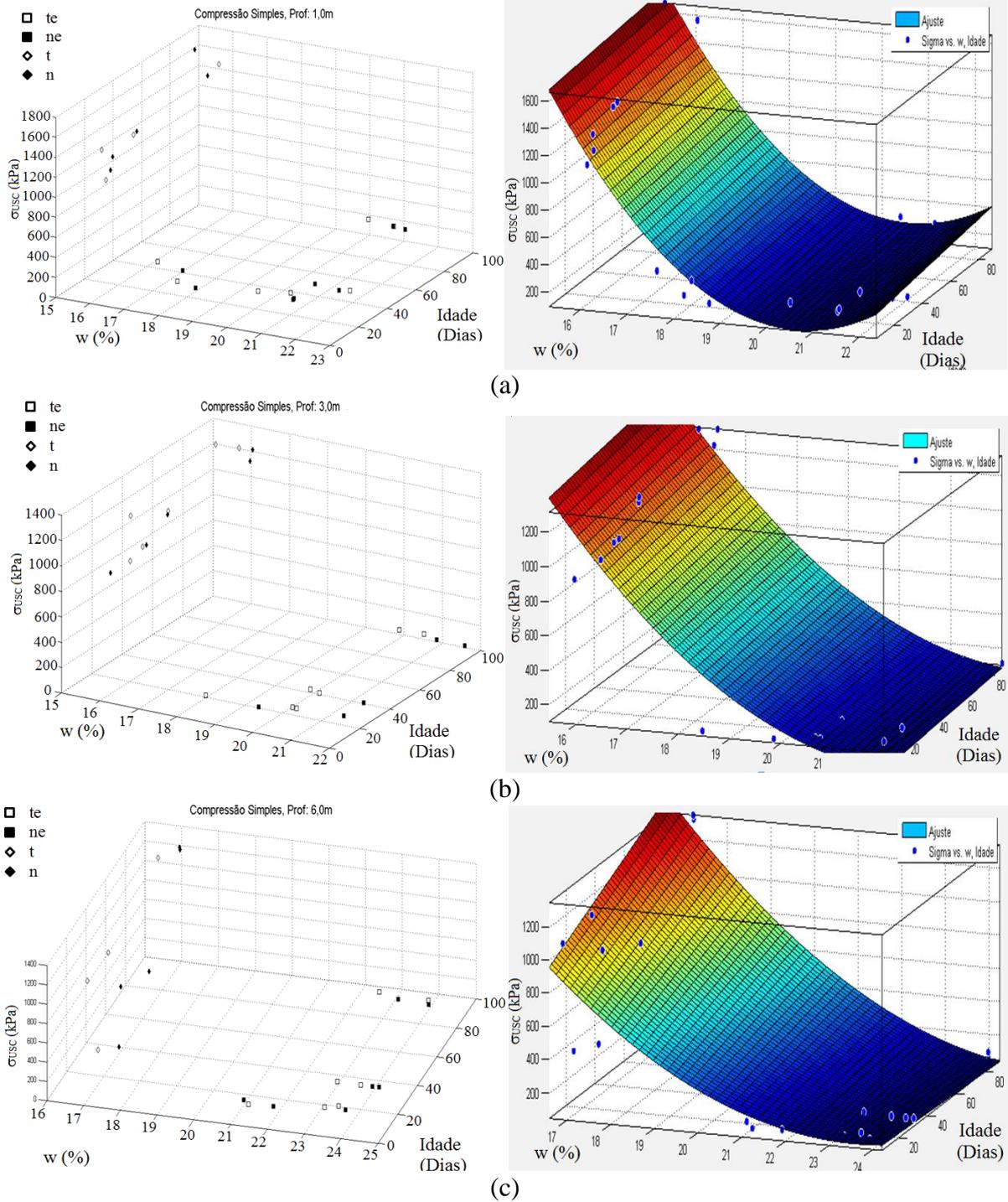


Figura 5.32 Correlação $w(\%)$ - Idade de cura - σ_t (a) 1,0 m (b) 3,0 m (6,0 m)

Para eliminar a influência do índice de vazios no comportamento analisado em função da sucção, foram plotados os pontos de resistência à compressão simples em função da sucção em pF normalizada em relação ao índice de vazios (pF/e) conforme proposto por Camapum de Carvalho e Pereira (2002).

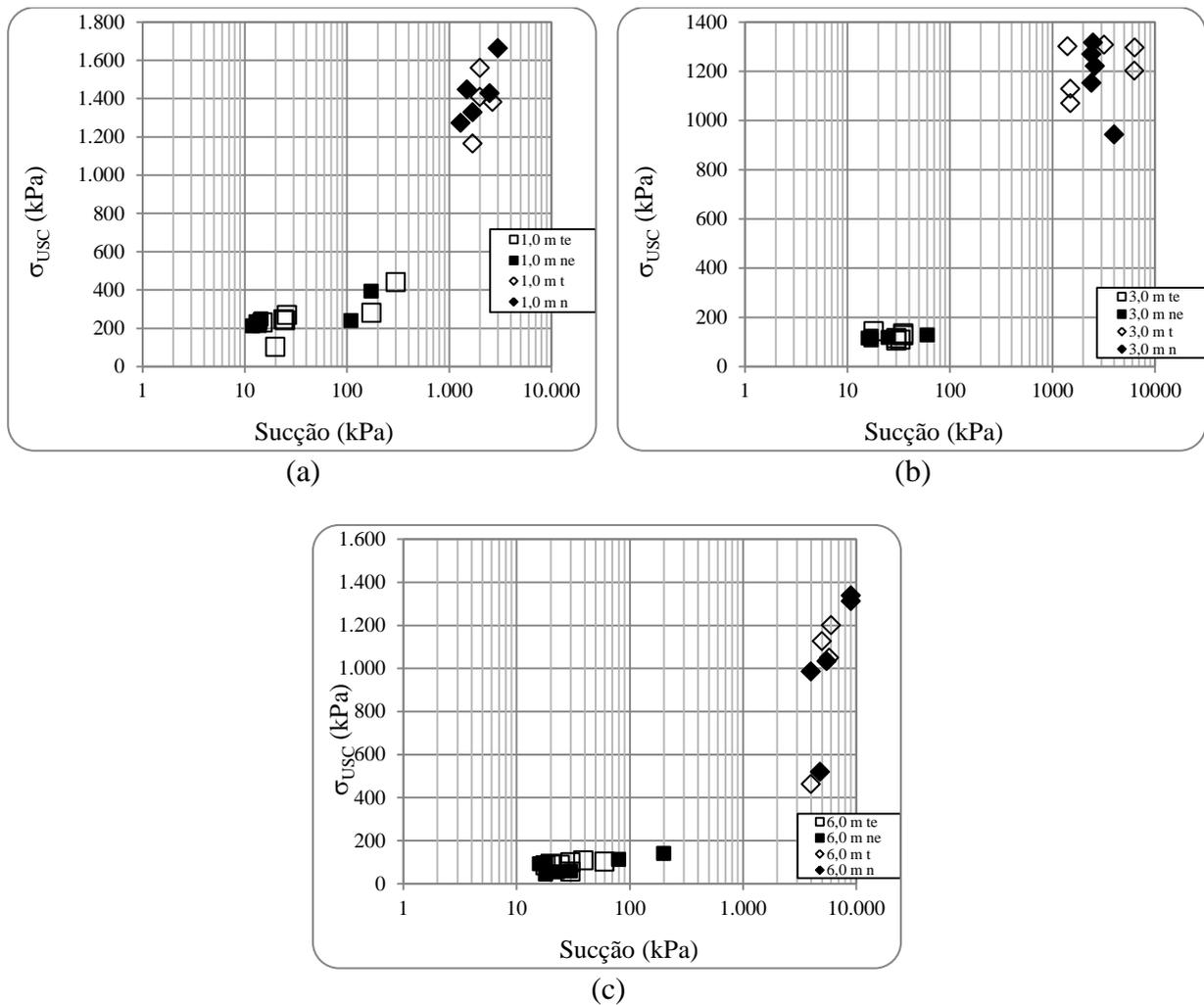


Figura 5.33 Relação sucção - σ_{USC} (a) 1,0 m (b) 3,0 m (c) 6,0 m

No entanto, para tentar verificar melhor o efeito do tratamento sobre a resistência à compressão simples, também foi normalizada a sucção em pF em função do índice de vazios interagregado (Figura 5.34). Na figura em menção verifica-se que usando o índice de vazios global não há uma tendência clara em nenhuma das profundidades e com o uso de $e_{(inter)}$ percebe-se que para 1,0 m e 6,0 m de profundidade surge uma aparente piora do comportamento com o tratamento do solo com o meio B4. Já para 3,0 m se observa uma tendência similar à apresentada pelas outras duas profundidades, no entanto, nos corpos de prova enterrados há uma dispersão que não permite estabelecer se houve uma melhoria ou uma piora.

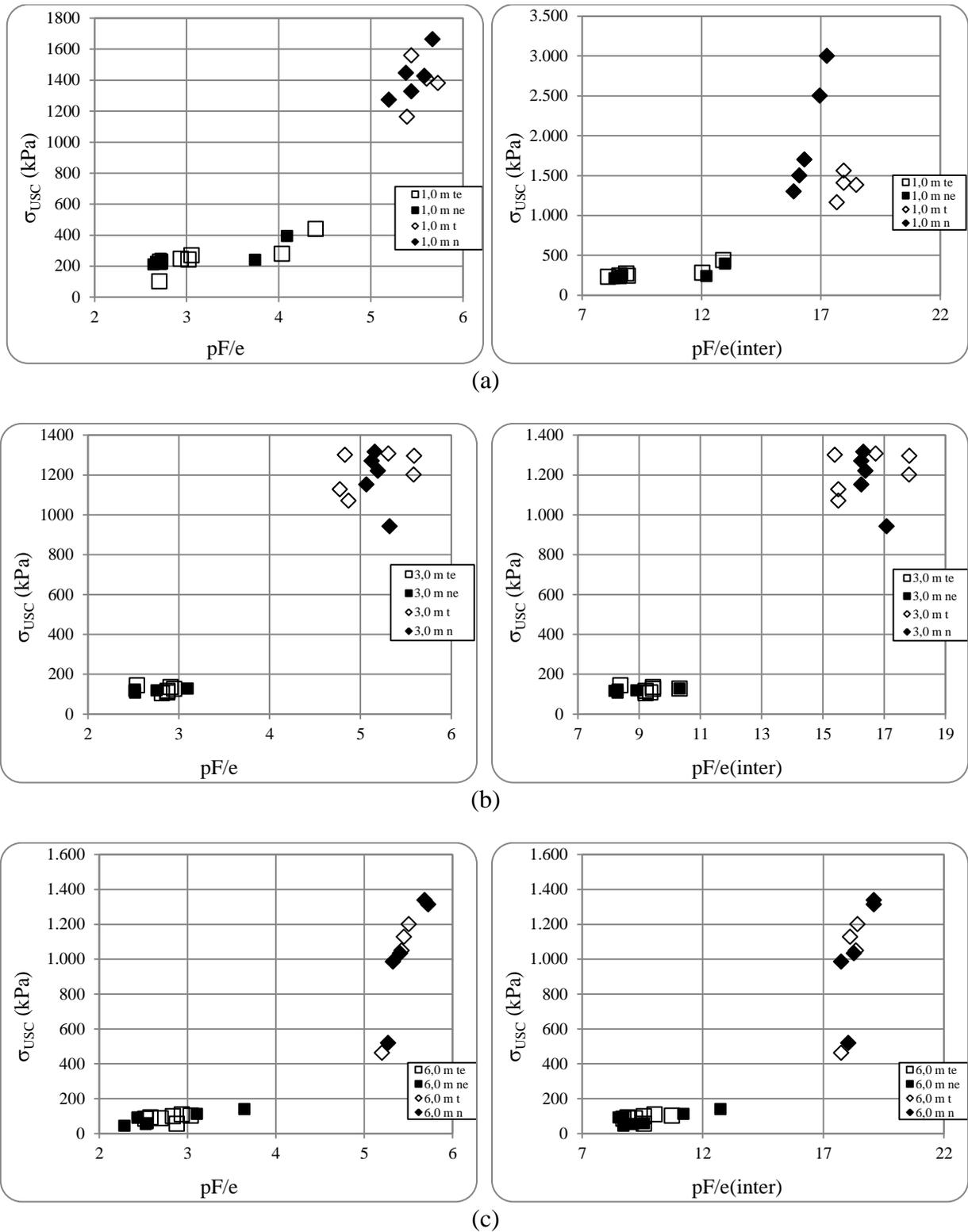


Figura 5.34 Relações “pF/e - σ_{USC} ” e “pF/e_(inter) - σ_{USC} ” (a) 1,0 m (b) 3,0 m (c) 6,0 m

Assim como na tração indireta, foi avaliada a evolução da resistência à compressão simples com o passar do tempo (Figura 5.35). Os resultados permitem inferir que nos corpos de prova cuja cura foi no laboratório apresentam-se fortes incrementos de resistência até completar um

período de cura de 30 dias, a partir dessa idade as mudanças na resistência não são muito significativas. Tal comportamento está conforme o apresentado na compressão diametral.

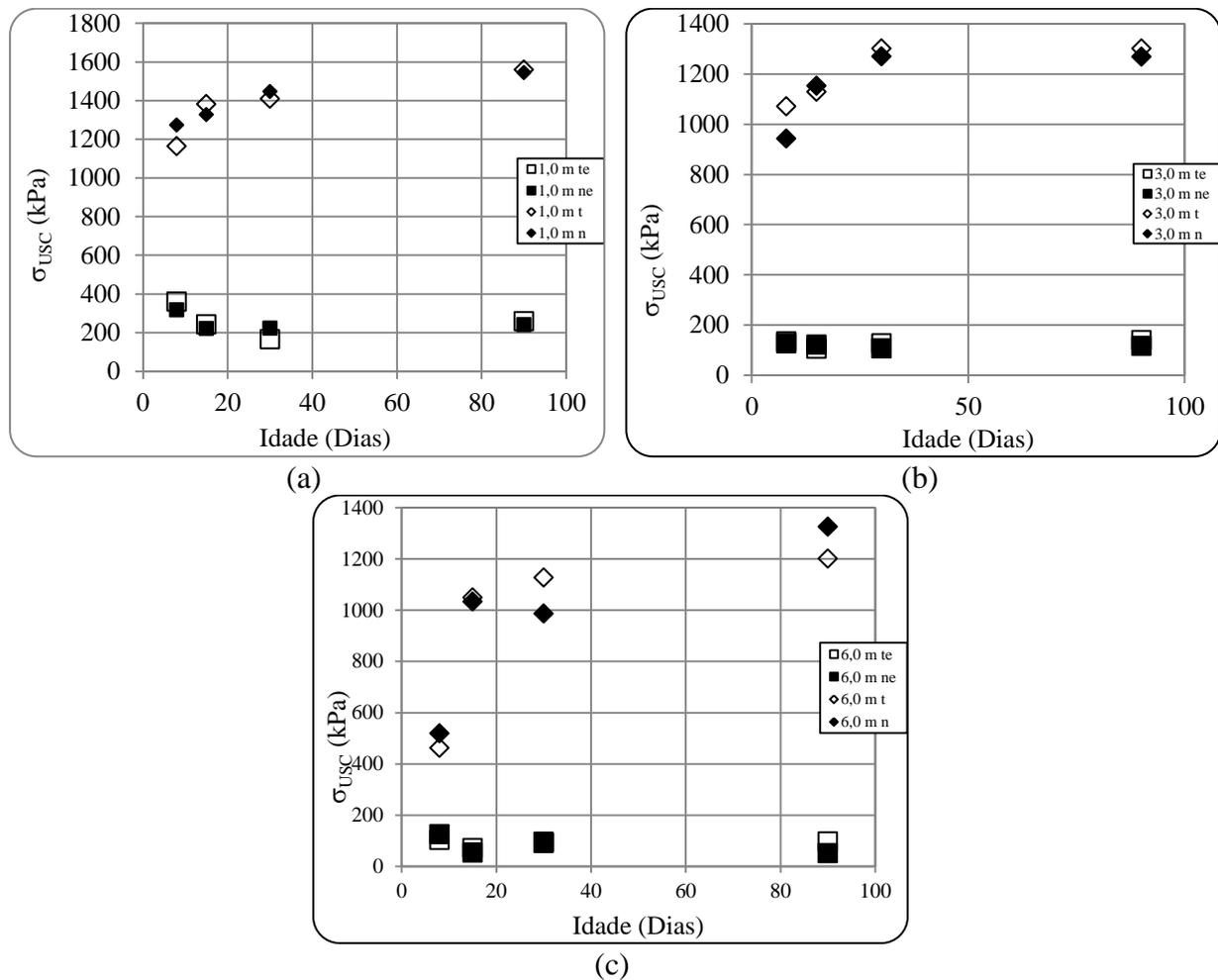
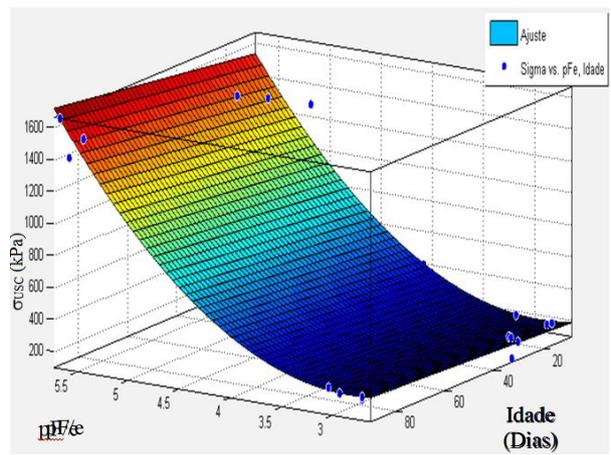
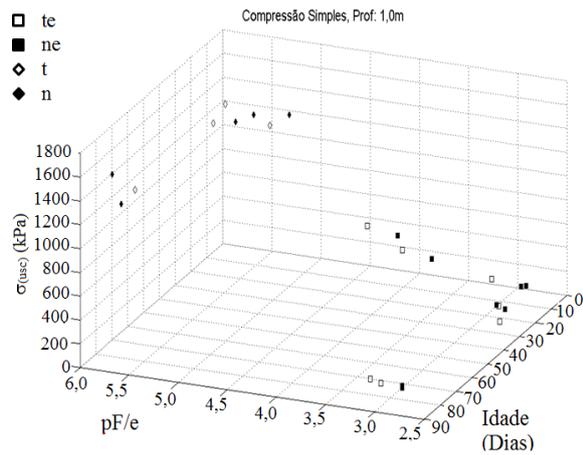


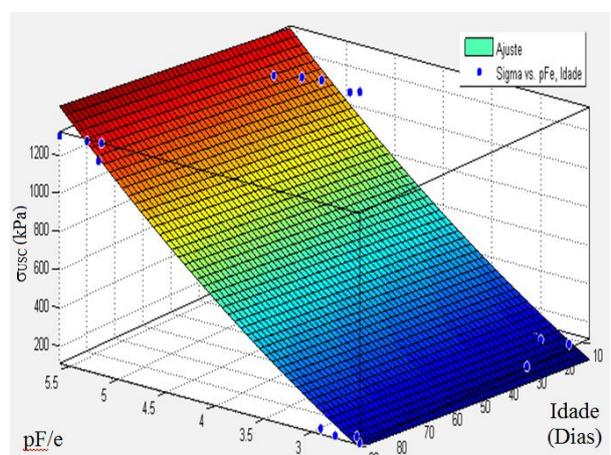
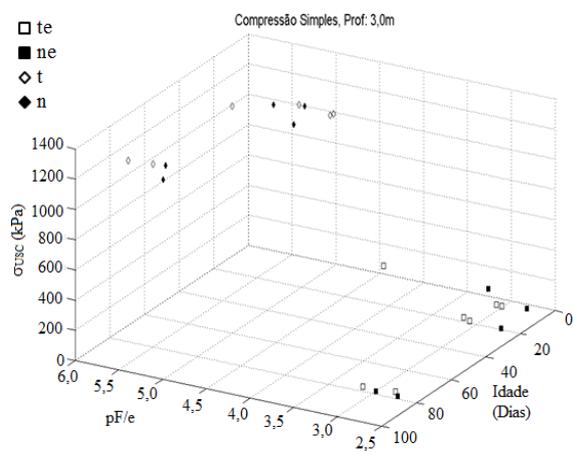
Figura 5.35 Evolução da resistência à compressão simples (a) 1,0 m (b) 3,0 m (c) 6,0 m

Apesar do relatado anteriormente, observa-se que a resistência do solo com tratamento para os dois tipos de cura usados durante a pesquisa não exibe diferenças consideráveis com respeito ao solo natural. Os resultados não são congruentes com aqueles apresentados na compressão diametral, os quais revelam uma melhora após a adição do meio B4 em especial para a profundidade de 1,0 m, pois, a compressão simples tem relação direta com a tração e o comportamento de uma delas normalmente é refletido na outra.

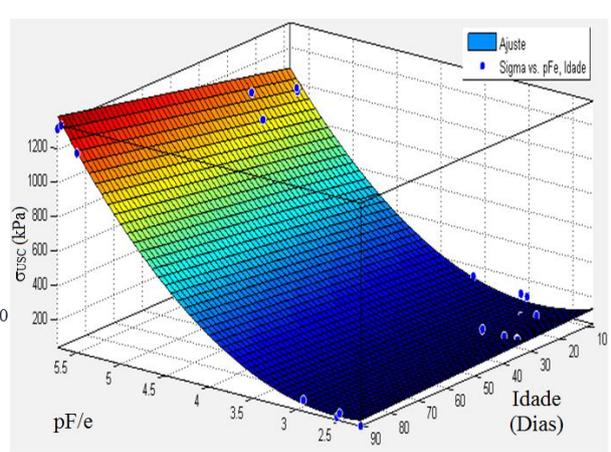
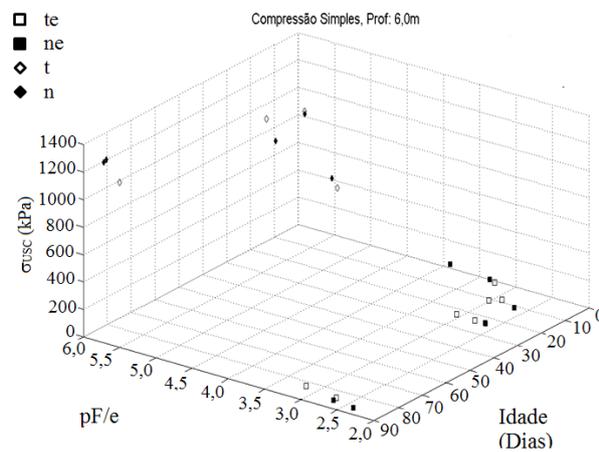
Assim como na tração indireta, foi realizada a correlação entre pF/e a idade de cura e resistência à compressão simples (Figura 5.36), indicando uma vez mais que para as condições de tratamento adotadas a idade de cura tem menor relevância no comportamento do solo que a sucção, pois com 30 dias os valores da resistência à compressão simples são relativamente similares aos apresentados pelos corpos de prova cuja cura foi de 90 dias.



(a)



(b)



(c)

Figura 5.36 Correlação pF/e –Idade - σ_{USC} (a) 1,0 m (b) 3,0 m (c) 6,0 m

O tipo de ruptura apresentado por todos os corpos de prova, tanto para os tratados quanto para os não tratados, consistiu em trincas verticalizadas algumas vezes não muito bem definidas (Figura 5.37).

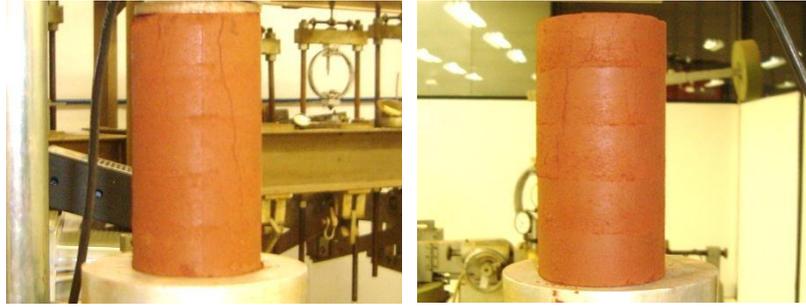


Figura 5.37 Ruptura típica dos corpos de prova em compressão simples

5.4.4 Mini-CBR

O conjunto de resultados obtidos para os ensaios de mini – CBR (Figura 5.38) revela poucas variações após a adição do meio B4, para umidades similares. No entanto, na camada de 1,0 m (Figura 5.38 (a)), quando os corpos de prova foram enterrados houve uma notória melhoria em relação ao solo natural para os valores mais elevados de umidade. Já nas outras camadas não se verifica uma grande diferença entre os valores de mini-CBR para o solo tratado comparado com o não tratado.

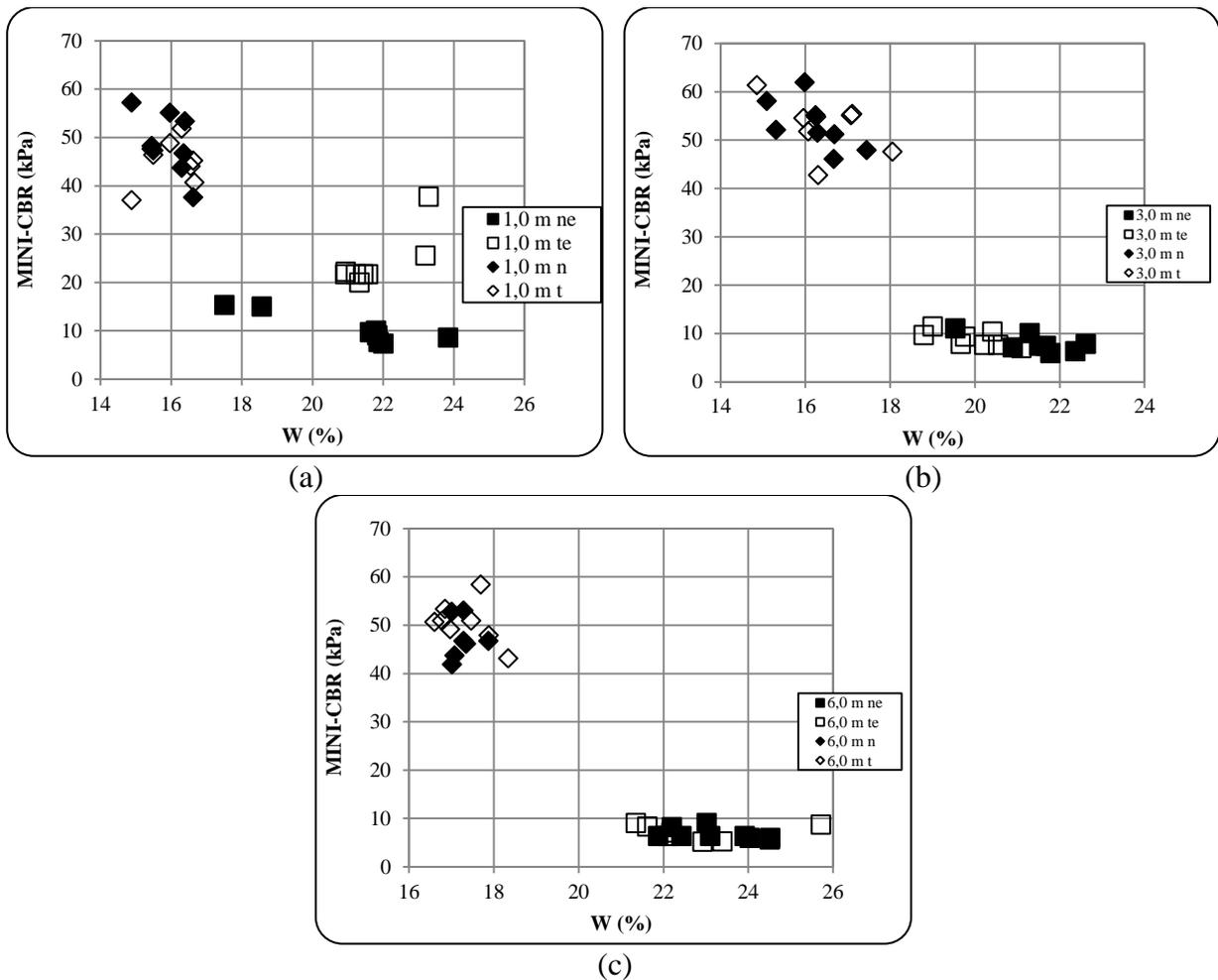


Figura 5.38 Relação “w% - Mini-CBR” (a) 1,0 m (b) 3,0 m (c) 6,0 m

Com a finalidade de avaliar a influência da distribuição dos poros no comportamento, foram plotados os valores de mini-CBR versus a sucção normalizada em pF/e . Cabe ressaltar que além de usar o índice de vazios global “e” a normalização da sucção também foi realizada em função do índice de vazios interagregado, com o intuito de evitar análises equivocadas com respeito ao efeito da adição do meio B4. Os gráficos que expõem esses resultados são apresentados na Figura 5.39.

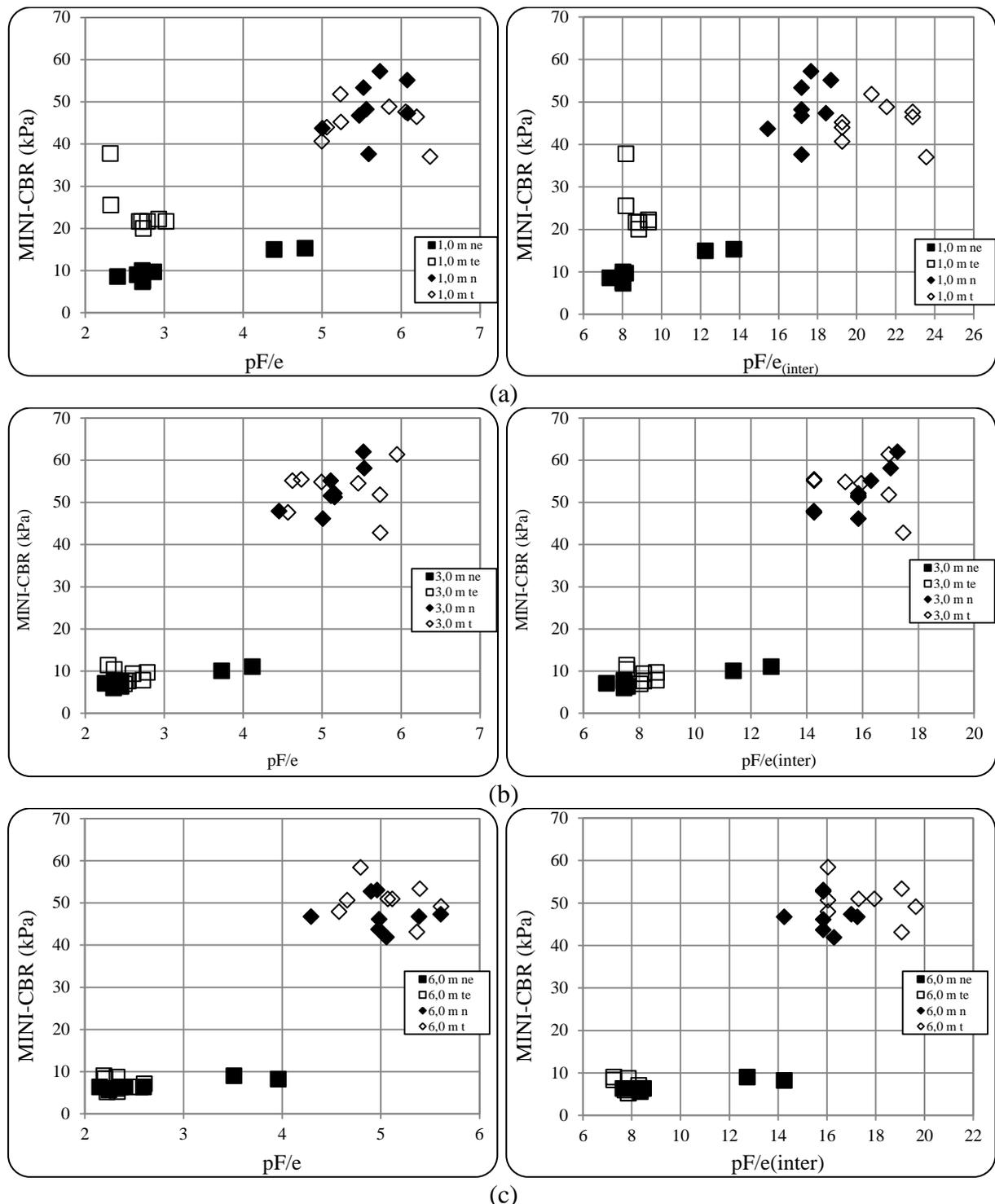


Figura 5.39 Relações “ pF/e –Mini-CBR” e “ $pF/e_{(inter)}$ –Mini-CBR” (a) 1,0 m (b) 3,0 m (c) 6,0 m

Cabe destacar que ao realizar os gráficos com os dois índices de vazios, os resultados permitiram verificar a melhoria produzida pelo tratamento para o solo com profundidade de 1,0 m cujos corpos de prova foram enterrados e encontram-se com menores pF/e , como observado na Figura 5.38.

No entanto, quando analisados os resultados em função de $pF/e_{(inter)}$ se verifica que para os elevados valores de $pF/e_{(inter)}$ essa tendência se inverte. Nos demais casos não é possível definir influência do meio B4 no comportamento do solo. Observa-se ainda que a Figura 5.39 exibe uma tendência, em todas as amostras, de aumentar o valor do mini-CBR com o incremento da sucção.

Durante a execução dos ensaios de Mini-CBR na condição imersa também foi medida a expansão dos corpos de prova. Os resultados permitiram inferir que essa expansão é praticamente independente da presença do meio B4, pois os valores obtidos tanto para o solo natural quanto para o solo tratado estão abaixo de 1,0 %.

5.5 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA APÓS O TRATAMENTO DAS CAMADAS COMPACTADAS NO RAMO SECO

Existe divergência na literatura no que se refere às alterações provocadas pela adição do meio B4, nas propriedades físicas do solo. Autores como Gómez (2006) afirmam que o tratamento não produz modificação nesse aspecto. No entanto, Valencia (2009) e Gómez (2009) defendem a existência dessas alterações. Os resultados apresentados neste item corroboram a afirmação realizada por Gómez (2006), pois não foram encontradas mudanças significativas entre os resultados obtidos para o solo tratado e o não tratado. Faz-se, no entanto, necessário uma análise mais crítica levando-se em conta os aspectos químicos, mineralógicos, texturais e estruturais tendo em vista, em especial, que o efeito de um pode ser contrário ao do outro.

É importante ressaltar que a caracterização física de cada amostra foi avaliada após as rupturas dos corpos de prova correspondentes à última idade de cura (90 dias), conservando a umidade em que o corpo se encontrava no momento da ruptura.

5.5.1 Limites de Atterberg

Nos resultados obtidos a partir dos limites de consistência foi observado que em todos os casos a adição do meio B4 não gerou mudanças relevantes. Assim, na Figura 5.40, é possível verificar que a umidade requerida para atingir o limite de liquidez (w_L) variou relativamente

pouco em cada uma das camadas (Figura 5.40 (a)). O mesmo pode ser dito em relação ao limite de plasticidade (Figura 5.40 (b)). No que tange ao índice de plasticidade as variações podem ser consideradas relevantes para a camada situada a 3,0 m de profundidade (Figura 5.40 (c)). Essa foi a profundidade em que as variações de w_P e w_L também foram as mais importantes. Cabe destacar, porém, que se consideradas as condições de cura separadamente as influências foram menores.

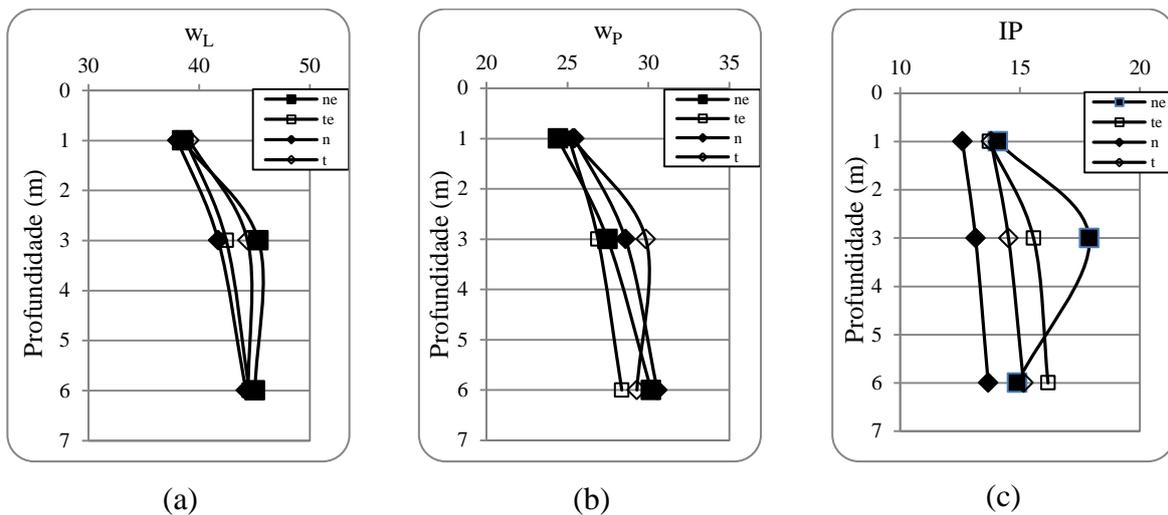


Figura 5.40 Limites de Atterberg em função da profundidade (a) w_L (b) w_P (c) IP

Os limites de Atterberg e o próprio índice de plasticidade do solo poderiam sofrer as seguintes influências com a adição do meio B4:

- A elevação do pH poderia ao aumentar as forças de repulsão auxiliares na desagregação e aumento da plasticidade do solo. Ainda quimicamente sendo o solo caulinitico, trocas com o cálcio do meio poderiam propiciar igualmente o aumento da plasticidade;
- Mineralogicamente não é possível vislumbrar alterações na mineralogia original das camadas de solo, sendo, no entanto, passível da mineralogia sofrer o aporte de minerais como a calcita em função da biomineralização;
- Texturalmente a desagregação ou a agregação do solo tanto pode gerar aumento como redução nesses índices físicos. A avaliação deve se dar calculando-se o possível volume de água no interior dos poros que constituem os agregados. Se o volume de poros propiciar a presença de um teor de umidade maior que cada limite isso implica que artificialmente ele estará sendo aumentado devido a presença de água livre em relação ao limite no interior do poros. Porém, se a umidade for menor que as dos limites sendo o agregado volumetricamente estável, ou seja, não aumentando nem diminuindo de volume com a variação da umidade essa condição conduziria a se medir limites inferiores aos do solo. À

luz desse entendimento é possível avaliar como a agregação ou a desagregação afetaria a plasticidade do solo. Embora exista ainda os aspectos químicos mineralógicos, cabe destacar que Cardoso (2002) mostrou que a remoção dos oxi-hidróxidos de ferro cristalinos e de baixa cristalinidade presentes em solos do Distrito Federal com diferentes graus de intemperização o teor de finos aumentava e a plasticidade diminuía, ou seja, aparentemente a desagregação estaria contribuindo para a redução da plasticidade, mas esse entendimento não pode ser taxativo, pois há a influência químico-mineralógica dos próprios compostos removidos. Essa análise para os solos estudados será feita a seguir.

d) A questão estrutural se mistura nessa análise com a questão textural dispensando maiores comentários, pois agregar e o desagregar tem reflexos diretos sobre a estrutura.

A expectativa gerada, segundo os resultados apresentados por González (2009, 2010) seria de que ocorresse uma biomineralização de carbonato de cálcio com a adição do meio B4. A Figura 5.41 obtida a partir dos dados apresentados por Camapum de Carvalho (1985) em um estudo conduzido sobre uma jazida de solo rico em carbonato de cálcio, mostram que maior o teor de carbonato de cálcio menor a plasticidade do solo sendo o limite de liquidez (w_L) a propriedade mais sensível e o limite de plasticidade (w_P) a menos. O mais importante a ser verificado nesses resultados é que seriam necessários 10% de carbonato de cálcio para provocar uma variação de 4,0% no limite de liquidez e 1,1% no limite de plasticidade, ou seja, provavelmente o carbonato de cálcio oriundo da biomineralização não conduziria por si só a variações claramente perceptíveis nos valores dos limites de Atterberg.

Além dos ensaios de limites de Atterberg também foram realizados ensaios de massa específica dos grãos (Gs), cujos resultados corroboram uma vez mais que a adição do meio B4 não modifica as propriedades físicas do solo.

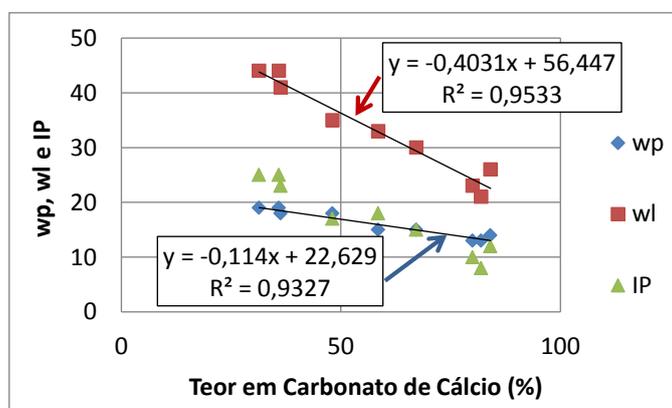


Figura 5.41 Influência do carbonato de cálcio nos limites de Atterberg de um solo tipo Marne (Camapum de Carvalho, 1985).

Partindo dos dados obtidos para a caracterização física do solo foi realizada a classificação de cada uma das amostras mediante o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS). Tal classificação descreve o solo das três camadas como solos do tipo silte argiloso levemente plástico (ML). Já ao realizar a classificação pela metodologia MCT expedida observou-se que todas as amostras de solo analisadas classificam-se como lateríticas do tipo “arenoso laterítico” ou “argiloso laterítico” (LA’-LG’). Assim, pode-se ver novamente que o tratamento não produz variações perceptíveis quanto ao tipo de solo. Os resultados obtidos para os ensaios descritos neste item estão expostos na Tabela 5.10.

Tabela 5.10 Resumo dos resultados de limites de Atterberg, Gs e classificação de solos no ramo seco

Amostra	$w_{(agregados)}$ (%)	w_L (%)	w_P (%)	IP (%)	Gs	MCT	SUCS
1,0 m ne	24	38	24	14	2,69	LA’-LG’	ML
1,0 m te	23	39	25	14	2,69	LA’-LG’	ML
1,0 m n	23	38	25	13	2,69	LA’-LG’	ML
1,0 m t	24	39	25	14	2,7	LA’-LG’	ML
3,0 m ne	26	45	27	18	2,72	LG’	ML
3,0 m te	29	42	27	16	2,71	LG’	ML
3,0 m n	27	42	29	14	2,72	LG’	ML
3,0 m t	23	44	30	15	2,7	LG’	ML
6,0 m ne	26	45	30	15	2,73	LG’	ML
6,0 m te	26	45	28	16	2,73	LG’	ML
6,0 m n	23	44	31	14	2,73	LG’	ML
6,0 m t	22	44	29	15	2,72	LG’	ML

Na tabela anterior apresentam-se também as umidades relativas aos agregados ($w_{(agregados)}$) de cada uma das amostras trabalhadas. Tais umidades ao serem menores que w_P indicam que há interferência da água livre nos microporos, sendo que para a amostra de 3,0 m tratada enterrada o resultado foi maior que o limite de plasticidade, neste caso o efeito é refletido em um aumento artificial da plasticidade.

5.5.2 Análises granulométricas após o tratamento

Todas as amostras de solo natural e tratado foram submetidas a ensaios granulométricos com o intuito de verificar a influência do nutriente na agregação ou desagregação do solo natural. Tais análises foram realizadas mediante o emprego do granulômetro a laser. Os valores dos teores de cada fração granulométrica obtida a partir das análises granulométricas estão tabulados na Tabela 5.11. Para uma melhor interpretação dos dados apresentados nessa

tabela, as curvas granulométricas são apresentadas no Anexo B (Figura B.1, Figura B.2 e Figura B.3). É importante salientar que cada amostra foi submetida a três tipos de metodologia para a execução do ensaio, i) unicamente água, ii) ultrassom (U) e iii) ultrassom + defloculante + ultrassom (U-DEF-U).

Tabela 5.11 Teores das frações granulométricas no solo compactado no ramo seco

TIPO DE SOLO	AMOSTRA	AREIA (%)	SILTE (%)	ARGILA (%)	
1,0 m	Natural	N	89	11	0
		U	29	65	6
		U-DEF-U	29	65	6
	Tratado	T	86	14	0
		U	29	65	6
		U-DEF-U	26	67	7
	Natural Enterrado	NE	85	15	0
		U	26	65	9
		U-DEF-U	24	66	10
	Tratado Enterrado	TE	85	15	0
		U	33	60	7
		U-DEF-U	33	59	8
3,0 m	Natural	N	89	11	0
		U	33	65	3
		U-DEF-U	32	65	3
	Tratado	T	90	10	0
		U	41	50	9
		U-DEF-U	37	53	11
	Natural Enterrado	NE	74	25	1
		U	33	60	7
		U-DEF-U	17	75	8
	Tratado Enterrado	TE	87	13	0
		U	25	68	6
		U-DEF-U	20	70	10
6,0 m	Natural	N	87	13	0
		U	15	76	9
		U-DEF-U	16	74	10
	Tratado	T	88	12	0
		U	14	76	10
		U-DEF-U	14	75	11
	Natural Enterrado	NE	85	14	0
		U	33	60	7
		U-DEF-U	28	62	11
	Tratado Enterrado	TE	85	15	1
		U	25	67	8
		U-DEF-U	24	65	12

Ao verificar os valores dos teores de cada fração granulométrica observou-se que em nenhum dos casos houve conteúdo de material grosso, tais como areia grossa e pedregulho. Observa-se ainda que as percentagens de areia, tanto para o solo natural quanto para o tratado, sofrem uma considerável redução quando aplicado o ultrassom colocando em evidência a sua natureza de agregado. Por outro lado, ao adicionar o defloculante e novamente o ultrassom, aquela redução tende a sofrer pequeno aumento, especialmente na fração areia indicando assim que os agregados presentes no solo são sensíveis a ações mecânicas e a ações químicas.

Nas frações granulométricas da Tabela 5.11 notou-se que há uma variação pequena entre as apresentadas no solo natural e aquelas do solo tratado. No entanto, ao observar as curvas granulométricas correspondentes a cada camada, é possível ver que em alguns casos o tratamento gerou uma leve agregação do solo. Na camada de 1,0 m (Figura B.1), quando o solo foi curado em laboratório, percebeu-se que a adição do meio B4 gerou uma desagregação. Já nas amostras enterradas ocorreu o contrário, houve um aumento da fração areia e uma diminuição das frações silte e argila. No caso da camada de 3,0 m (Figura B.2), há evidências de melhoria na agregação quando o processo de cura foi enterrado, mas ao verificar as amostras que não foram enterradas, o comportamento é diferente, pois percebe-se que foi gerada uma agregação e desagregação ao mesmo tempo, pois nas frações argila e areia houve aumento, mas na fração silte ocorreu o efeito contrário. Já na camada de 6,0 m (Figura B.3), os resultados exibem um comportamento diferente, gerou-se uma leve agregação nas amostras curadas em laboratório e, nas amostras enterradas, observou-se o efeito contrário.

A princípio, as análises granulométricas indicam que o tratamento com a adição do meio B4 gera alteração no estado de agregação das partículas, sendo, porém, seu efeito pequeno. É plausível admitir que os agentes desagregadores, em especial o ultrassom, também esteja atuando na quebra das possíveis ligações promovidas pela existência de CaCO_3 precipitado após o tratamento.

Os solos tropicais possuem microagregações de argila que geralmente geram uma variação considerável nos teores das frações granulométricas, as quais são causadas por fatores como acidez e intemperismo (Araki, 1997). Portanto, é importante avaliar as frações granulométricas do solo. Para isso usou-se o teor de agregação (T.A.), que indica o grau de agregação que o solo apresenta. O T.A. é calculado a partir da equação (2.9) a seguir:

$$T.A. = \frac{\% \text{ argila com defloculante} - \% \text{ argila sem defloculante}}{\% \text{ argila com defloculante}} \quad (2.9)$$

O teor de agregado pode ainda ser calculado considerando-se o conjunto de agregações e desagregações que ocorrem no solo em função de determinado tratamento, por exemplo teores determinados com e sem o uso de defloculante ou do próprio tratamento com o meio B4. Nesse caso faz-se o cálculo das diferenças para cada fração entre os teores obtidos com e sem a ação do agente agregador ou desagregador. Como trabalha-se com todo o solo, a somatória dos valores negativos deve se igualar à somatória dos positivos, ou seja uma areia que se desagregou gerará silte e/ou argila assim como o silte gerará argila sendo o mesmo verdade quando o fenômeno for o de agregação. Na Tabela 5.12 pode-se observar a variação do T.A. para cada uma das camadas objeto de estudo na pesquisa.

Tabela 5.12 T.A. das amostras em cada camada

	TIPO DE SOLO	TA (%)	TAT (%)
1,0 m	Natural Enterrado (NE)	98	61
	Tratado Enterrado (TE)	99	61
	Natural (N)	100	60
	Tratado (T)	100	61
3,0 m	Natural Enterrado (NE)	91	57
	Tratado Enterrado (TE)	100	57
	Natural (N)	100	58
	Tratado (T)	100	65
6,0 m	Natural Enterrado (NE)	96	63
	Tratado Enterrado (TE)	94	63
	Natural (N)	99	73
	Tratado (T)	100	73

Percebe-se que a variação desse valor no solo tratado com respeito ao apresentado pelo solo natural, foi muito pouca. Portanto, é possível constatar que o tratamento gerou um aumento muito leve na floculação/agregação das partículas.

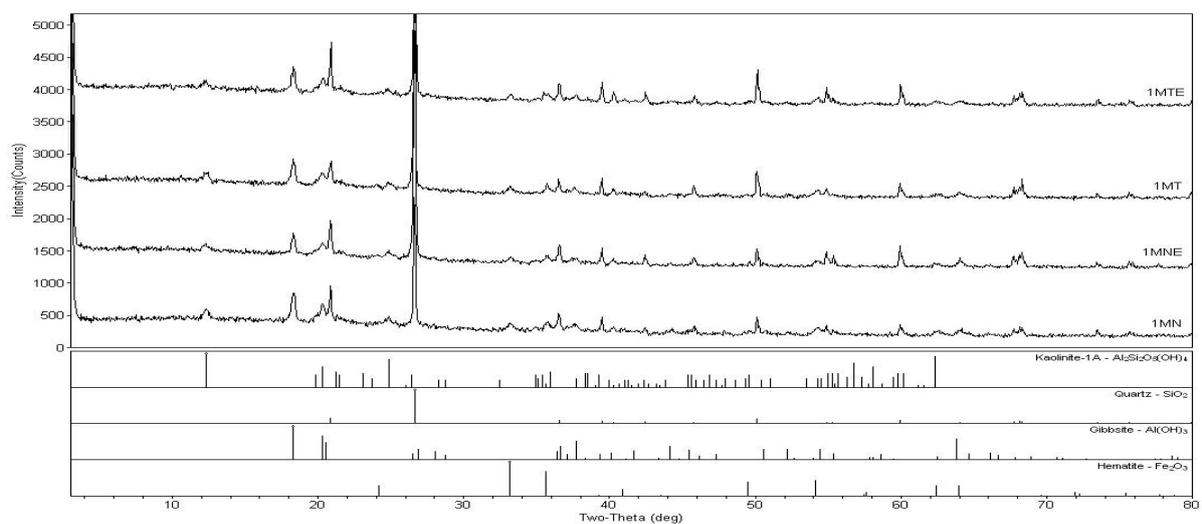
Na pratica esse efeito é quase imperceptível, pois a maior diferença entre os valores de T.A. do solo tratado com respeito ao natural foi de 1% nas camadas 1,0 m e 6,0 m. Já na camada de 3,0 m essa diferença foi de 9%, valor que já é considerável para fins práticos.

5.6 CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA DO SOLO APÓS COMPACTAÇÃO NO RAMO SECO

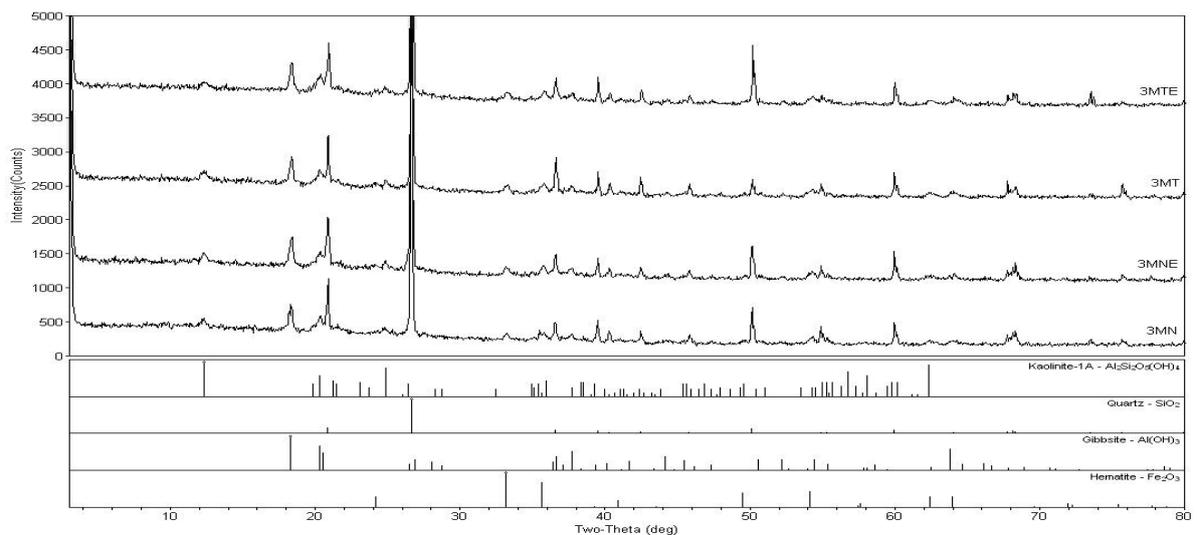
Os solos do Distrito Federal (DF) estão compostos por minerais secundários como caulinita, ilita, goethita, hematita, gibbsita e o quartzo primário (Lima, 2003). Além desses, também há uma quantidade importante de amorfos de Fe, Al e Si.

Os difratogramas resultantes das análises de DRX, para as três camadas estudadas nesta pesquisa, são coincidentes com a composição apontada por Camapum de Carvalho (1985), pois indicam a presença de gibbsite, quartzo, caulinita e hematita, sendo os dois primeiros os minerais predominantes (Figura 5.42).

Os difratogramas das amostras tratadas revelam uma composição mineralógica semelhante a apresentada pelos respectivos solos das camadas na condição natural sem indicar a presença de CaCO_3 . Isso pode ter sido causado por uma sobreposição de picos de minerais que estão em maior quantidade que o CaCO_3 , o que pode, portanto, dificultar a identificação dos mesmos.



(a)



(b)

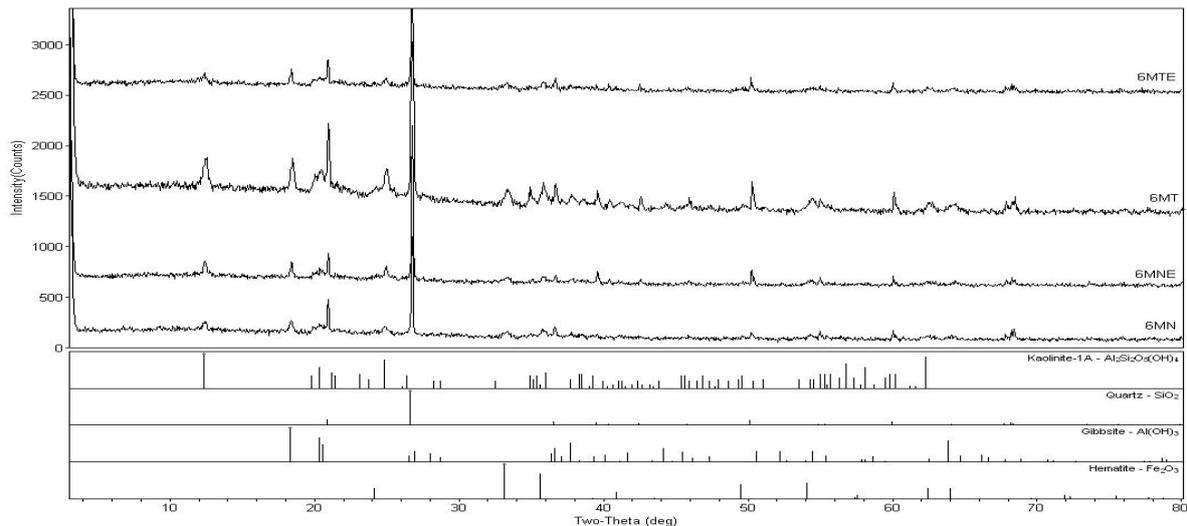


Figura 5.42 Difratomogramas de raios-X (DRX) (a) 1,0 m (b) 3,0 m (c) 6,0 m

Cabe lembrar que dependendo do estado em que se encontre o carbonato de cálcio pode ainda ser inibidor dos picos dos minerais presentes no solos, motivo pelo qual Camapum de Carvalho (1985) ao estudar um solo rico em carbonato de cálcio eliminou a sua presença para que fossem feitas análises mineralógicas mais precisas.

É importante ressaltar que a técnica de DRX não dá o teor exato dos minerais que constituem o solo, mas sim, uma ideia estimada da variação em proporções dos mesmos, pois quanto mais fechado e intenso seja o pico, o mineral estará melhor cristalizado. Portanto, nos difratogramas obtidos para cada uma das camadas (Figura 5.42) observou-se que os minerais cujos picos apresentam essas características correspondem a gibbsita e quartzo e, em menor proporção encontram-se a caulinita e a hematita. Tais difratogramas também são coerentes com a composição mineralógica apresentada por Camapum de Carvalho (1985), na qual os minerais predominantes nas três camadas estudadas nesta pesquisa são a gibbsita e o quartzo e, com menor predominância encontram-se a caulinita e a hematita.

Constata-se também com esses resultados o nível de intemperismo do perfil de solo, ao verificar que os minerais predominantes são típicos de um solo com um nível alto de intemperização devido à presença marcante de gibbsita. Cabe destacar que na camada de 6,0 m (Figura 5.42 (c)) a proporção dos minerais predominantes muda, sendo o mais importante a caulinita e posteriormente encontram-se a gibbsita e o quartzo e por último tem-se a hematita.

Além dos ensaios de DRX foram realizados testes com ácido clorídrico (HCl), com o intuito de confirmar a existência de carbonato de cálcio, sendo que todas as amostras tratadas apresentaram efervescência indicando assim a sua presença.

5.7 DETERMINAÇÃO DO pH DEPOIS DE 90 DIAS DE CURA

Para verificar se o tratamento provocava variação no pH, foram realizadas determinações no solo natural e no solo tratado após 90 dias de cura. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 5.13. Cabe salientar que as medidas de pH foram realizadas com dois tipos de solvente: água (H₂O) e cloreto de potássio (KCl). Era de se esperar que a adição do meio B4 gerasse um aumento no pH, no entanto, isto não foi verificado de modo claro e relevante. Por outro lado, ao comparar os valores medidos para as mesmas camadas de solo sem tratamento no início da pesquisa (Tabela 5.13), observa-se que as medidas tomadas após os 90 dias de cura são mais altas.

Tabela 5.13 Valores de pH obtidos no ramo seco

AMOSTRA	H ₂ O	KCl	ΔpH
1,0 m ne	7,08	6,30	-0,78
1,0 m te	7,09	6,32	-0,76
1,0 m n	7,12	6,48	-0,64
1,0 m t	7,29	6,41	-0,44
3,0 m ne	6,26	6,54	0,10
3,0 m te	6,55	6,80	0,09
3,0 m n	6,65	6,71	0,02
3,0 m t	7,03	6,78	-0,09
6,0 m ne	5,88	5,27	-0,23
6,0 m te	5,74	5,66	-0,03
6,0 m n	6,49	5,73	-0,29
6,0 m t	6,10	6,05	-0,02

Na Tabela 5.13 também se observa que os valores de ΔpH do solo tratado permaneceram com as mesmas tendências observadas para o solo natural tanto no início da pesquisa quanto após o tratamento, indicando que as camadas 1,0 m e 6,0 m conservam a predominância de argilas silicatadas e que a camada 3,0 m o valor positivo da indícios de que o solo é rico em oxi-hidróxidos de Al e Fe. Tais resultados são coerentes com a composição mineralógica obtida durante os ensaios de DRX.

5.8 CARACTERIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DAS CAMADAS DE SOLO COMPACTADAS NA UMIDADE ÓTIMA

Os corpos de prova foram confeccionados em condições idênticas de compactação, tanto para o solo natural quanto para o solo tratado. Foram usados os mesmos processos de cura, ou

seja, armazenando em laboratório e enterrando os corpos de prova no campo. Já o processo de compactação e de caracterização do comportamento mecânico dos corpos de prova nessa umidade foi similar ao seguido com os correspondentes corpos de prova compactados no ramo seco.

Cabe esclarecer que a concentração do meio B4 adicionado ao solo para essa condição de compactação foi duplicada (30 g de acetato de cálcio, 8 g de extrato de levedura e 10 g de glicose para cada 1 litro de água destilada). Esse procedimento foi adotado devido ao fato de que os resultados obtidos para os corpos de prova compactados com a umidade ótima -3% não refletiram o comportamento verificado na caracterização microbiológica do perfil, nem foram coerentes com as melhorias obtidas por Gómez (2009) e Valencia (2010). A primeira autora usou o meio B4 como sendo a água necessária para que um solo seco ao ar atingisse a umidade ótima de compactação. Já a segunda, adicionou o meio B4 numa proporção de 7% da umidade ótima de compactação. Sendo assim, em ambos os casos se havia trabalhado com teores mais acentuados do meio B4. Com isso, optou-se por fazer tal mudança com a finalidade de verificar se a quantidade de nutriente utilizada não teria sido insuficiente para gerar as melhorias esperadas.

5.8.1 Curva característica e de retenção de água

As curvas de retenção de água obtidas para este caso apresentam poucas diferenças entre o solo tratado e o não tratado (Figura 5.43). A forma de cada uma das curvas dá nuances do comportamento bimodal típico dos solos tropicais profundamente intemperizados, embora o processo de compactação tenda a destruir tal característica ao reduzir de modo marcante a macroporosidade. Farias *et. al.* (2011) e Otálvaro (2013) confirmam tal fato e mostraram que a compactação desses solos geralmente não afeta a sua microporosidade.

Observa-se que em todas as curvas os pontos de entrada de ar nos microporos estão bem marcados, sendo que para 1,0 m a sucção é aproximadamente 9000 kPa e nas outras duas camadas decresce até atingir uns 3000 kPa. Já as umidades são respectivamente para 1,0 m, 3,0 m e 6,0 m de 14%, 17% e 18%.

É importante destacar que nas três camadas há menor variação nas curvas do solo tratado com relação ao solo natural na área correspondente aos microporos. Por outro lado, na área dos poros intermediários observa-se que existem pequenas mudanças das curvas, isso pode ser originado pelas próprias alterações na macro e na microporosidade. No entanto para poder

estabelecer uma causa certa é necessário analisar outros aspectos como a saturação, o índice de vazios, os quais serão avaliados nos tópicos seguintes.

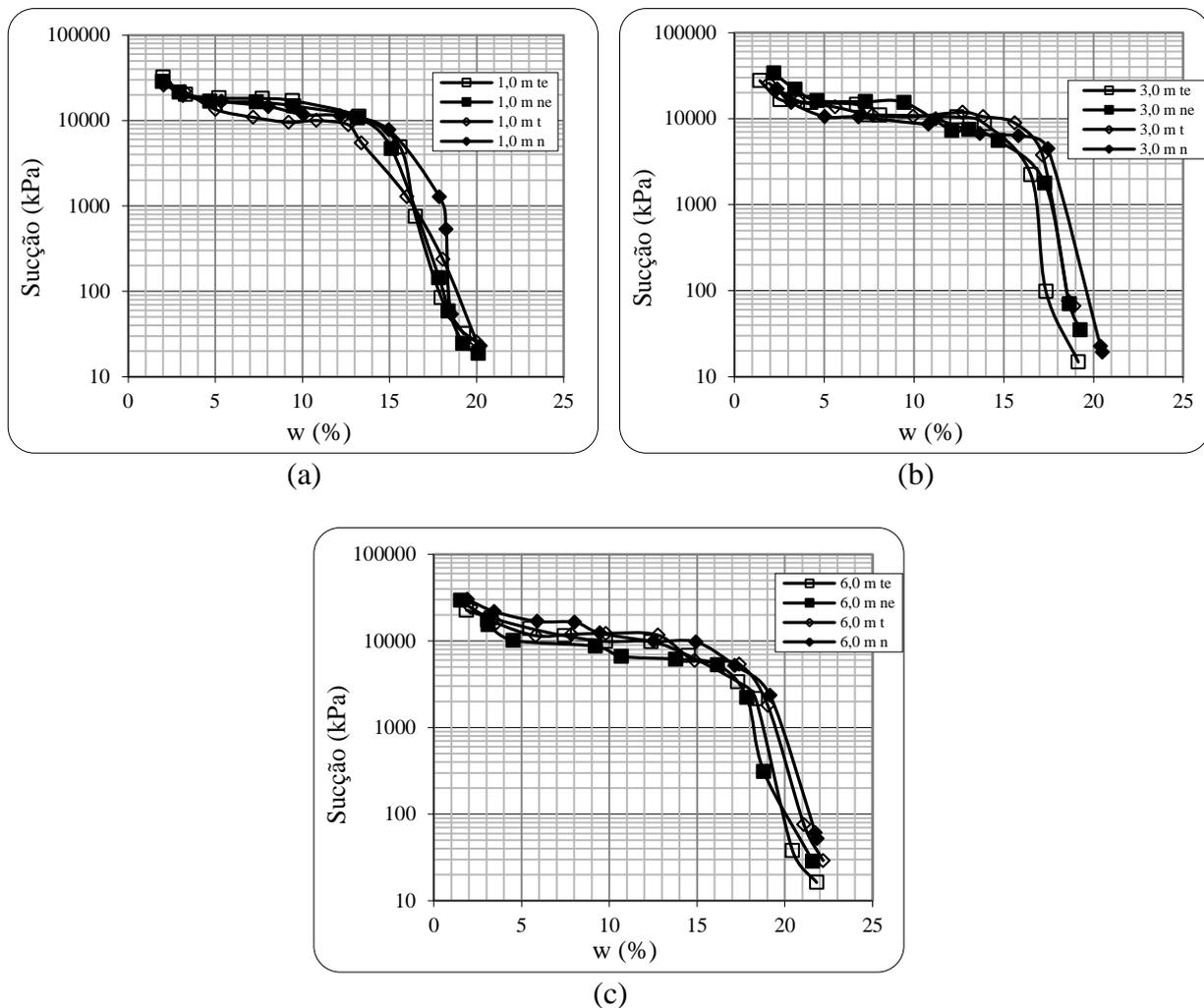


Figura 5.43 Curvas características e de retenção de água nos CPs compactados na umidade ótima (a) 1,0 m (b) 3,0 m (c) 6,0 m

Analisando as umidades de entrada de ar nos microporos na Figura 5.43, pode-se observar que nas profundidades de 1,0 m e 6,0 m nas amostras enterradas houve um leve aumento quando tratadas dando assim indícios de uma possível agregação, no entanto, nas amostras curadas em laboratório não apresentou-se nenhuma variação entre solo natural e solo tratado. Já na camada de 3,0 m o comportamento indicou que a adição do meio B4, não gerou mudança na umidades de entrada de ar nos microporos, a tendência foi similar para as amostras correspondentes aos dois tipos de cura.

Já quando as curvas características estão em função da saturação (Figura 5.44) observa-se que o comportamento é bastante similar ao apresentado pela Figura 5.43. As curvas correspondentes à camada de 1,0 m (Figura 5.44 (a)) exibem uma tendência a ter valores

muito parecidos entre o solo natural e o tratado, com leves variações na zona dos poros intermediários, ou seja, aquela região que se encontra entre a entrada de ar nos macroporos e a dos microporos. Nas camadas de 3,0 m e 6,0 m (Figura 5.44 (b) e (c)) se expõe uma mudança maior que aquela apresentada pela de 1,0 m. Observa-se que essa é mais pronunciada na zona dos poros intermediários e nos macroporos, mas na zona dos microporos também é possível perceber que as curvas do solo tratado exibem certa variação entre elas. Contudo, as curvas apresentadas na Figura 5.44 seguem uma tendência que ainda não permite definir o efeito produzido pela adição do meio B4 sobre as propriedades de retenção de água.

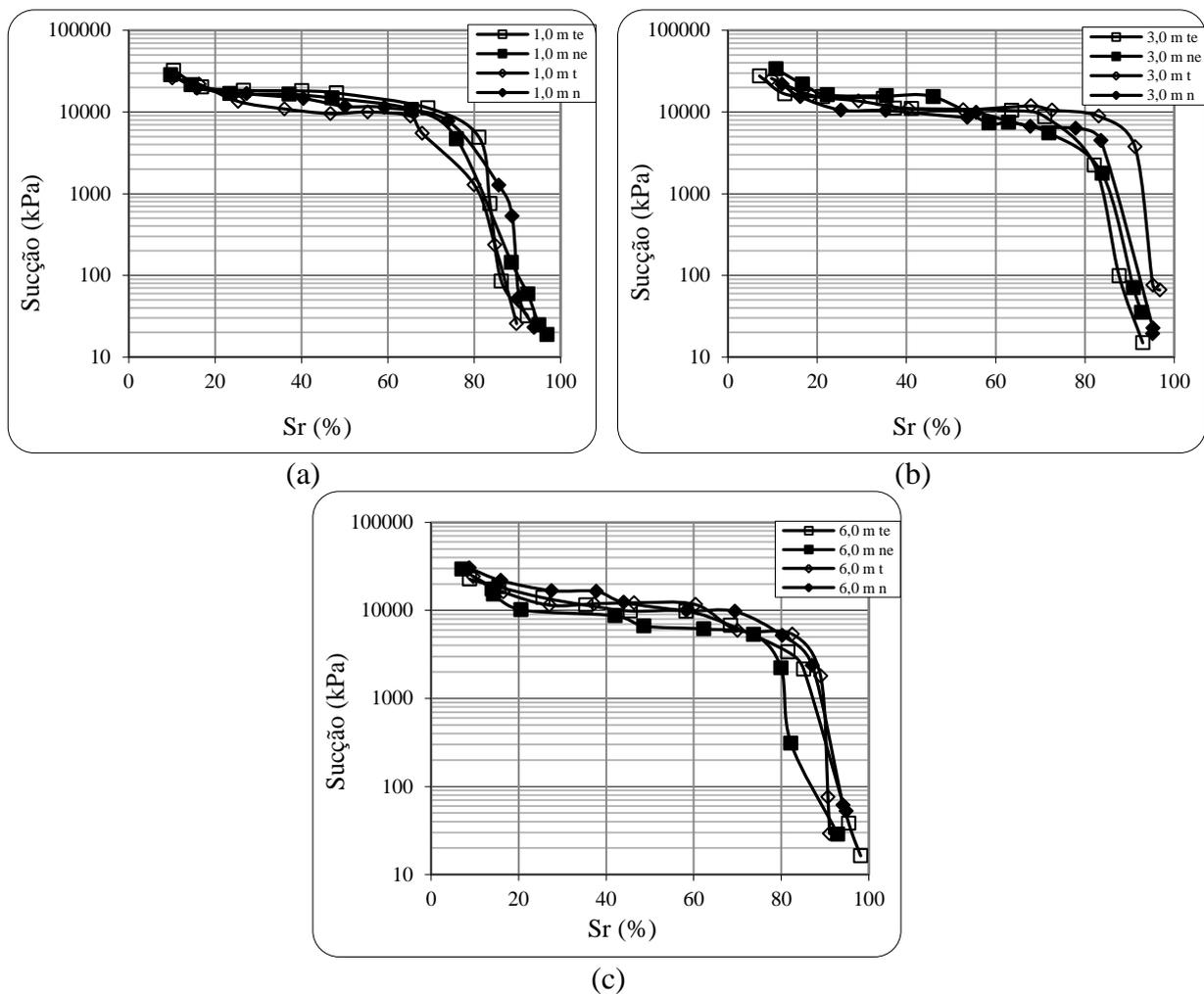


Figura 5.44 Sucção em função da saturação (a) 1,0 m (b) 3,0 m (c) 6,0 m

As curvas de retenção foram transformadas em relação ao índice de vazios (Figura 5.45) e os resultados revelam que na camada de 1,0 m (Figura 5.45 (a)) existe uma alteração das curvas tratadas com respeito às não tratadas, especialmente na zona de transição entre os macroporos e os microporos. É possível que tal mudança seja causada pelo meio B4. Observando as curvas da camada de 3,0 m (Figura 5.45 (b)) há uma notória influência do

índice de vazios “e” a qual está mais marcada na zona dos microporos, comportamento que pode dar sinais de uma alteração produzida pelo tratamento. Finalmente para a profundidade de 6,0 m se percebe uma influencia do índice de vazios na região dos poros intermediários.

Embora sejam observadas algumas mudanças no comportamento do solo, percebe-se que ainda não é possível determinar claramente a influência da adição do meio B4 sobre as propriedades de retenção de água do solo correspondente a cada camada. Destaca-se que não foram observadas variações significativas nas curvas quando comparadas segundo o processo de cura utilizado.

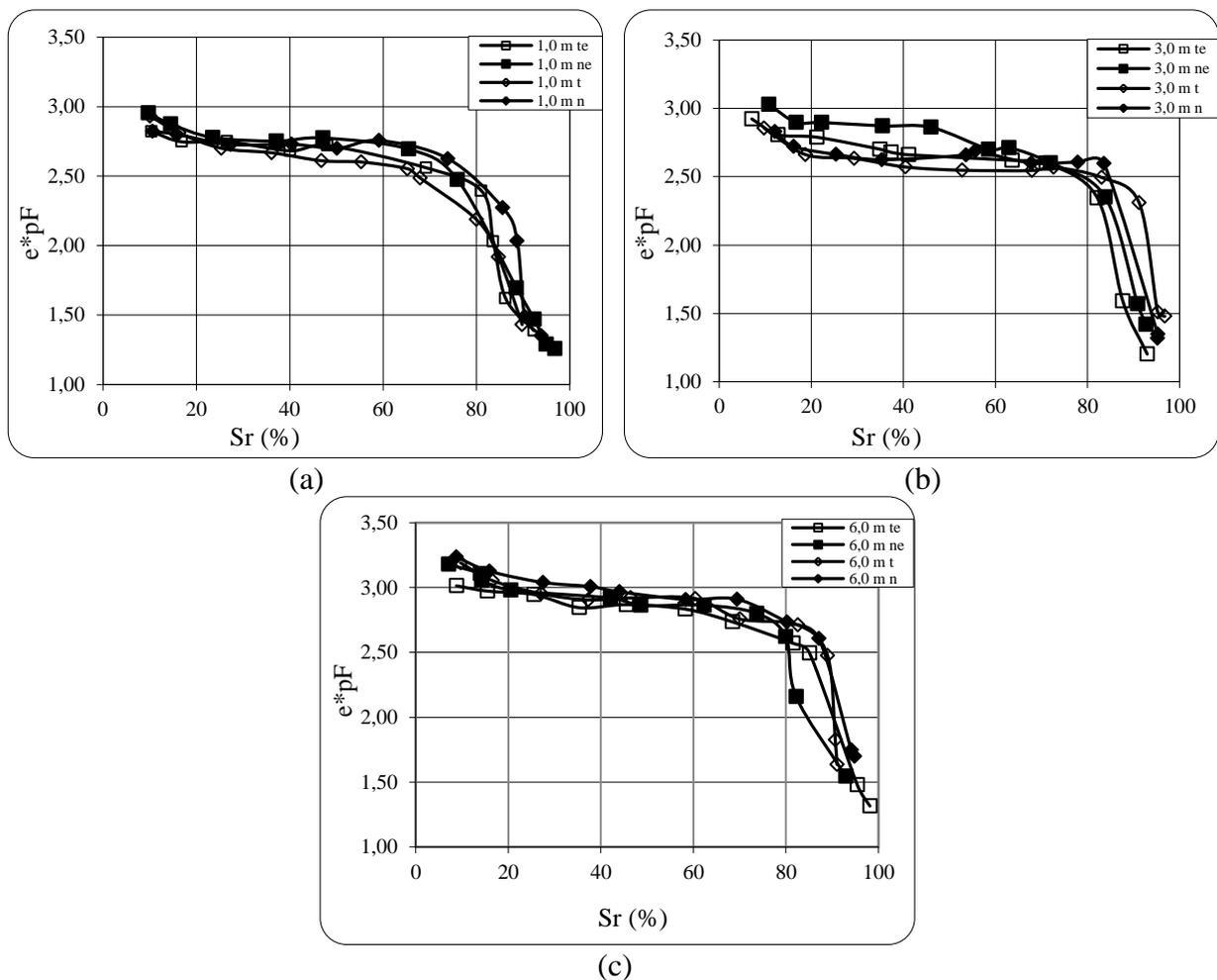


Figura 5.45 Curvas características transformadas com relação ao índice de vazios “e”
(a) 1,0 m (b) 3,0 m (c) 6,0 m

Para ratificar o efeito da adição do meio B4 sobre a curva característica, optou-se por plotar a sucção em pF transformada em relação aos índices de vazios interagregado para cada uma das camadas de trabalho (Figura 5.46). Novamente se destaca que os cálculos dos índices de vazios intragregados não devem dar diferentes, assim como nos corpos de prova

compactados no ramo seco houve algumas mudanças entre os valores obtidos, por tanto, optou-se por trabalhar com a média dos mesmos.

Observa-se que ao utilizar o índice de vazios interagregado as curvas características não apresentam variações que impliquem em uma mudança importante no comportamento na região dos microporos, já na área correspondente aos poros intermediários percebe-se que as curvas apresentam algumas variações, contudo, não há uma tendência clara que permita definir se houve ou não uma mudança no comportamento das três camadas que impliquem uma melhoria das propriedades do solo.

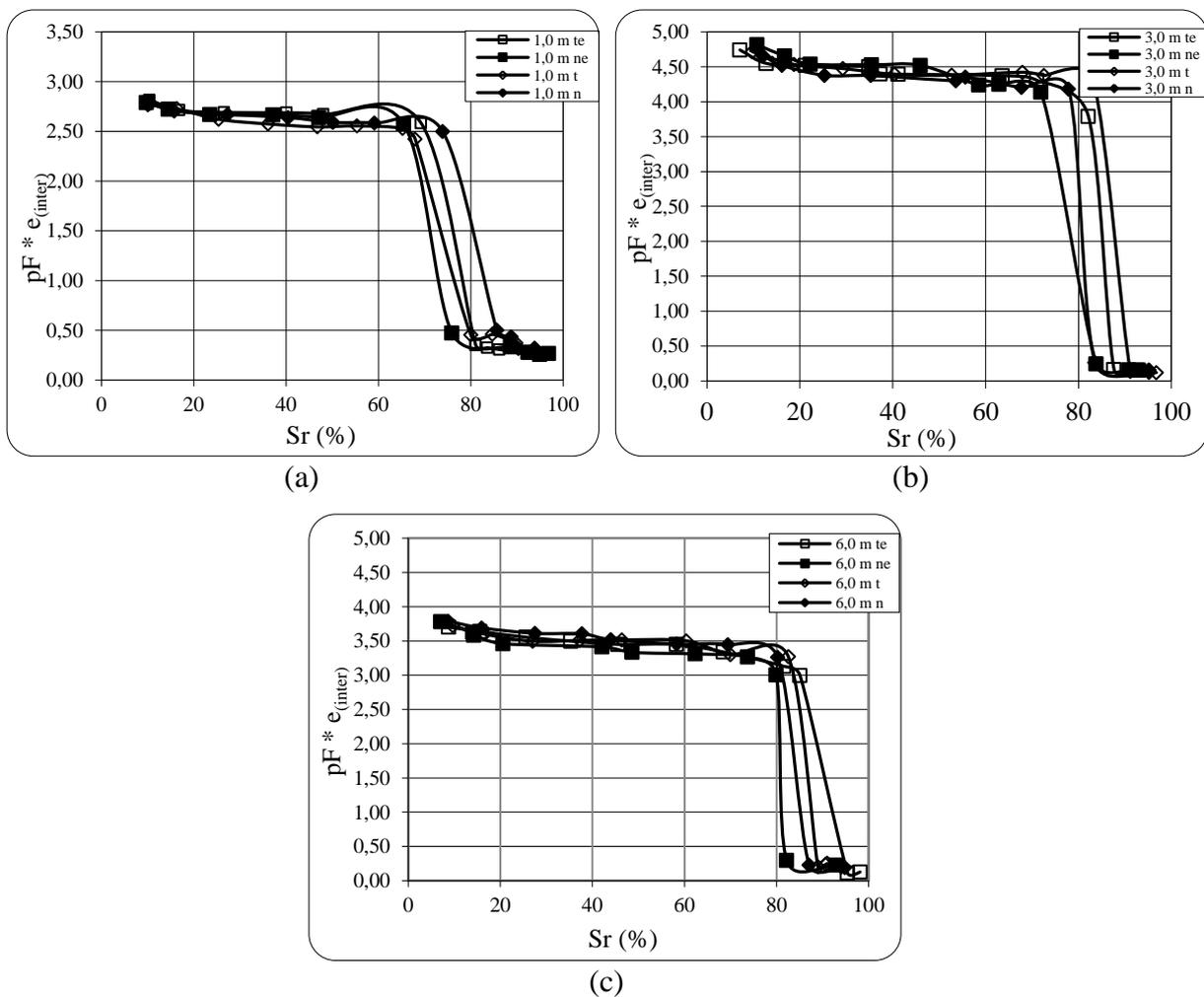


Figura 5.46 Curvas características transformadas em relação ao índice de vazios interagregado (a) 1,0 m (b) 3,0 m (c) 6,0 m.

5.8.2 Compressão diametral (σ_t)

Para estes ensaios também foram empregados os corpos de prova oriundos da determinação das curvas características, o que significa que após a determinação da sucção em cada um deles executaram-se os ensaios de compressão diametral.

Os resultados obtidos são expostos na Figura 5.47. Sua análise, fazendo-se um paralelo com as curvas características, permite verificar que para umidades inferiores a de entrada de ar nos microporos ocorre aumento da resistência à tração com o acréscimo do teor de umidade. Isso ocorre em princípio porque na medida em que o solo se desidrata tende a ocorrer perda de continuidade no fluido sob sucção tornando o seu efeito apenas intra-agregado. Sendo assim, passa, à medida que a umidade diminui a partir da entrada de ar nos microporos, a ocorrer perda de resistência apesar da sucção estar aumentado.

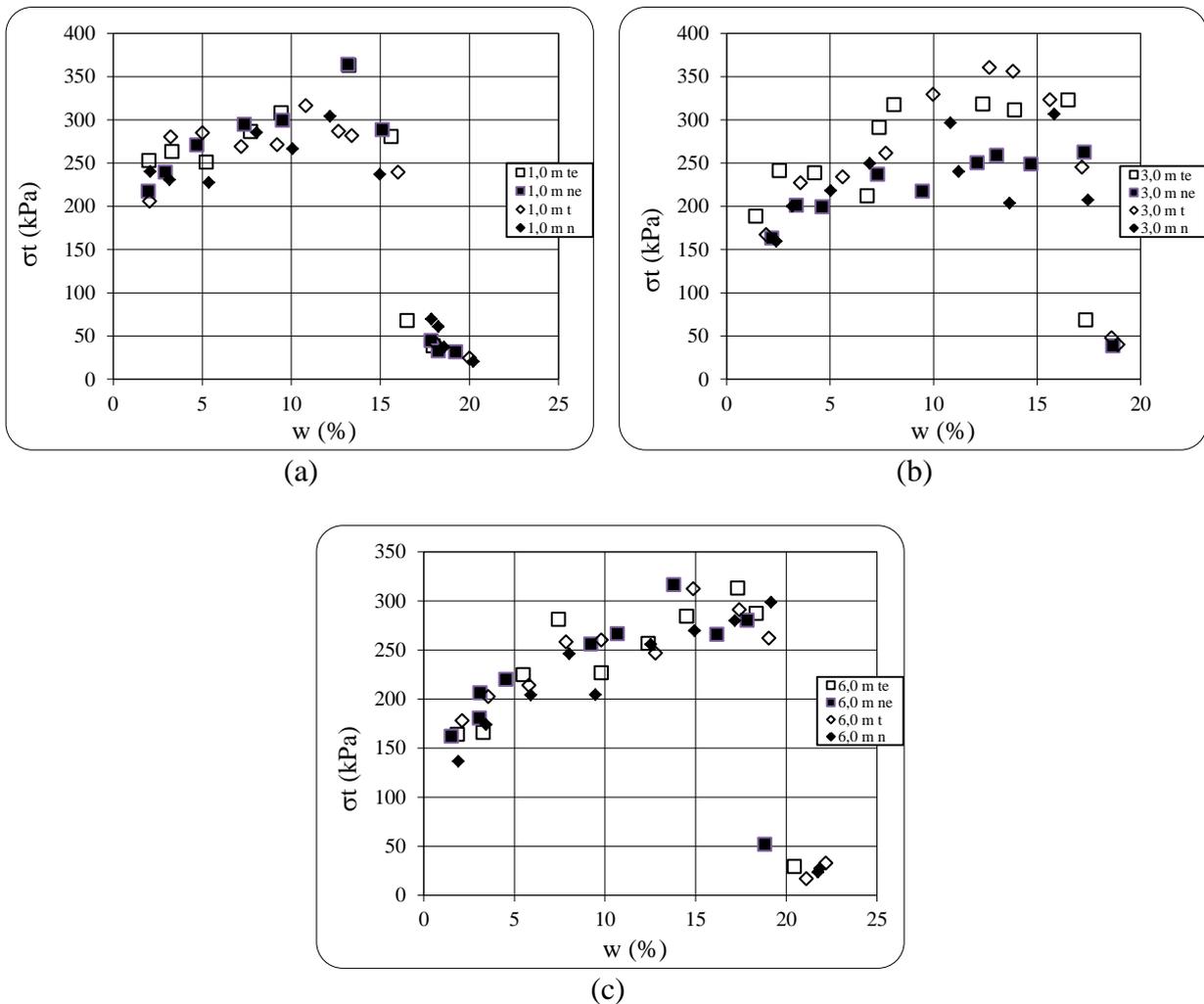


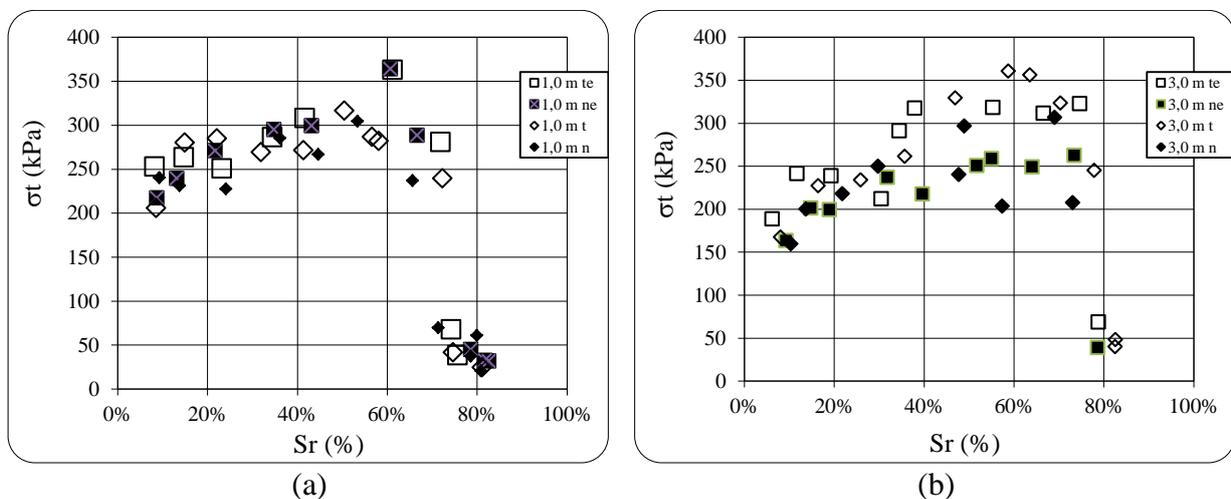
Figura 5.47 Relação $w\%$ - σ_t (a) 1,0 m (b) 3,0 m (c) 6,0 m

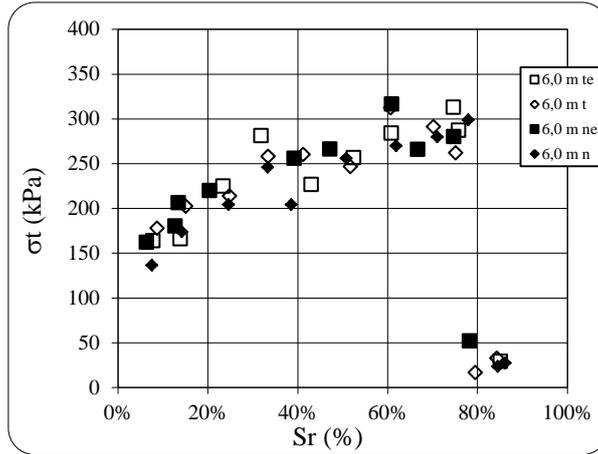
No entanto, ao atingir umidades superiores as de entrada de ar verifica-se acentuada queda nos valores de resistência a tração agora devido ao fato de que a sucção que está a diminuir com o aumento da umidade interfere diretamente no comportamento mecânico do solo. Cabe destacar que segundo as curvas características mostradas na Figura 5.43 obteve-se para umidades de entrada de ar nos microporos: 15% para 1,0 m, 17% para 3,0 m e 18% em 6,0 m.

Quanto à influência do tratamento pode-se afirmar com base na figura em menção que apenas para a profundidade de 3,0 m registra-se para umidades inferiores a de entrada de ar nos microporos uma melhoria da resistência à tração com o tratamento usando o meio B4. Tal melhoria pode eventualmente estar associada à sucção osmótica gerada pelo tratamento entre o interior e o exterior dos agregados ou se dever a certo fenômeno de precipitação de biomineralização promovendo a melhoria da interação entre os agregados.

Quando realizado o gráfico da resistência à tração em função da variação da saturação (Figura 5.48) observa-se que essa segue a mesma tendência apresentada pela Figura 5.47, há uma queda de resistência para saturações acima de 70% na camada de 1,0 m, de 75% nas outras duas camadas. Ressalta-se ainda que a única camada que apresentou uma melhoria na resistência foi a camada de 3,0 m.

Assim como feito com os resultados da curva característica, os valores de σ_t foram plotados em função do índice de vazios “e” e do índice de vazios interagregado (Figura 5.49) considerando-se, no entanto, a normalização em lugar da transformação. Verifica-se que nas camadas de 1,0 m e 6,0 m (Figura 5.49 (a) e (c)) não é possível determinar claramente o efeito quando se observa a relação com o índice de vazios.



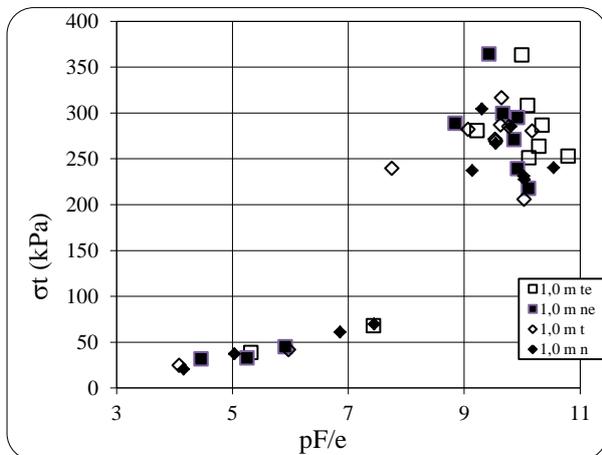


(c)

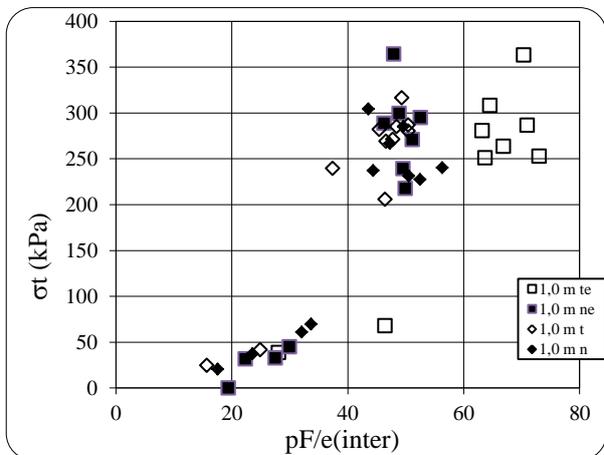
Figura 5.48 Relação Sr% - σ_t (a) 1,0 m (b) 3,0 m (c) 6,0 m

Já quando é feita a relação com o índice de vazios interagregado, os resultados revelam que no caso do solo enterrado o tratamento gerou uma mudança que pode indicar uma melhoria na resistência. Na camada de 3,0 m (Figura 5.49 (b)) constata-se uma variação em ambos os casos, a qual é mais visível com o índice de vazios interagregado, permitindo assim inferir que houve também um aumento da resistência.

Cabe destacar que o observado na figura em questão corrobora os resultados obtidos nas curvas características (Figura 5.46), permitindo assim inferir que se apresenta uma possível precipitação de CaCO_3 . Pode-se dizer também que a adição do meio B4, quando os resultados são analisados unicamente com base no índice de vazios global, não gerou melhoria para a camada de 1,0 m. Já para 3,0 m houve uma melhoria e para 6,0 m apresentou-se uma tendência ao aumento da resistência.



(a)



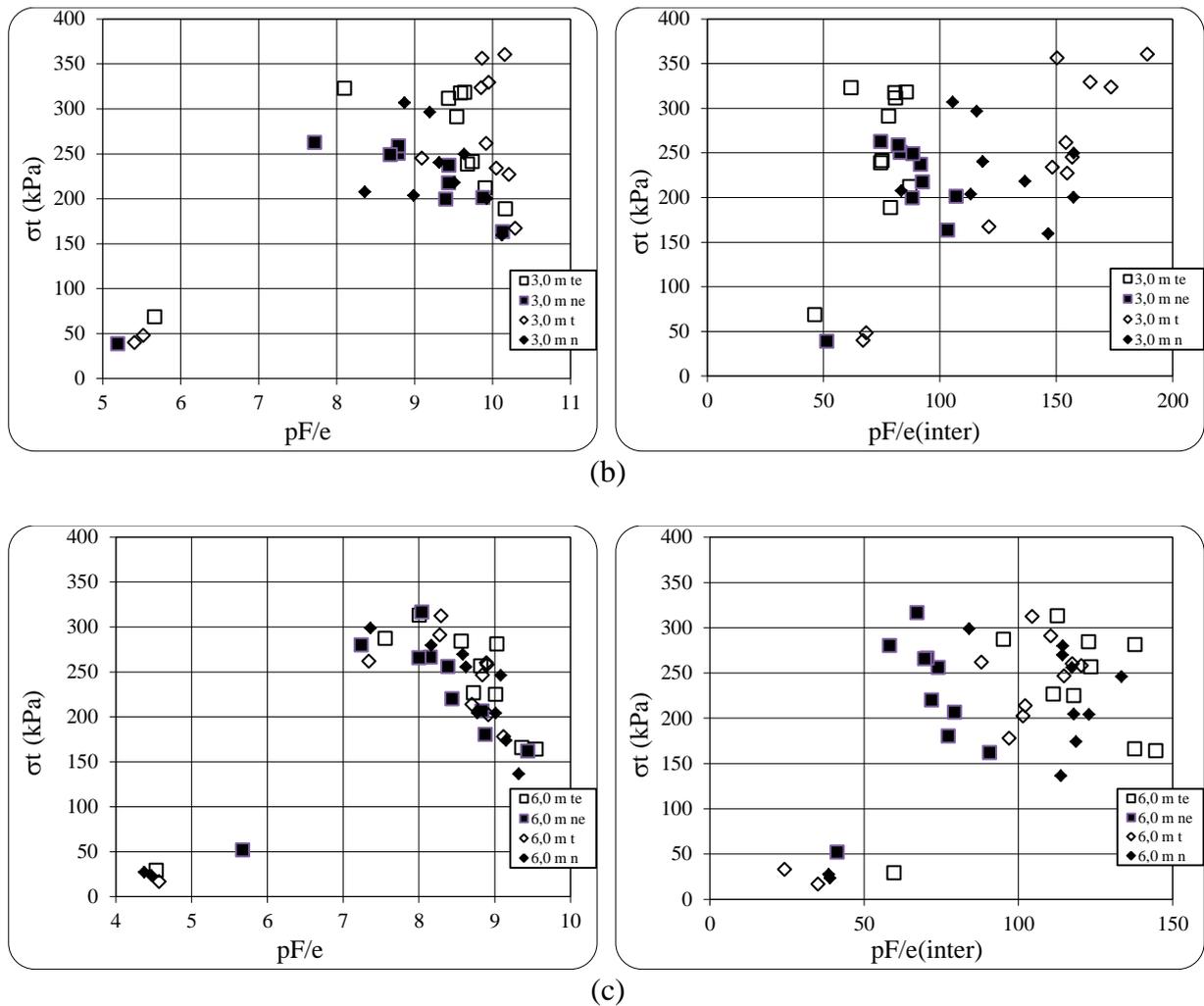


Figura 5.49 Relações “e - σ_t ” e “ $e_{(interagado)}$ ” (a) 1,0 m (b) 3,0 m (c) 6,0 m

Foi ainda avaliada ainda a evolução da resistência à compressão diametral com o tempo. Nos corpos enterrados observou-se que nas camadas de 1,0 m e 3,0 m (Figura 5.50 (a) e (b)) a resistência dos corpos tratados não geraram uma melhoria, já nos curados em laboratório observou-se que houve um leve aumento. Na camada de 6,0 m (Figura 5.50 (c)) percebe-se que a melhoria apresentou-se para todos os corpos de prova com adição do meio B4. Tais tendências não são coerentes com as tendências obtidas com os corpos provenientes das curvas características.

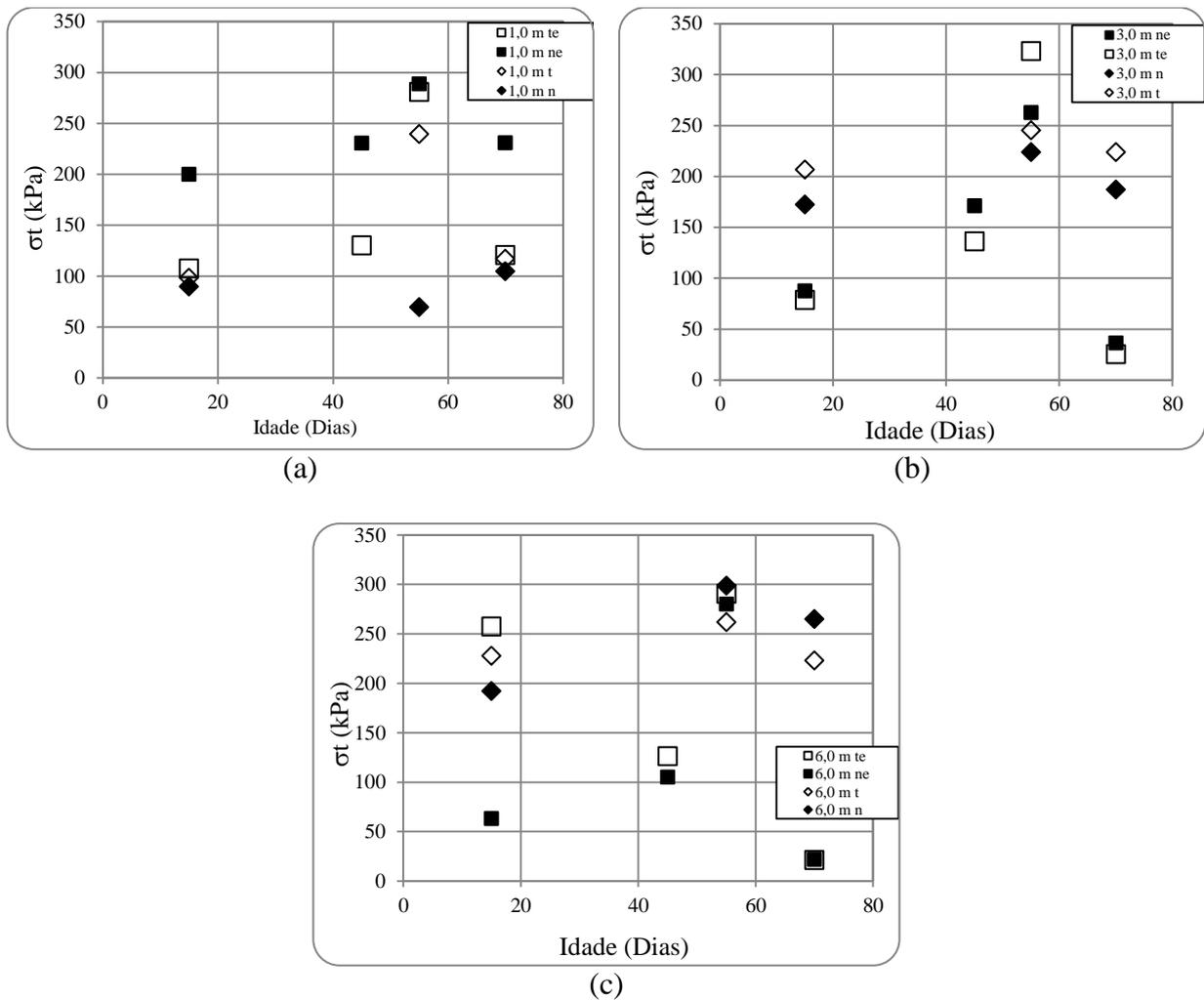


Figura 5.50 Evolução da resistência a compressão diametral

É importante salientar que o gráfico em questão não é suficiente para poder definir a idade ideal e verificar se houve um acréscimo da resistência causado pela adição do meio B4, pois devem-se combinar os resultados dos outros tipos de ensaio que vão ser apresentados nos itens a seguir.

No entanto, para auxiliar no entendimento dos resultados obtidos nos ensaios de compressão diametral, foram realizados gráficos que correlacionam a sucção normalizada em pF em relação ao índice de vazios (pF/e), a idade de cura e a resistência à tração indireta (Figura 5.51). Observa-se que novamente a variável com maior influencia no comportamento continua sendo a sucção, tais resultados são melhor visualizados nas superfícies de ajuste apresentadas na mesma figura.

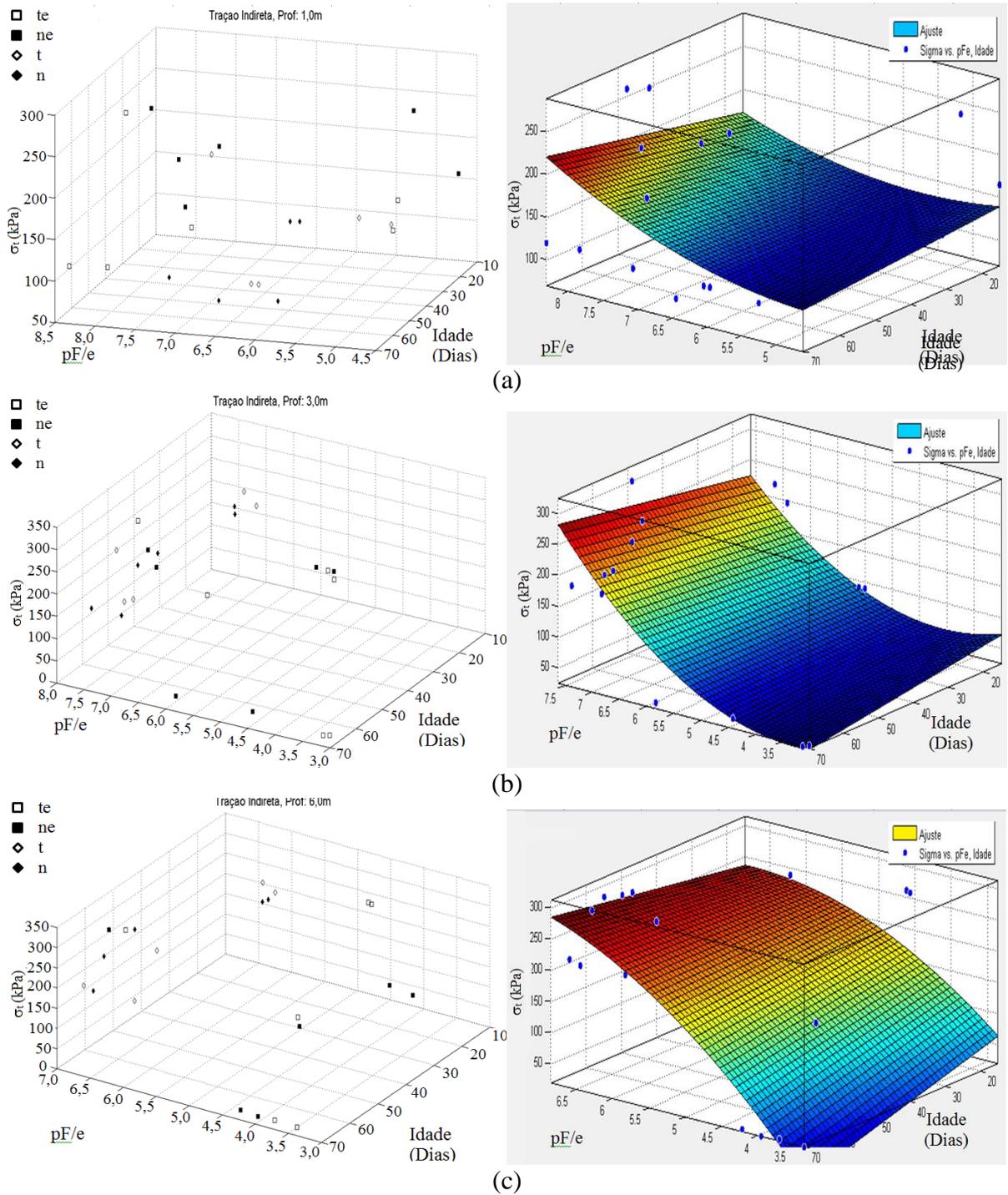


Figura 5.51 Correlação pF/e –Idade - σ_t (a) 1,0 m (b) 3,0 m (c) 6,0 m

Também foi avaliada a resistência à compressão diametral considerando-se a unidade destacando cada idade de cura (Figura 5.52). Observa-se que a adição do meio B4 na camada de 1,0 m (Figura 5.52(a)) gerou maiores resistências nos corpos de prova enterrados para algumas das idades analisadas, no caso das amostras não enterrados a tendência foi de ter uma leve melhoria em todos os tempos. Já em 3,0 m (Figura 5.52(b)) o comportamento dos corpos enterrados não exibiu melhoria após o tratamento, o contrario aconteceu para os corpos não

enterrados. Com a camada de 6,0 m não se percebe uma mudança significativa depois do tratamento, o que não reflete as tendências apresentadas pelos corpos de prova provenientes das curvas características dessa camada.

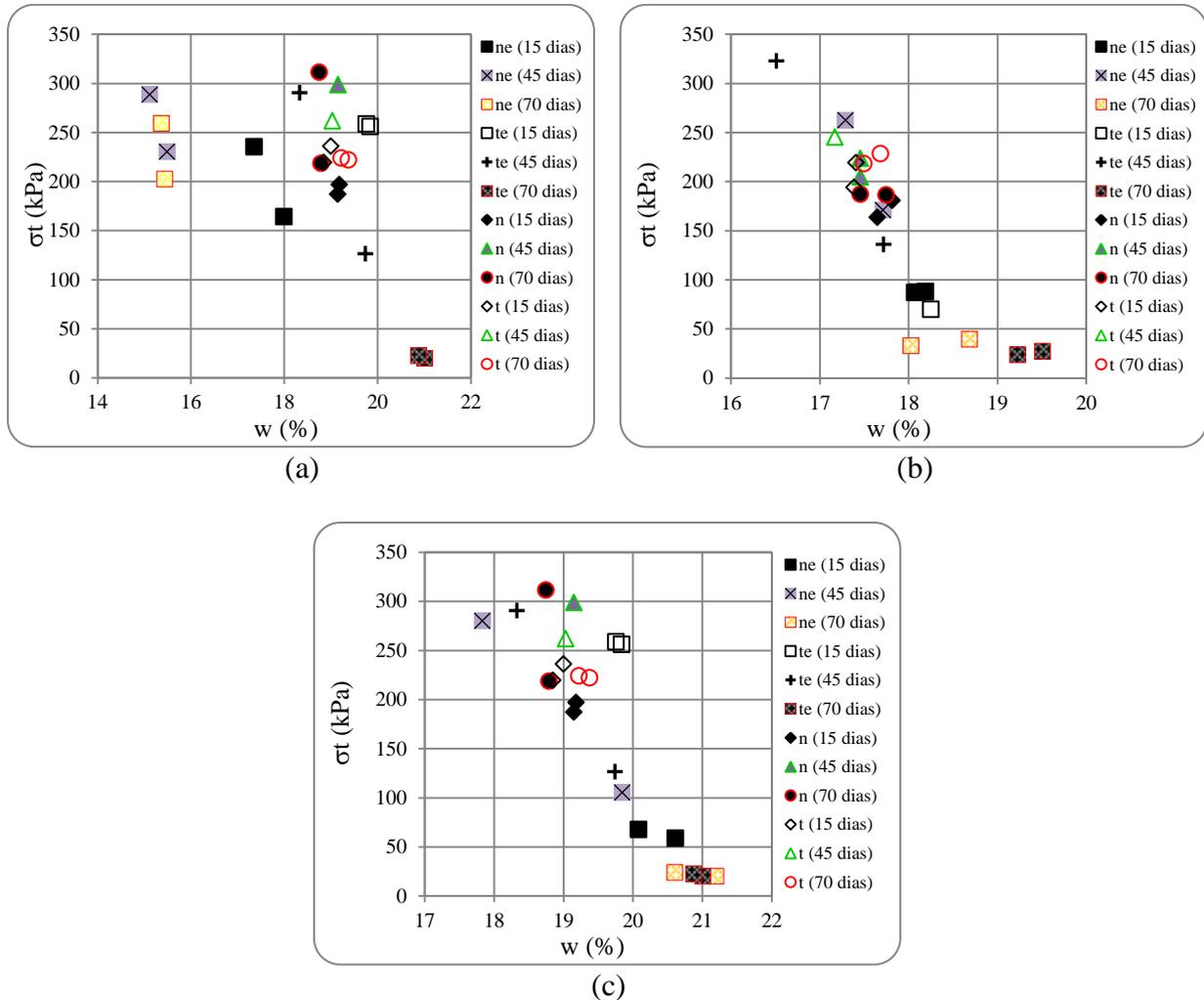


Figura 5.52 Relação $w\%$ - σ_t nas diferentes idades (a) 1,0 m (b) 3,0 m (c) 6,0 m

Aparentemente nesse caso foi mantida a continuidade da atuação da sucção mesmo quando se atingiu a zona de microporosidade, o que não teria ocorrido com os corpos de prova oriundos das determinações das curvas características. Durante a realização dos ensaios observou-se um tipo de ruptura típico, muito similar ao apresentado pelos corpos de prova compactados no ramo seco (Figura 5.30).

Relações entre a umidade, a idade de cura e a resistência à tração também foram realizadas para verificar o anteriormente descrito (Figura 5.53). Percebe-se que nesse caso a idade continua sendo uma variável cuja influência no comportamento do solo para as condições de tratamento adotadas é menor que aquela exercida pela umidade. As superfícies de ajuste apresentadas na mesma figura confirmam tal observação.

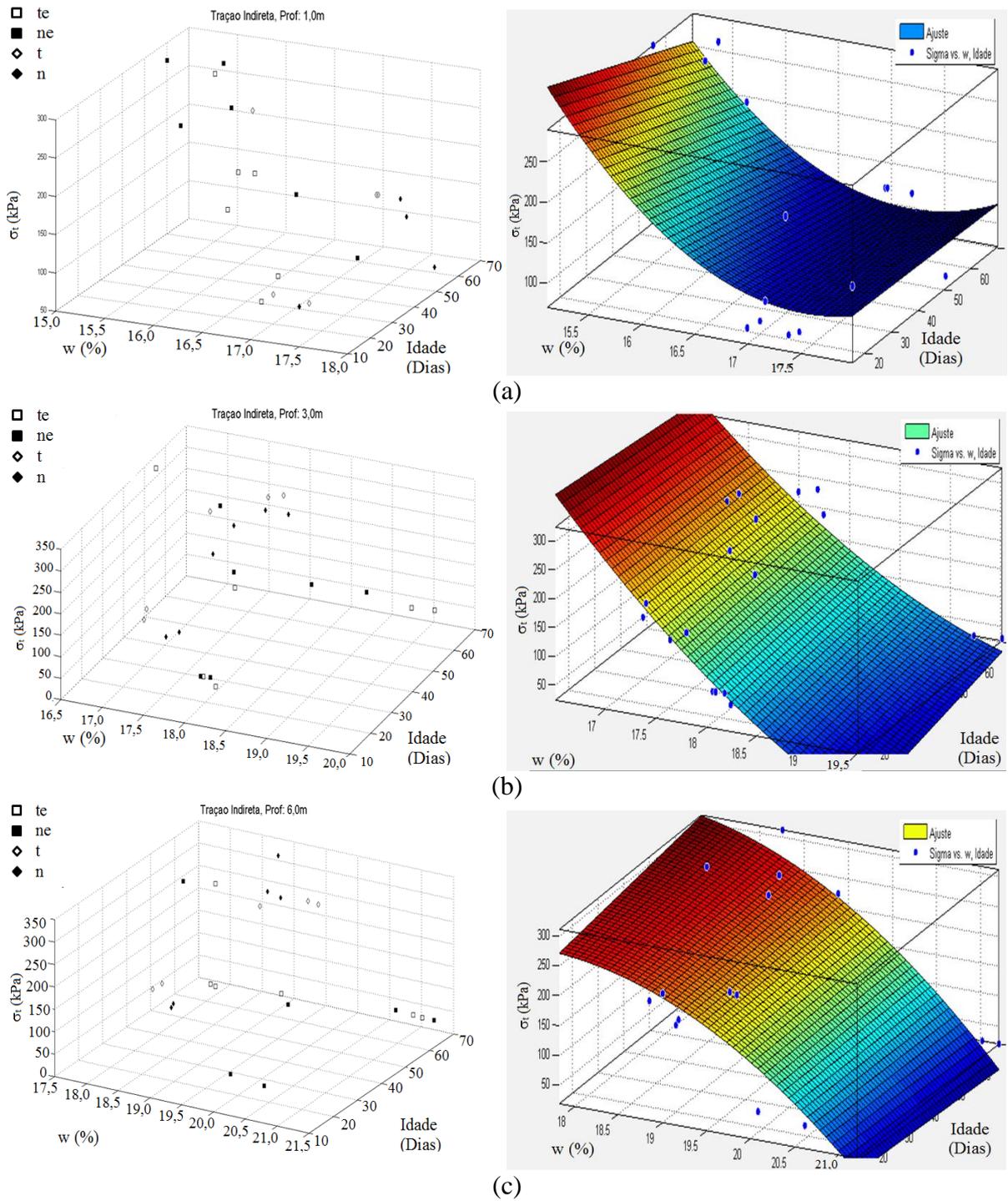


Figura 5.53 Correlação w (%) – Idade - σ_t (a) 1,0 m (b) 3,0 m (c) 6,0 m

5.8.3 Resistência à compressão uniaxial (σ_{USC})

A Figura 5.54 expõe a relação entre σ_{USC} e a umidade de cada corpo de prova discriminada por idades e tipo de cura. Percebe-se que os valores de resistência última não mudam quando comparados os resultados do solo natural com os do solo tratado. Pode-se constatar que na camada de 1,0 m (Figura 5.54 (a)) há uma tendência clara de diminuição da resistência quando a umidade decresce e não se observa uma melhoria originada pelo meio B4 quando o

solo foi curado em laboratório. No entanto houve um pequeno acréscimo nas amostras enterradas. Nas outras camadas (Figura 5.54 (a) e (b)) o comportamento da resistência com respeito à umidade é bastante similar, sendo que não se apresentou uma diferença marcada entre os resultados obtidos com e sem tratamento. Também nessa figura se observa a diminuição da resistência com o aumento da umidade mesmo quando esta é inferior a entrada de ar dos microporos.

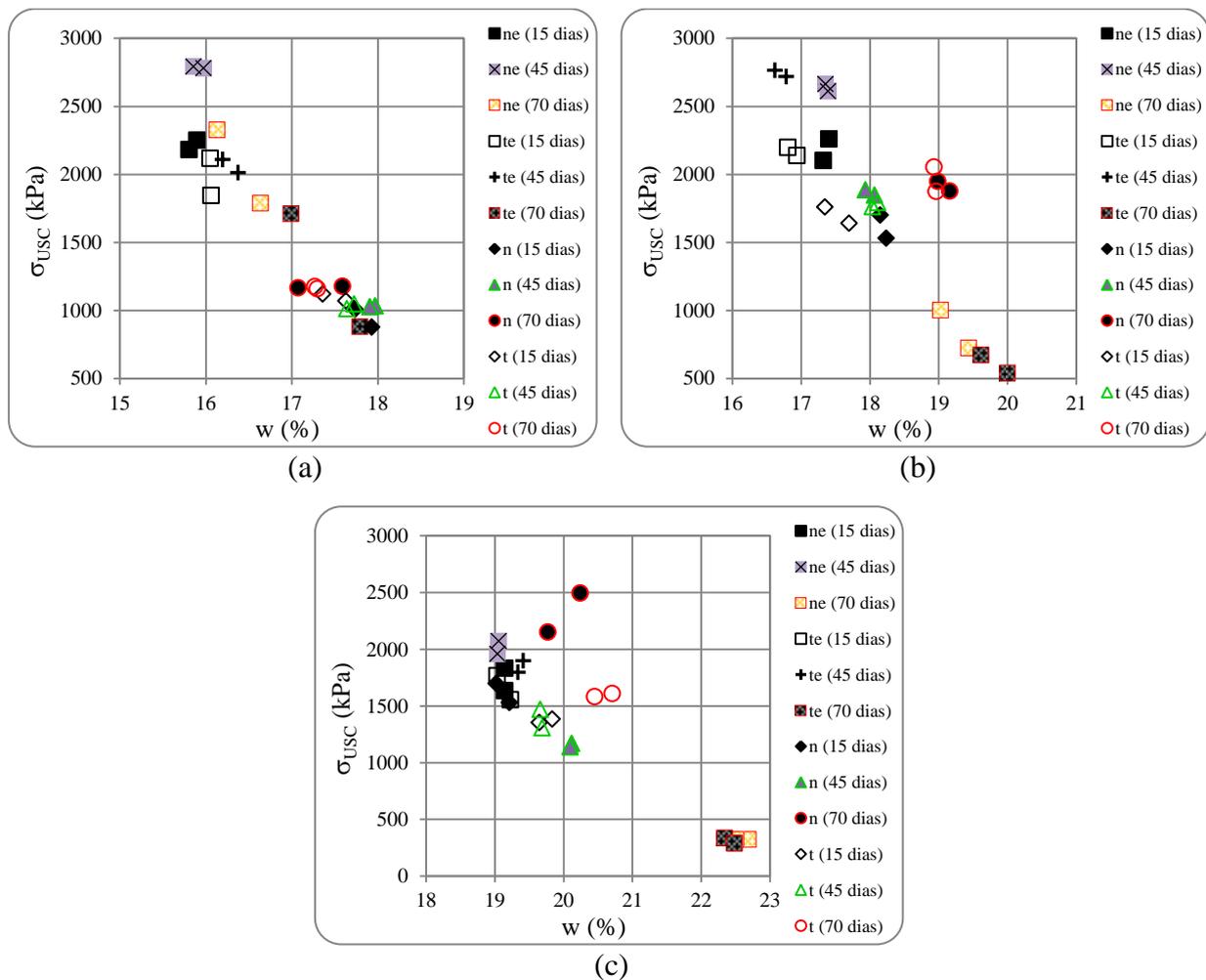


Figura 5.54 Relação $w\%$ - σ_{USC} nas diferentes idades de cura (a) 1,0 m (b) 3,0 m (c) 6,0 m

Já quando é realizada a correlação entre a umidade, a idade de cura e a resistência à compressão simples (Figura 5.55) se ratifica a maior influência da umidade quando comparada com a idade de cura. Esses resultados são coerentes com os apresentados pela resistência a tração e em geral pelos corpos de prova compactados no ramo seco.

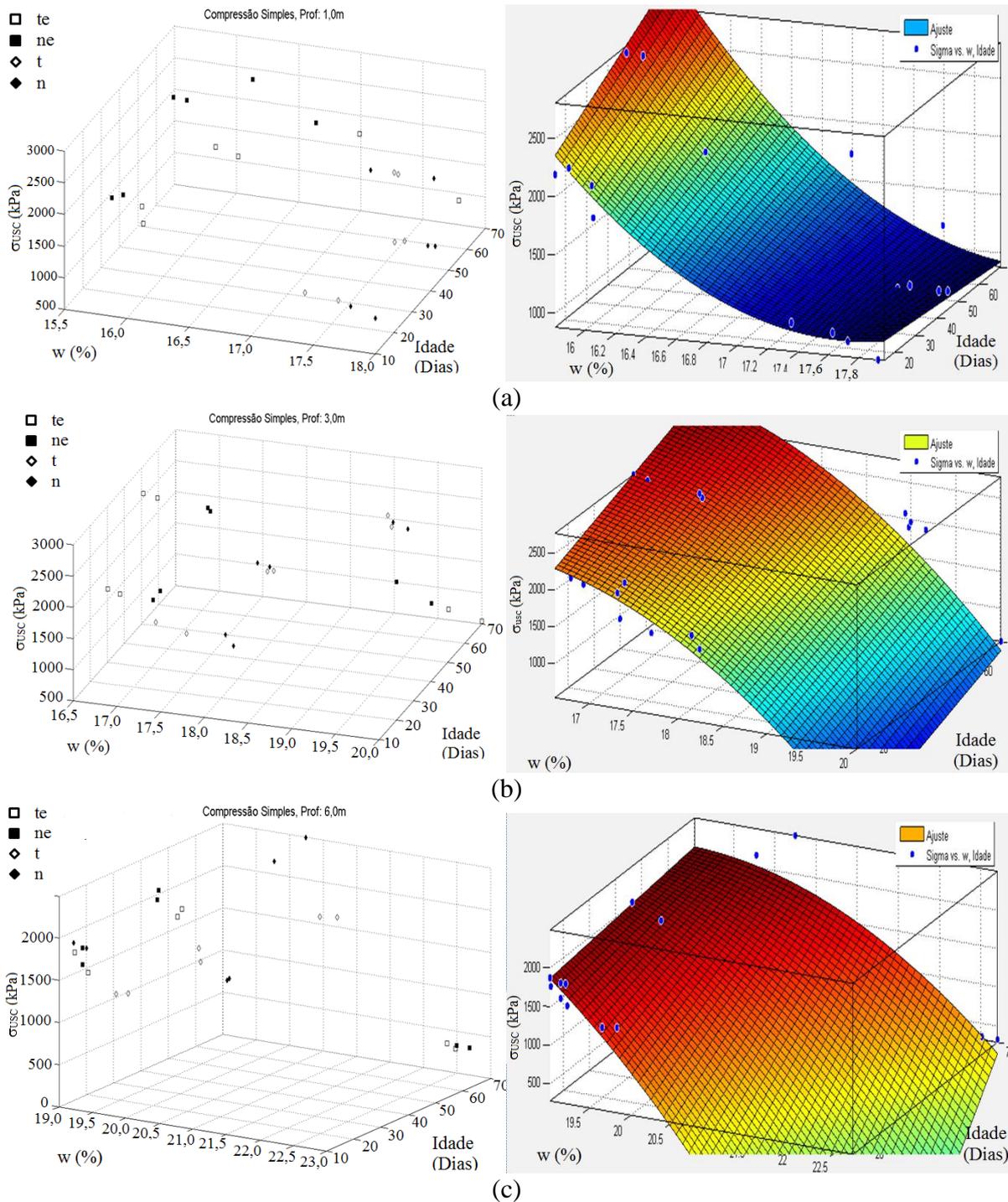


Figura 5.55 Relação w (%) –Idade - σ_t (a) 1,0 m (b) 3,0 m (c) 6,0 m

Ao relacionar as resistências últimas na compressão simples com a sucção (Figura 5.56), verifica-se na camada de 1,0 m (Figura 5.56 (a)) que as resistências são muito similares, mas a sucção no solo natural é menor nas amostras não tratadas, indicando assim uma possível melhoria. Já nas camadas restantes, 3,0 m e 6,0 m (Figura 5.56 (b) e (c)) não há uma tendência que defina com clareza se houve uma variação importante entre as resistências à compressão simples do solo natural e o solo após a adição do meio B4. Como observação

geral verifica-se que não há melhoria do solo com o tratamento quando se considera esse gráfico em função da sucção.

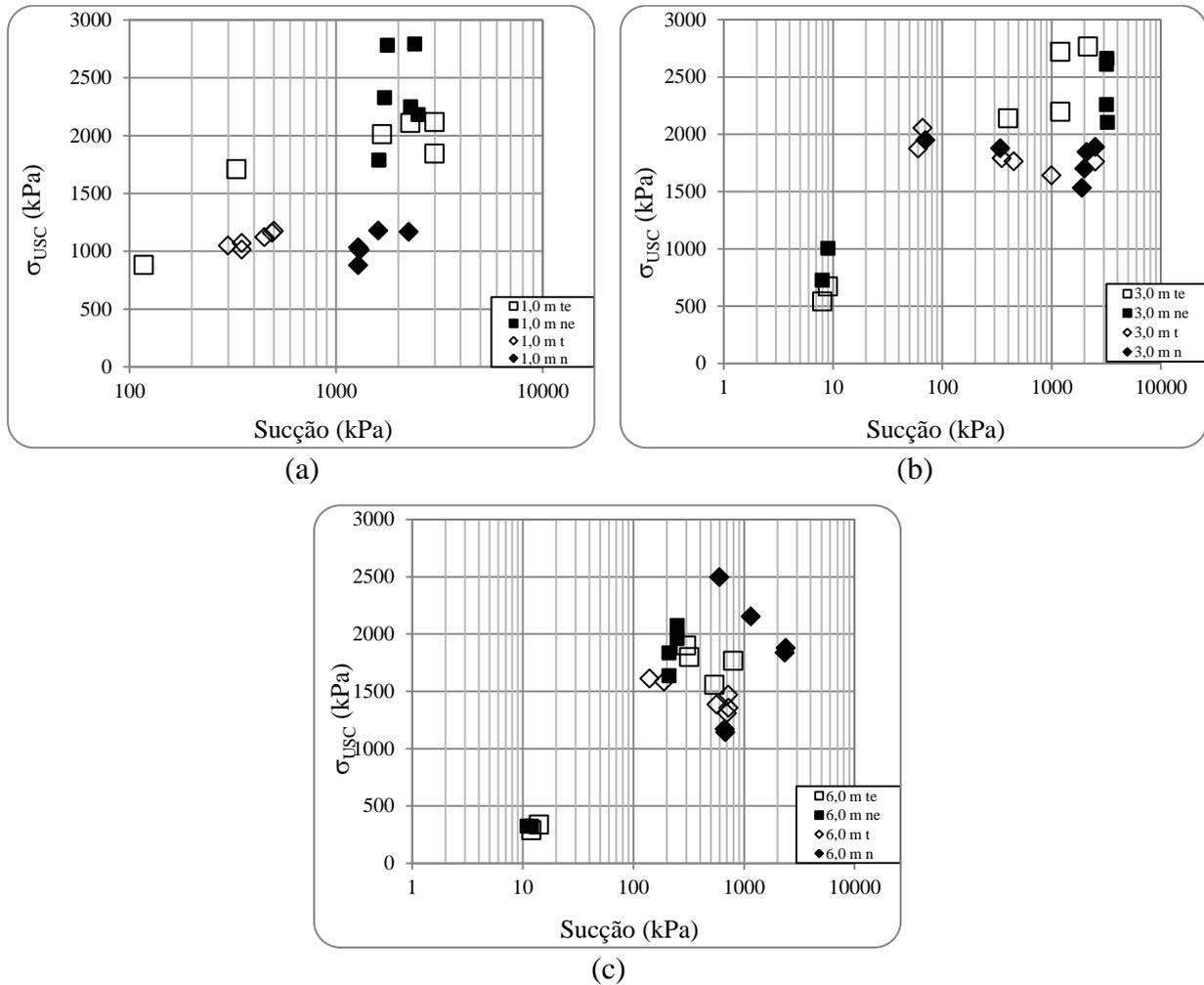


Figura 5.56 Relação sucção – σ_{USC} (a) 1,0 m (b) 3,0 m (c) 6,0 m

Relações da resistência em função da sucção em pF normalizada com relação ao índice de vazios global e ao índice de vazios interagregado são apresentados na Figura 5.57. Esse tratamento busca eliminar a influencia do índice de vazios sobre o comportamento do solo em solicitações de compressão uniaxial. Destaca-se que usando o índice de vazios “e” não há uma tendência clara de influência do tratamento com o meio B4 e do tipo de cura no comportamento das amostras. Já quando é avaliada a relação usando o índice de vazios interagregado, se registra que o tratamento gerou algumas pequenas variações. De uma forma geral pode-se dizer que o tratamento não gerou mudanças importantes na resistência.

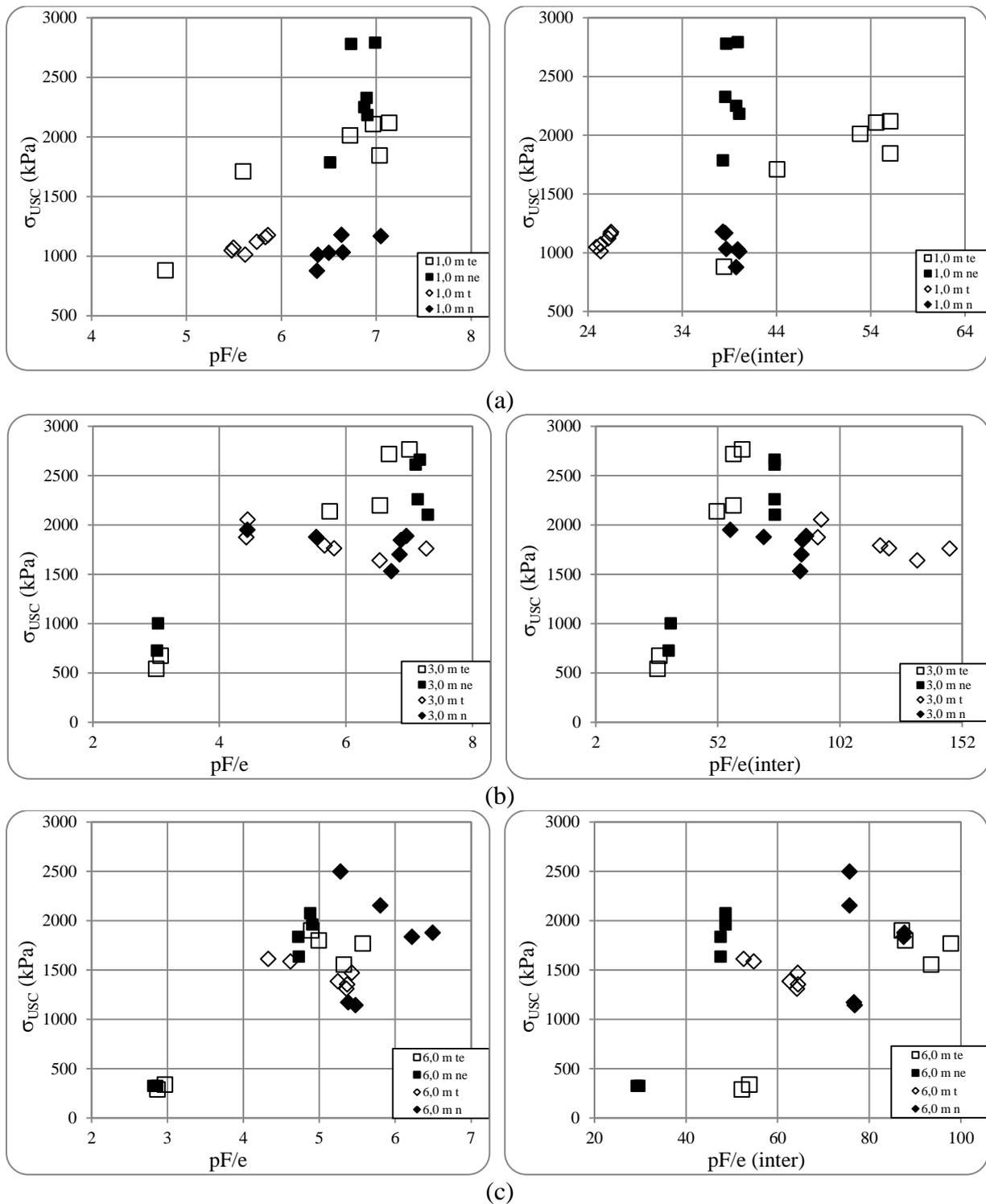


Figura 5.57 Relações “pF/e – σ_{USC} ” e “pF/e_(interagregado) – σ_{USC} ” (a) 1,0 m (b) 3,0 m (c) 6,0 m

Fez-se ainda a análise da resistência à compressão simples plotando-a em função da idade de cura (Figura 5.58) com o intuito de ter uma visão geral do efeito da adição do meio B4. Os gráficos permitiram verificar que não foram induzidos acréscimos importantes em nenhuma das amostras. Observa-se que aquelas cuja cura foi realizada em laboratório apresentaram resistências muito similares em ambos os casos, solo tratado e solo natural. Já no caso dos

corpos de prova enterrados, nota-se que após a adição do meio B4 o solo apresentou uma diminuição da resistência do solo tratado em relação ao solo natural.

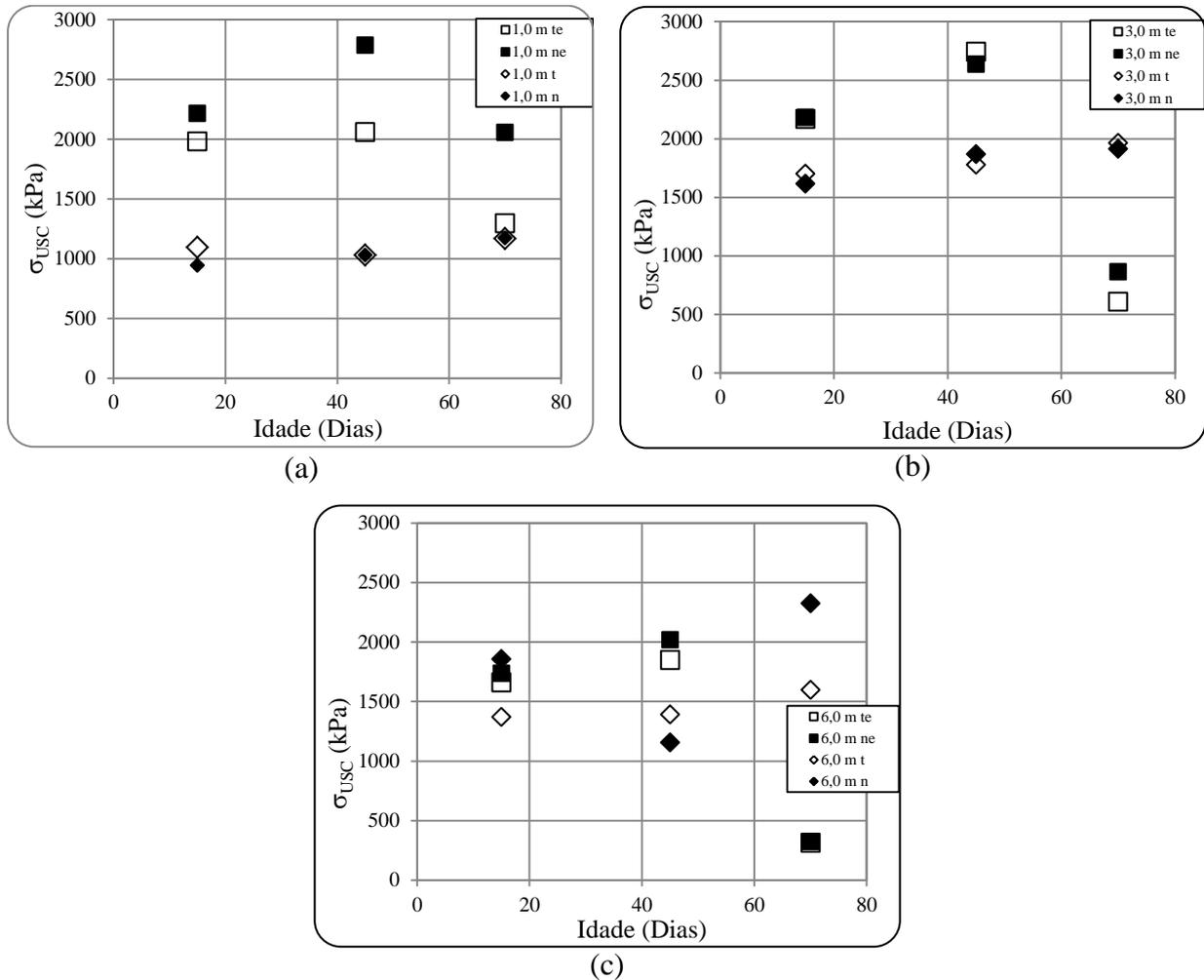


Figura 5.58 Evolução da resistência à compressão simples (a) 1,0 m (b) 3,0 m (c) 6,0 m

Por último destaca-se que os resultados expostos na Figura 5.58 não definem uma idade de cura na qual a adição do meio B4 apresente uma tendência clara de aumentos importantes na resistência à compressão uniaxial. Para uma melhor visualização do descrito anteriormente foram plotados os resultados da resistência em função de pF/e e da idade de cura (Figura 5.59), onde se observa mais claramente que a idade não tem influência marcante sobre o comportamento e a evolução da resistência à compressão simples.

Como anotação final os tipos de ruptura exibidos pelos corpos de prova foram marcados pela presença de trincas não muito bem definidas, as quais tinham tendência a serem verticais, similares às apresentadas durante a caracterização do comportamento mecânico dos corpos de prova compactados no ramo seco (Figura 5.37).

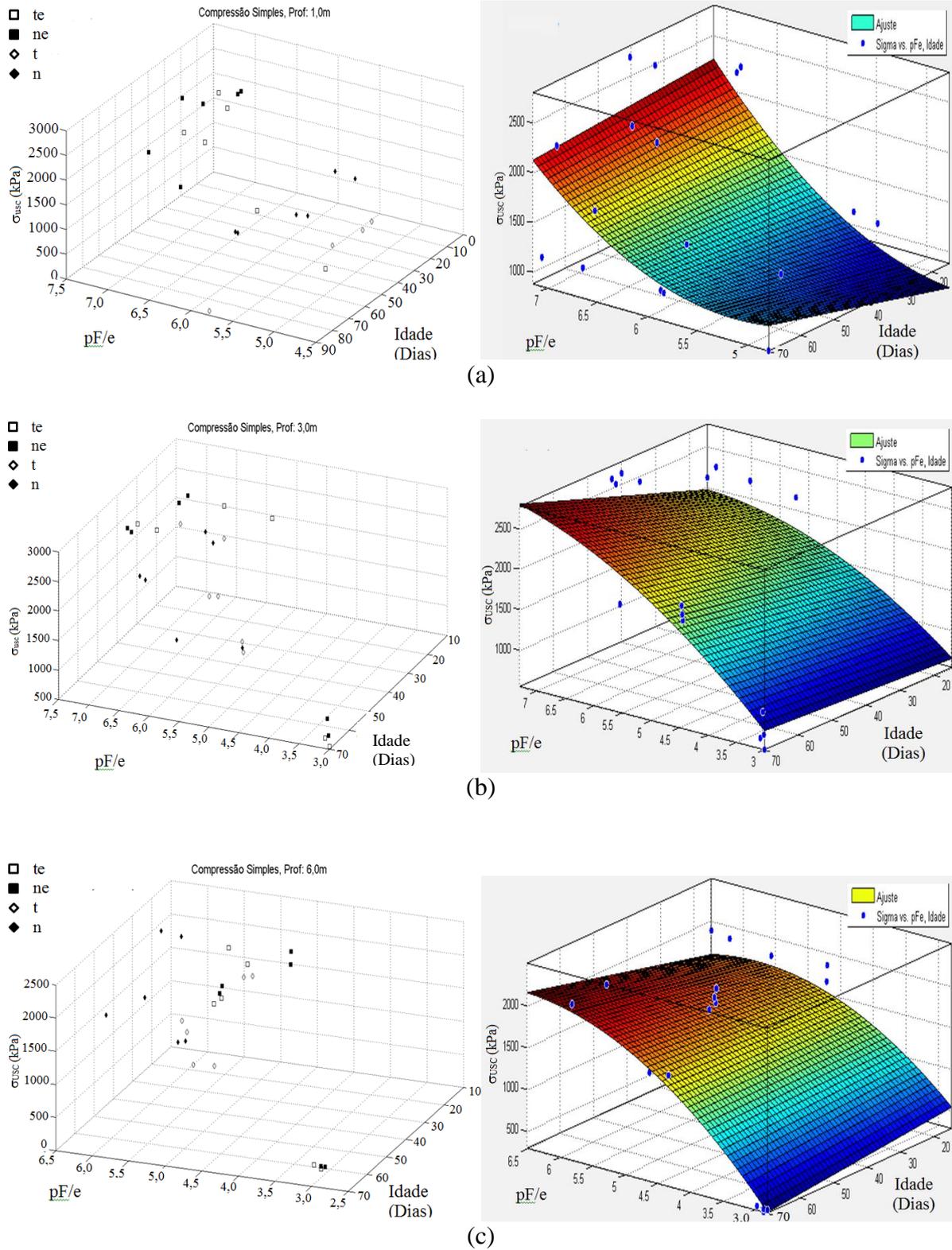


Figura 5.59 Correlação pF/e –Idade - σ_t (a) 1,0 m (b) 3,0 m (c) 6,0 m

5.8.4 Mini-CBR

A Figura 5.60 expõe os resultados obtidos para os ensaios de Mini – CBR em função da umidade. Nela se observa que após a adição do meio B4 não foi gerada uma melhoria

considerável quando comparados os valores obtido dos corpos tratados com relação aos não tratados nas três camadas objeto de estudo da pesquisa. Percebe-se que o comportamento do solo teve uma tendência a piorar quando a cura foi em laboratório, enquanto que nos corpos enterrados a tendência apresentada foi de manter os mesmos valores de mini-CBR. Em geral não se percebe uma influência clara em nenhuma das profundidades estudadas.

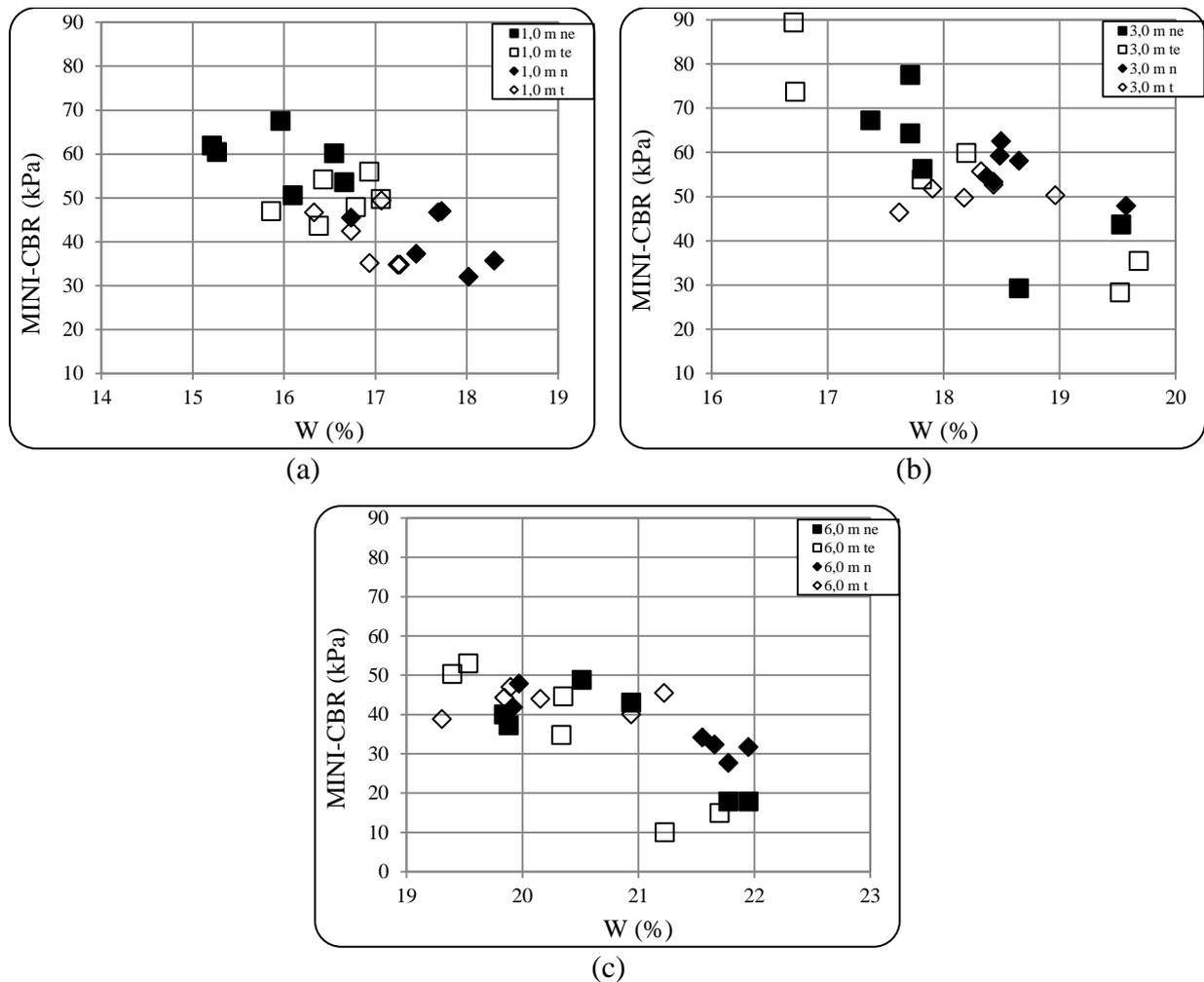


Figura 5.60 Relação w% - Mini-CBR (a) 1,0 m (b) 3,0 m (c) 6,0 m

Foram ainda plotados os valores de Mini-CBR em função da sucção normalizada em pF/e e em $pF/e_{(inter)}$ para verificar a influência da distribuição dos poros. Os gráficos que mostram os resultados estão apresentados na Figura 5.61. Cabe destacar que quando usado o “e” não é possível perceber uma alteração de comportamento com o tratamento e condição de cura em nenhuma das camadas.

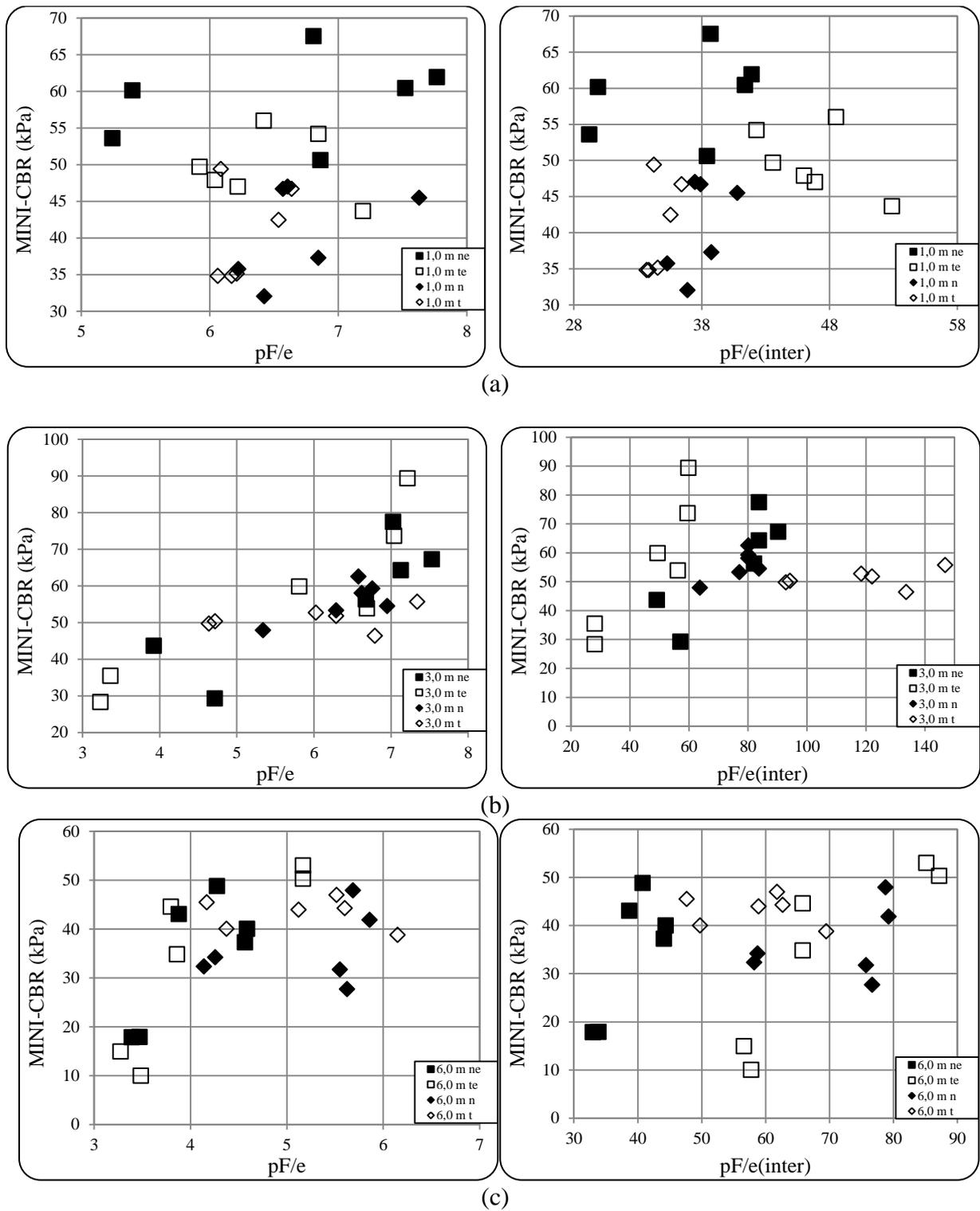


Figura 5.61 Relações “pF/e – Mini-CBR” e “pF/e_(interagregado) – Mini-CBR” (a) 1,0 m (b) 3,0 m (c) 6,0 m

Assim, se verifica uma tendência a todos os valores de Mini-CBR, tanto tratados quanto não tratados, de serem iguais nos dois tipos de cura. Já usando a relação $pF/e_{(inter)}$ observa-se que na camada de 1,0 m (Figura 5.61 (a)) há uma leve variação que representa uma possível melhoria nos corpos tratados quando enterrados. No entanto, os corpos curados em

laboratório não apresentaram nenhuma variação entre os tratados e os naturais. Na camada correspondente a 3,0 m (Figura 5.61 (b)), a tendência é haver uma melhora com o solo tratado e curado em laboratório, mas com o solo curado em campo, verificou-se também uma piora nos valores. Finalmente na camada de 6,0 m (Figura 5.61 (c)) se descreve um comportamento similar ao exposto pela camada de 1,0 m, onde observou-se uma melhoria com o tratamento quando os corpos de prova foram curados em campo.

Como comentário final pode-se dizer que houve uma dispersão nos resultados que não permite definir claramente uma tendência do comportamento em nenhuma das camadas de trabalho.

Por último se destaca que também foram realizadas as medidas da expansão e os resultados foram similares aos obtidos nas amostras compactadas no ramo seco, ou seja, se verificou que a adição do meio B4 conservou as características nas propriedades de expansão de cada camada, sendo que os valores obtidos são menores de 1,0%.

5.9 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA APÓS O TRATAMENTO EM AMOSTRAS COMPACTADAS NA UMIDADE ÓTIMA

É importante destacar que neste caso a caracterização física foi realizada após os ensaios correspondentes à caracterização do comportamento mecânico dos corpos de prova cuja cura foi de 70 dias. Salienta-se que também foi conservada a umidade do corpo no momento de realizar cada um dos ensaios.

5.9.1 Limites de Atterberg

Os resultados obtidos (Figura 5.62) permitiram observar que a adição do meio B4 gerou algumas variações nos limites. A Figura 5.62 (a) permite verificar que a umidade necessária para atingir o limite de liquidez (w_L) em cada camada diminuiu. Já quando observados os resultados para o limite plástico e o índice de plasticidade (Figura 5.62 (b) e (c)) se verifica que o tratamento tendeu diminuir a plasticidade do solo, isso está de acordo com os resultados apresentados na Figura 5.41.

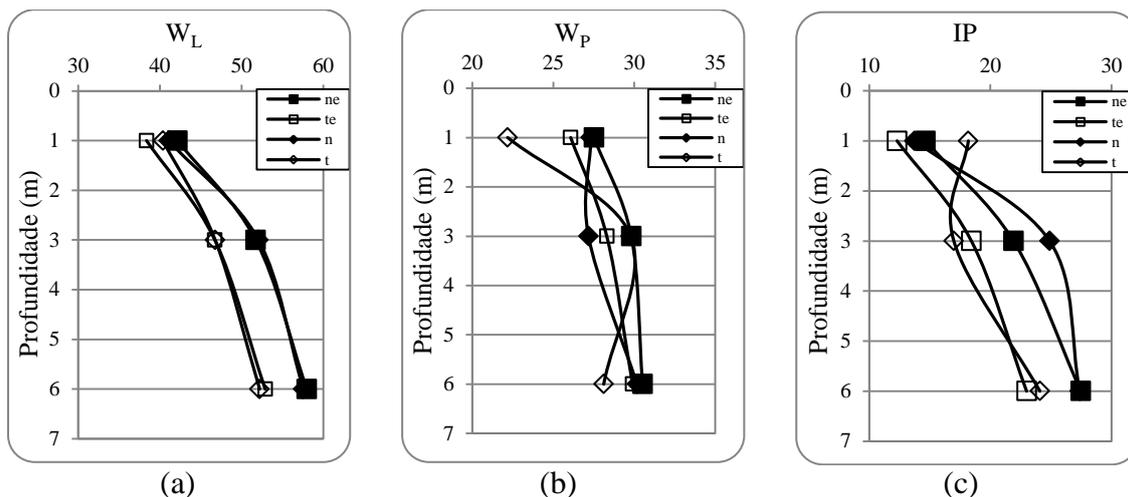


Figura 5.62 Limites de Atterberg segundo a profundidade (a) W_L (b) W_P (c) IP

Determinações da massa específica dos grãos (G_s) foram também realizadas. Os resultados confirmam mais uma vez que a adição do meio B4 não gera mudanças muito importantes nessa propriedade física do solo. A Tabela 5.14 apresenta os resultados provenientes dos ensaios descritos neste item.

Tabela 5.14 Resumo de resultados de limites de Atterberg, G_s e classificação de solos na umidade ótima

Amostra	$W_{(agregados)}$ (%)	W_L (%)	W_P (%)	IP (%)	G_s	MCT	SUCS
1,0 m ne	21	42	28	15	2,71	LA ³ -LG ³	ML
1,0 m te	37	38	26	12	2,70	LA ³ -LG ³	ML
1,0 m n	17	41	27	14	2,70	LA ³ -LG ³	ML
1,0 m t	16	40	22	18	2,71	LA ³ -LG ³	CL
3,0 m ne	29	52	30	22	2,73	LG ³	MH
3,0 m te	28	47	28	18	2,73	LG ³	ML
3,0 m n	32	52	27	25	2,72	LG ³	CH
3,0 m t	39	47	30	17	2,73	LG ³	ML
6,0 m ne	29	58	31	27	2,72	LG ³	MH
6,0 m te	30	53	30	23	2,73	LG ³	MH
6,0 m n	22	58	30	27	2,73	LG ³	MH
6,0 m t	21	52	28	24	2,74	LG ³	MH

Na tabela anterior apresentam-se também as umidades relativas aos agregados ($W_{(agregados)}$) de cada uma das amostras trabalhadas. Tais umidades ao serem menores que w_P indicam que há interferência da água livre nos microporos, sendo que as amostras não enterradas da camada de 3,0 m e tratada enterrada de 1,0 m apresentaram valores superiores ao limite de plasticidade refletindo um aumento artificial da plasticidade.

5.9.2 Análises granulométricas após o tratamento

Todas as análises granulométricas foram realizadas nas amostras com e sem adição do meio B4 mediante o uso do granulômetro a laser. Os resultados dos teores de cada fração granulométrica são apresentados na Tabela 5.15.

Tabela 5.15 Teores granulométricos no solo compactado na umidade ótima

TIPO DE SOLO	AMOSTRA	Areia	Silte	Argila	
1,0 m	Natural	N	81	19	0
		U	0	90	10
		U-DEF-U	0	90	10
	Tratado	T	85	14	0
		U	0	93	7
		U-DEF-U	0	92	8
	Natural Enterrado	NE	90	10	0
		U	36	58	6
		U-DEF-U	24	69	6
Tratado Enterrado		TE	84	16	0
		U	29	65	6
		U-DEF-U	26	68	6
3,0 m	Natural	N	93	7	0
		U	42	56	3
		U-DEF-U	40	57	3
	Tratado	T	88	12	0
		U	47	50	3
		U-DEF-U	45	51	4
	Natural Enterrado	NE	86	14	0
		U	27	68	5
		U-DEF-U	26	68	6
Tratado Enterrado		TE	88	12	0
		U	38	57	5
		U-DEF-U	24	69	7
6,0 m	Natural	N	85	15	0
		U	0	94	6
		U-DEF-U	0	91	9
	Tratado	T	84	15	1
		U	0	93	7
		U-DEF-U	0	89	11
	Natural Enterrado	NE	89	11	0
		U	19	72	8
		U-DEF-U	28	62	9
Tratado Enterrado		TE	78	21	1
		U	8	86	6
		U-DEF-U	65	34	1

Como ajuda para melhorar o entendimento dos resultados obtidos nas análises, as curvas granulométricas oriundas dos ensaios estão apresentadas no Anexo B (Figura B.4, Figura B.5 e Figura B.6). As metodologias adotadas durante a execução dos ensaios foram: i) unicamente água, ii) ultrassom (U) e iii) ultrassom + defloculante + ultrassom (U-DEF-U).

Neste caso também não houve conteúdo de material com tamanho superior ao da areia. Cabe destacar que quando comparados os teores obtidos com os do solo compactados no ramo seco se confirmou que houve quebra dos grãos, é por tal motivo que a classificação do solo segundo a metodologia SUCS mostrou uma mudança no tipo de solo quando a compactação foi realizada com a umidade ótima.

As frações granulométricas obtidas na camada de 1,0 m (Figura B.4) permitiram perceber que nos corpos de prova curados em laboratório houve agregação, enquanto que nos enterrados o efeito foi o contrario, sendo gerada uma desagregação. Já as frações obtidas para a camada de 3,0 m (Figura B.5) demonstram que não houve uma variação significativa nos teores granulométricos, tanto no solo enterrado quanto no curado em laboratório, após a adição do meio B4. Os efeitos observados na camada de 6,0 m (Figura B.6) são similares, exibindo uma desagregação geral no solo tratado.

Assim como no solo compactado no ramo seco, observou-se que não foi gerada a agregação das partículas que era esperada. É possível que o emprego do ultrassom também tenha destruído as ligações entre grãos geradas pela precipitação de CaCO_3 que pode ter sido precipitado quando realizado o tratamento do solo. No entanto, nas amostras onde não foi usado o ultrassom esse efeito não apareceu, por tanto, pode-se dizer que devido à aleatoriedade das variações determinadas elas encontram-se dentro da repetibilidade do ensaio para as amostras estudadas.

Para concluir a discussão dos resultados obtidos nas análises granulométricas, foi avaliado o teor de agregação (T.A.) com o intuito de verificar o grau de agregação do solo de cada camada (Tabela 5.16). Os resultados permitem constatar que nas camadas de 1,0 m e 3,0 m o tratamento não gerou mudanças importantes para fins práticos.

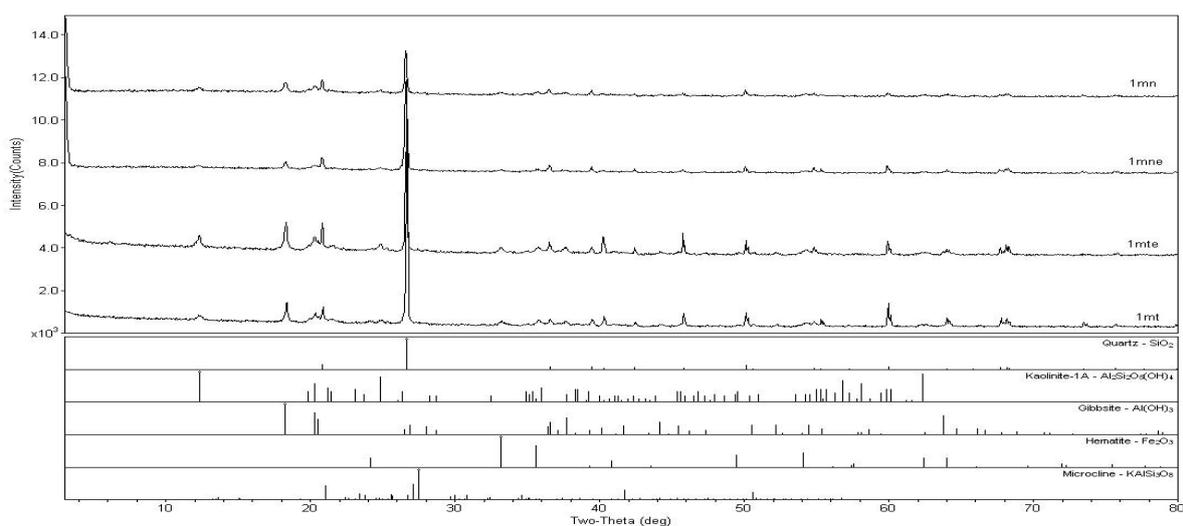
Contudo, nota-se que na profundidade de 6,0 m apresentaram-se reduções relevantes na agregação após a adição do meio B4, resultado que é negativo na pratica para as estruturas de pavimento.

Tabela 5.16 T.A. das amostras em cada camada na umidade ótima

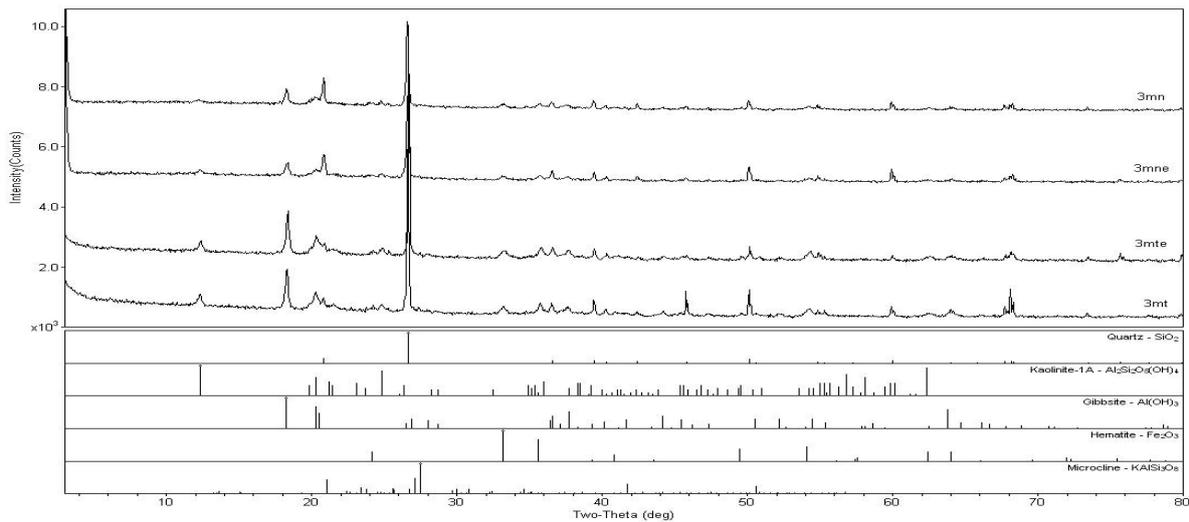
	TIPO DE SOLO	TA (%)	TAT (%)
1,0 m	Natural Enterrado (NE)	100	68
	Tratado Enterrado (TE)	100	68
	Natural (N)	97	86
	Tratado (T)	100	87
3,0 m	Natural Enterrado (NE)	100	60
	Tratado Enterrado (TE)	100	60
	Natural (N)	100	55
	Tratado (T)	100	43
6,0 m	Natural Enterrado (NE)	100	62
	Tratado Enterrado (TE)	90	62
	Natural (N)	96	87
	Tratado (T)	91	88

5.10 CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA DO SOLO APÓS COMPACTAÇÃO NA UMIDADE ÓTIMA

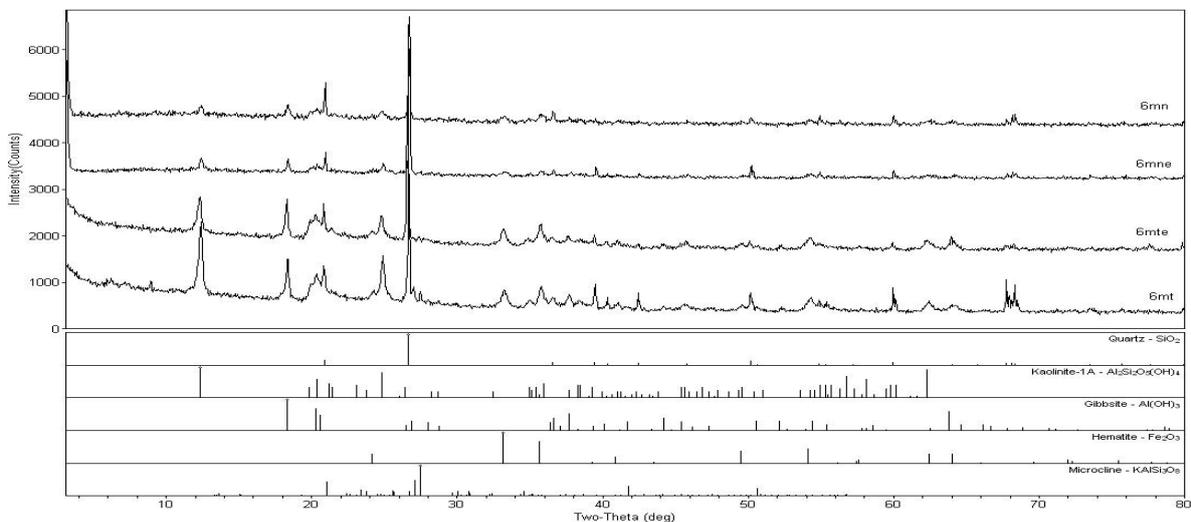
A caracterização mineralógica obtida nesta etapa (Figura 5.63) revelou uma coerência com os resultados obtidos nos testes de DRX do solo compactado no ramo seco, assim como com a composição assinalada por Lima (2003) e Carvalho (1995), com gibbsita e quartzo como os minerais com melhor cristalização nas duas camadas mais superficiais e com menor proporção encontram-se a caulinita e a hematita.



(a)



(b)



(c)

Figura 5.63 DRX das amostras compactadas na umidade ótima (a) 1,0 m (b) 3,0 m (c) 6,0 m

Cabe ressaltar que na camada de 6,0 m a caulinita é um mineral que começa a ter maior nível de cristalização, sendo assim um mineral que a partir dessa profundidade começa a ter maior predominância. Também é possível inferir o nível de intemperismo do perfil de solo, ao constatar que os minerais presentes em cada um dos difratogramas são típicos de solos com um nível de meteorização alto.

Observa-se ainda que as amostras tratadas não refletem a presença de CaCO_3 , sendo que a possível causa para esse fato continua sendo uma superposição de picos de outros minerais que estão em maior quantidade, dificultando assim a identificação dos correspondentes ao carbonato de cálcio.

Também foram realizados testes com ácido clorídrico com o intuito de confirmar a existência de CaCO_3 , sendo que todas as amostras tratadas apresentaram resultados positivos.

No entanto, quando tais testes foram realizados nas amostras naturais não percebeu-se nenhuma reação de efervescência.

5.11 DETERMINAÇÃO DO pH DO SOLO COMPACTADO NA UMIDADE ÓTIMA APÓS 70 DIAS DE TRATAMENTO

Para conferir as variações de pH induzidas pela adição do meio B4, foram realizadas determinações em ambas as amostras de solo, tratada e natural, após uma cura de 70 dias. Os resultados das determinações estão expostos na Tabela 5.17. Foi verificado que neste caso o tratamento gerou um aumento no pH das amostras quando comparadas com as correspondentes naturais. Observa-se ainda que os valores de pH medidos nos solos sem tratamento são similares aos obtidos nos mesmos solos quando realizada a caracterização do perfil.

Tabela 5.17 Determinações de pH na umidade ótima

AMOSTRA	H ₂ O	KCl	ΔpH
1,0 m N	5,85	5,82	-0,03
1,0 m NE	5,96	5,72	-0,24
1,0 m T	7,15	6,38	-0,77
1,0 m TE	7,04	6,44	-0,23
3,0 m N	5,70	6,45	0,28
3,0 m NE	5,43	6,36	0,35
3,0 m T	6,46	6,69	0,09
3,0 m TE	6,36	6,69	0,12
6,0 m N	5,10	4,95	-0,06
6,0 m NE	4,80	5,10	0,11
6,0 m T	5,87	5,40	-0,18
6,0 m TE	5,34	5,50	0,06

Por outro lado, ao calcular o ΔpH, observou-se que as três camadas ainda conservam as características mineralógicas originais, ou seja, as camadas 1,0 m e 6,0 m por apresentar valores negativos sugerem uma predominância de argilas silicatadas e a camada de 3,0 m continua exibindo um valor positivo indicando a riqueza em oxi-hidróxidos de Al e Fe. Todo o descrito anteriormente se confirma com os testes DRX, os quais apresentam como minerais principais gibbsita, quartzo e caulinita, os quais estão compostos especialmente por oxi-hidróxidos de Al e Fe.

5.12 ENSAIOS DE COMPRESSÃO UNIAXIAL ADICIONAIS

Uma vez analisados os resultados da caracterização do comportamento mecânico do solo após o tratamento realizou-se uma nova amostragem de solo com a finalidade de fabricar novos corpos de prova que seriam compactados na umidade ótima e na energia intermediária, para manter as características dos corpos que já tinham sido ensaiados em compressão simples nas condições em menção. A idéia era verificar se não haveria problema com a própria amostra de solo anteriormente usada. Cabe salientar que o local para a nova amostragem foi aproximadamente a 3,0 m de distância daquele onde foi realizada a coleta inicial. Esclarece-se que foram escolhidas as duas camadas superficiais (1,0 m e 3,0 m) para esta etapa.

O objetivo desses novos corpos de prova foi verificar a influência do tempo de armazenamento do solo na câmara úmida sobre as bactérias endógenas e, assim confirmar ou não se os resultados obtidos não haviam sido influenciados pelo tempo de armazenamento do solo na câmara úmida, o qual foi de aproximadamente 18 meses.

Esclarece-se que assim que foi retirado o solo do campo iniciou-se a preparação do mesmo para a compactação, a qual se realizou logo depois. Foram fabricados 6 corpos de prova para cada camada, tanto na condição natural quanto com adição do meio B4, os quais foram enterrados durante um período de 30 dias em grupos de dois e em três profundidades diferentes (50 cm; 75 cm e 100 cm). Os resultados dos ensaios de compressão simples em menção são apresentados na Figura 5.64.

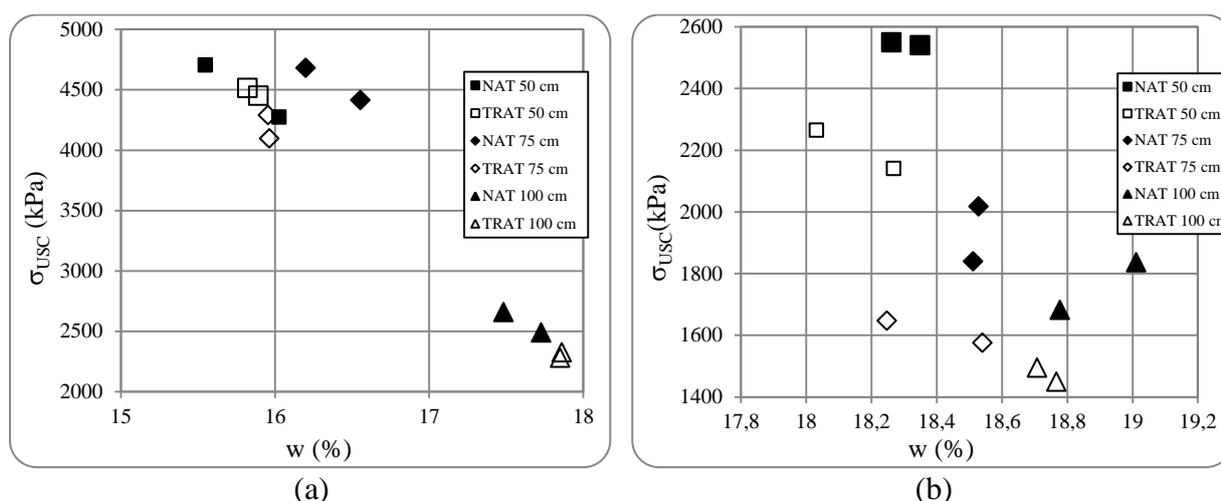


Figura 5.64 Relação σ_{usc} – $w\%$ (a) 1,0 m (b) 3,0 m

Observa-se na figura em questão que não há melhoria na resistência. Note-se ainda que as umidades são muito similares e que a dispersão entre os resultados é relativamente pouca no

caso da camada de 1,0 m (Figura 5.64 (a)). Já no caso da camada de 3,0 m (Figura 5.64 (b)) é possível notar uma maior dispersão nos resultados, mas percebe-se que essa ocorre tanto para o solo natural quanto para o tratado. Segundo os resultados mostrados nessa figura observa-se que para a profundidade de 1,0 m o tratamento com o meio B4 não teria afetado o comportamento, mas para 3,0 m de profundidade ele o teria piorado. Quando a resistência é avaliada em função da sucção (Figura 5.65) se observa que não há uma variação que indica melhoria em ambas as camadas de solo.

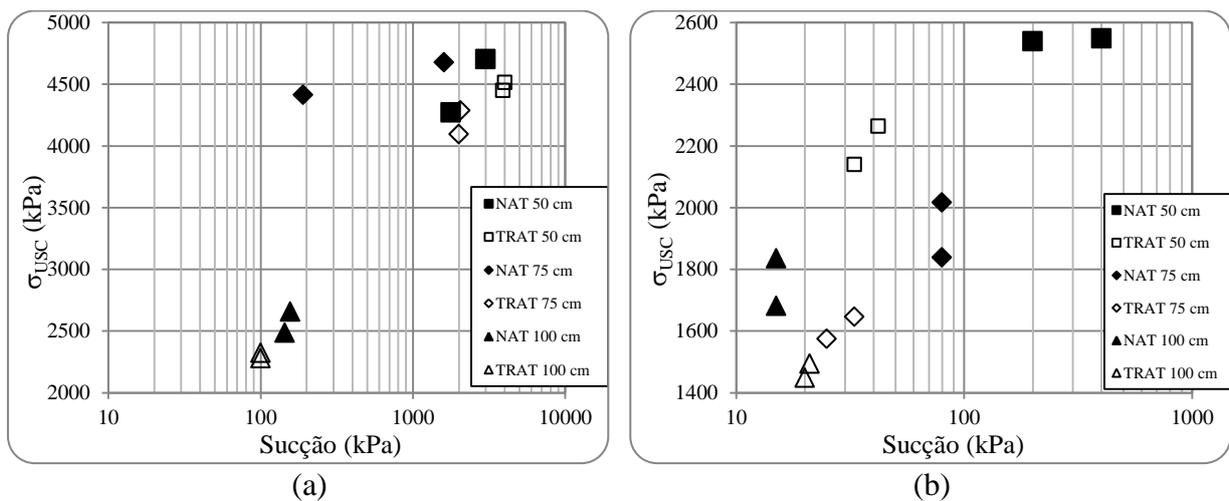


Figura 5.65 Relação sucção - σ_{USC} (a) 1,0 m (b) 3,0 m

Para finalizar a análise, fez-se ainda o gráfico da resistência em função da sucção em pF normalizada em relação ao índice de vazios global “e” e interagregado “ $e_{(inter)}$ ” (Figura 5.66). Ao observar os resultados com o índice de vazios global verificou-se que não houve uma melhora após o tratamento com o meio B4 em nenhuma das duas camadas. Já quando usado o índice de vazios interagregado percebeu-se que houve uma mudança no comportamento, indicando assim uma influencia refletida no aumento da resistência na camada de 1,0 m (Figura 5.66 (a)). No entanto, da profundidade de 3,0 m confirma-se que não houve melhoria na resistência a compressão simples (Figura 5.66 (b)).

Esses resultados permitem inferir que o tipo de armazenamento antes da confecção dos corpos de prova, em princípio, não interferiu nos processos microbiológicos naturais que ocorriam no solo. Além disso, o tipo de bactérias encontrado em cada uma das camadas durante a etapa de caracterização microbiológica do perfil é muito resistente e, quando elas não têm um ambiente propício para seu crescimento formam esporos até que as características do ambiente ao redor permitam a reativação do ecossistema interno do solo. Com isso

entende-se que o tratamento não afetou, ou afetou pouco o comportamento dos solos estudados.

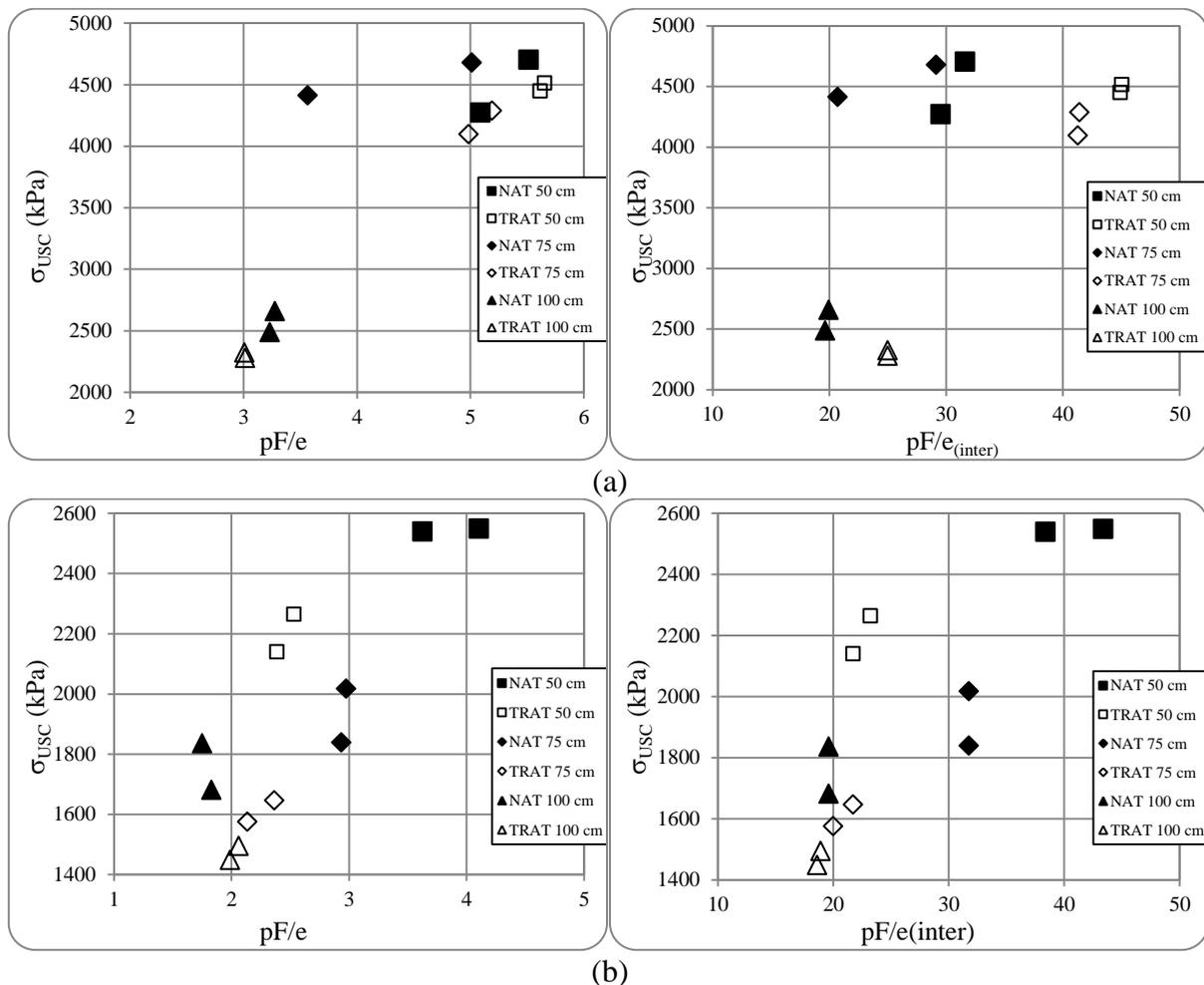
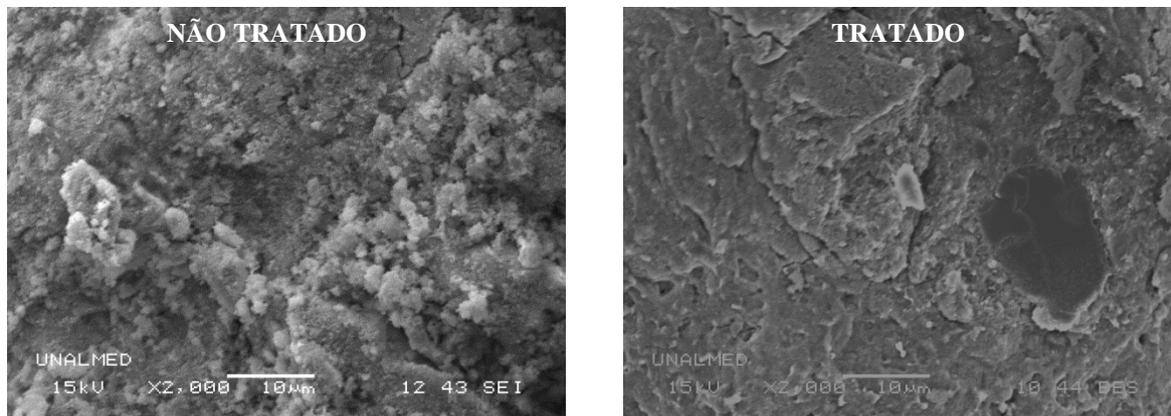


Figura 5.66 Relação $pF/e_{(inter)}$ - σ_{USC} (a) 1,0 m (b) 3,0 m

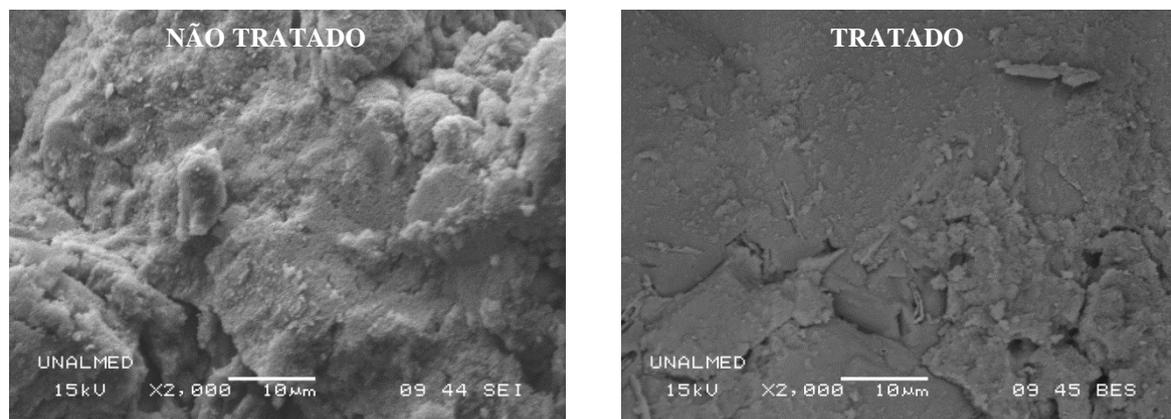
5.13 MICROSCOPIA ELECTRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

As imagens obtidas revelaram que no caso dos corpos de prova compactados no ramo seco não foi detectada a presença de carbonato de cálcio. Tal fato confirma que a concentração de meio B4 adicionada no solo realmente foi baixa. Na Figura 5.67 são apresentadas imagens com e sem tratamento para cada uma das camadas estudadas com aumento de duas mil vezes (X2.000).

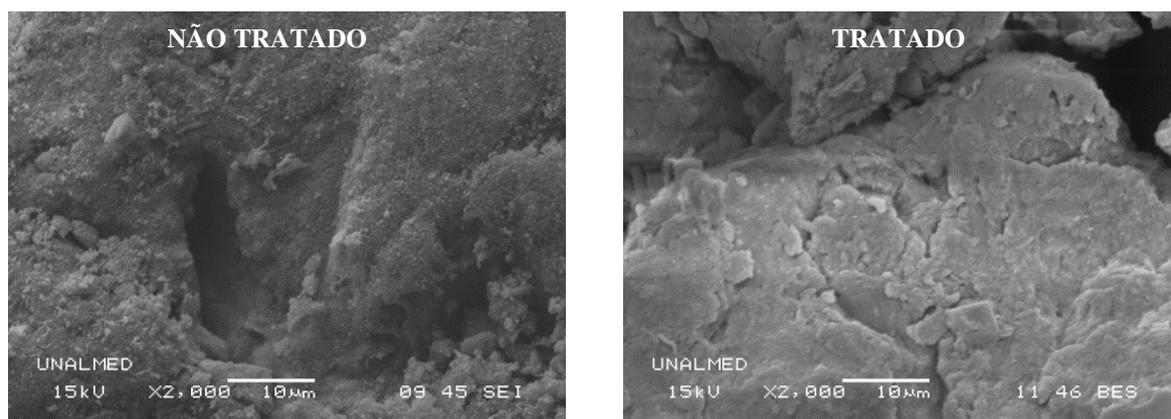
Já no caso dos corpos de prova compactados na umidade ótima, ao se duplicar a concentração do meio B4 adicionado, observou-se claramente que houve uma precipitação e que essa foi mais visível nas camadas de 3,0 m e de 6,0 m como apresentado na Figura 5.68, o que torna recomendável ampliar o estudo para teores mais altos de nutriente incorporado ao solo.



(a)

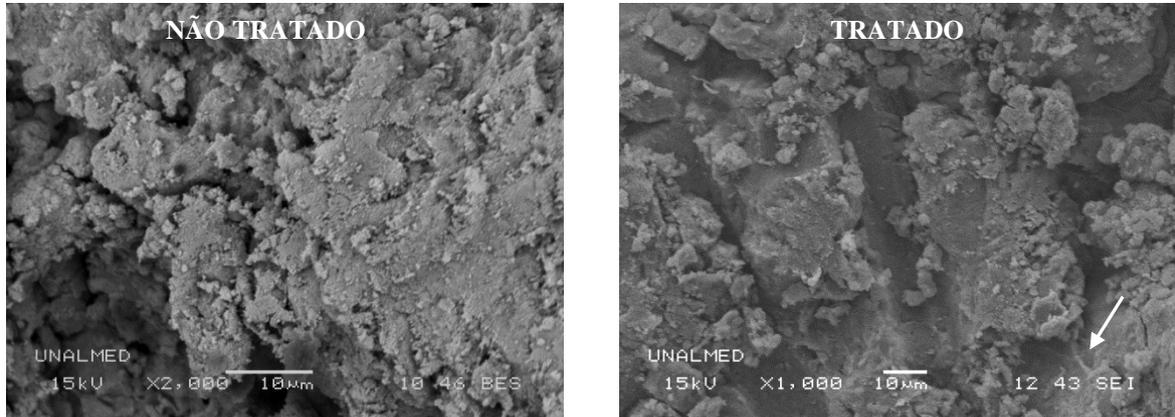


(b)

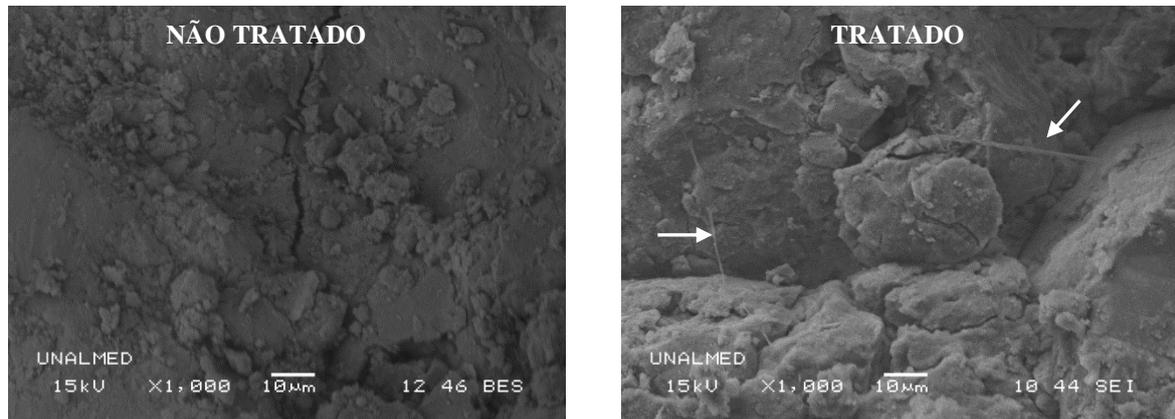


(c)

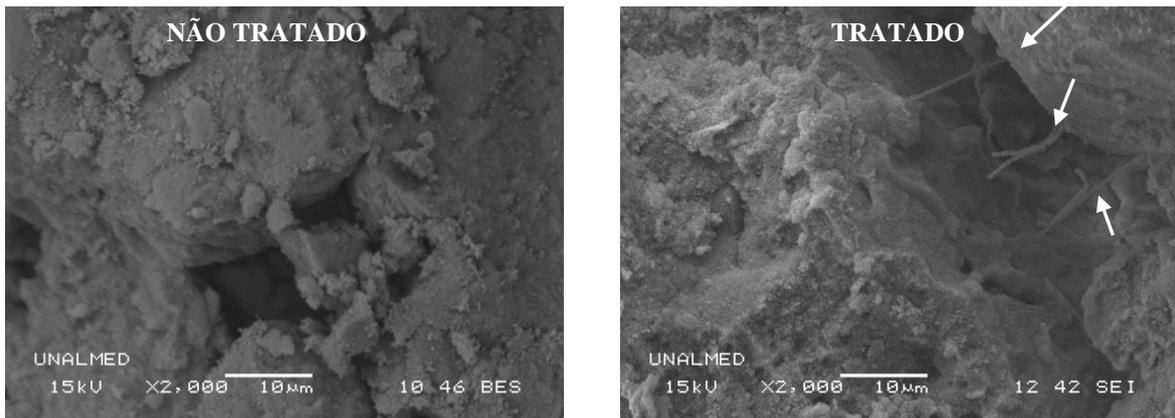
Figura 5.67 MEV para corpos de prova no ramo seco (a) 1,0 m (b) 3,0 m (c) 6,0 m



(a)



(b)



(c)

Figura 5.68 MEV para corpos de prova no umidade ótima (a) 1,0 m (b) 3,0 m (c) 6,0 m

C ONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 CONCLUSÕES

Na área de engenharia civil a revisão bibliográfica mostrou que há algumas décadas tem sido desenvolvidos estudos referentes à biomineralização, a maioria deles dirigida principalmente ao tratamento e selagem de trincas em concretos e à geração de biopelículas (*biofilms*) para melhorar as propriedades de permeabilidade do solo. No entanto, em áreas como a de pavimentação os estudos são relativamente recentes, havendo ainda muito que estudar para aumentar o conhecimento e a aplicação da biomineralização nessa área específica.

Os estudos realizados durante essa pesquisa indicaram que ainda existem muitas incógnitas referentes à aplicação da biomineralização no âmbito da pavimentação, pois, além de ser um trabalho multidisciplinar que envolve aspectos tanto da engenharia quanto de microbiologia e químicos, dentre outros, é preciso estudar a interação das propriedades do solo com os ambientes microbianos existentes no mesmo, em situações mais próximas à realidade para verificar os efeitos pós o tratamento, inclusive os ambientais. O trabalho interdisciplinar permite no que se refere à questão técnica a complementação entre aspectos geomecânicos, químicos, mineralógicos e aqueles atinentes à biomineralização.

Foi neste estudo comprovada a riqueza biológica dos perfis de solos tropicais, sendo que para o perfil estudado foram encontradas não menos do que 6 tipos de bactérias por camada. Os resultados da incubação das mesmas em meio B4 e os testes com HCl indicaram que a maioria delas foram adequadas para realizar o tratamento. Detectou-se que a camada de 4,0 m era a menos apropriada para ser estudada, devido ao baixo número de bactérias que possibilitaram a precipitação de CaCO_3 obtidas durante a determinação da existência de CaCO_3 .

Comprovou-se que o uso do feijão de porco (*Canavalia ensiformes*) inibe o crescimento das bactérias urease positivas indicando que possivelmente não é apropriado para um tratamento do solo com fins de bioestabilização. De igual forma, observou-se ainda que o tratamento do solo com extrato de feijão de porco proporcionou ao solo resistência a compressão simples inferior à obtida para o solo sem tratamento e tratado com o meio B4. No entanto, com esses resultados não pode-se afirmar com certeza que o feijão de porco não pode ser usado com fins de melhoria de solos na engenharia civil.

No estudo da influência do meio B4 na plasticidade do solo verificou-se que ele gerou a sua redução quando o tratamento foi realizado nos corpos compactados na umidade ótima, porém nos compactados no ramo seco não foi observada nenhuma variação. Portanto, é possível que tal alteração tenha sido ocasionada pelo aumento da concentração do meio B4 adicionado nas amostras da umidade ótima, pois diante dos resultados obtidos para o ramo seco optou-se por trabalhar na umidade ótima com o dobro da concentração que tinha sido adotada. Outra anotação importante com respeito a este tema é que a redução pode estar ligada à cristalização de CaCO_3 .

Embora a redução do IP não tenha sido muito relevante para fins práticos, observou-se que a concentração do meio é bastante importante no momento de realizar o tratamento, pois sua elevação conduziu a percepção da alteração desse índice.

Comprovou-se que a técnica de DRX não é apropriada para verificar a presença de CaCO_3 produzido via metabolismo microbiano nas condições estudadas, pois, os picos do carbonato de cálcio são facilmente disfarçados pelos picos de outros minerais que estão presentes em proporções muito maiores. É evidente que talvez trabalhando-se com maiores concentrações do meio B4 a técnica se mostre eficiente.

Nos corpos de prova curados em laboratório aparentemente houve uma ação química do nutriente e não uma indução da ação biológica, gerando assim uma desagregação dos grãos

quando adicionado o meio B4, é possível também que a falta de oxigênio tenha inibido a ação biológica dentro das amostras. Esse fato é ratificado pelas análises granulométricas que refletem tal efeito.

Quando enterrados os corpos de prova, observou-se, de uma forma geral, que o tratamento gerou um maior acréscimo das propriedades mecânicas do solo quando comparado com o efeito produzido na cura em laboratório, respeitadas as variações de sucção sofridas. É por tal motivo que se conclui que o processo de cura é muito importante na execução do tratamento de solo onde se envolva um processo metabólico microbiológico. Sendo que para fins práticos tal fato tem grande relevância.

Os estudos realizados nesta pesquisa deram nuances de que uma idade ideal para verificar os efeitos definitivos produzidos pela adição do meio B4 é de aproximadamente 30 dias, no entanto, é preciso realizar estudos mais específicos quanto a esse aspecto para definir com maior exatidão o melhor período de tempo de cura.

Foi possível verificar que há uma grande influência do índice de vazios, pois os resultados obtidos para o solo compactado no ramo seco exibiram mudanças nas propriedades geotécnicas avaliadas durante a pesquisa, as quais implicaram em aumentos de resistência dos corpos de prova. Tais variações normalmente foram de aumento. Enquanto que os resultados obtidos para o solo compactado na umidade ótima não apresentaram variações tão importantes após o tratamento, mesmo com a maior concentração do aditivo nesse caso.

Observou-se também que a adição do meio proporcionou um aumento nos valores de pH em especial quando a maior concentração do meio B4 foi usada. Essa constatação aponta indícios de que a maior concentração poderia ser mais benéfica para gerar um ambiente mais propício para a precipitação de CaCO_3 via metabolismo microbiológico.

Mesmo com concentrações diferentes na adição do meio B4, os resultados apresentados pela caracterização mecânica para cada tipo de compactação foram coerentes entre si, pois apresentaram as mesmas tendências em cada ensaio, no entanto, isso não permite estabelecer conclusões concretas com respeito ao fato de especificar como o tratamento acaba afetando a produção de CaCO_3 via metabolismo microbiano, pois a concentração do nutriente foi alterada entre as umidades de compactação utilizadas.

Como síntese geral conclui-se que os resultados obtidos no âmbito dessa pesquisa, apesar de não serem conclusivos para determinar a efetividade do tratamento com o meio nutritivo B4, não mostraram melhorias significativas do comportamento mecânico. Destaca-se, porém,

que outras pesquisas realizadas dentro desta linha de trabalho na UnB indicam que o tratamento pode apresentar melhorias significativas de comportamento, o que encontra-se em consonância com os resultados obtidos durante a etapa de identificação biológica e de precipitação *in vitro* onde observou-se um comportamento bastante promissor. É provável que o insucesso quanto à melhoria do comportamento mecânico desejada nessa pesquisa esteja ligado à baixa concentração de nutrientes utilizada, pois se processado todo o cálcio adicionado ao solo na produção de CaCO_3 isso proporcionaria a produção de 0,03% em relação ao peso seco do solo, quando usou-se 3,0 % de adição de meio B4.

6.2 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Com base nos resultados obtidos durante esta pesquisa observou-se a necessidade de realizar outras pesquisas que conduzam a um melhor entendimento dos processos de biomineralização com aplicações em obras geotécnicas, especialmente na área de pavimentação rodoviária. É por tal motivo que recomendam-se estudos que:

- ✓ Concentrem a atenção em ensaios de porosimetria.
- ✓ Permitam determinar a concentração mínima do meio para que se gere o teor de carbonato de cálcio desejado.
- ✓ Permitam verificar as características do CaCO_3 precipitado biologicamente, assim como a solubilidade do mesmo e como seria ele afetado pelas condições ambientais a que se veria submetido em obras civis como estradas, estabilização de taludes e erosão.
- ✓ Conduzam a determinar as condições de cura ideais.
- ✓ Que permitam verificar a influencia do índice de vazios e grau de saturação sobre a precipitação de CaCO_3 .
- ✓ Estejam dirigidos a avaliar a possibilidade de fazer o mesmo tratamento em repetidas ocasiões.

R

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT. NBR 6457 (1986). Solo - Determinação do limite de liquidez, Rio de Janeiro, RJ, 6 p.
- ABNT. NBR 6508. (1984). Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da massa específica, Rio de Janeiro, RJ, 8p.
- ABNT. NBR 7180. (1984). Solo - Determinação do limite de plasticidade, Rio de Janeiro, RJ, 3 p.
- ABNT. NBR 7181 (1984). Solo - Análise Granulométrica, Rio de Janeiro, RJ, 13 p.
- ABNT. NBR 10838 (1988). Solo - Determinação da massa específica aparente de amostras indeformadas, com emprego da balança hidrostática, Rio de Janeiro, RJ, 4 p.
- ABNT. NBR 12770 (1992). Solo coesivo – Determinação da resistência à compressão não confinada, Rio de Janeiro, RJ, 4 p.
- Alexander, M. (1980). Introducción a la microbiología del suelo. Ed. Libros y editores, S.A. México, 467p.
- Araki, M. S. (1997). Aspectos relativos às propriedades dos solos porosos colapsáveis do Distrito Federal. Dissertação de Mestrado em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, FT, UnB, Brasília, DF, 113 p.
- Arrieta, M. T. (2011). Biomineralización Aplicada A La Mitigación De Procesos Erosivos Superficiales, En Un Suelo Tropical De La Ciudad De Medellín. Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. 92 p.
- ASTM D-5298. (1992). Standard test method for measurement of soil potential (Suction) using filter paper. Annual Book of ASTM Standards, vol 15.09, 1312 – 1316.
- Bang, S. & Ramakrisnan, V. (2001). Microbiologically-Enhanced Crack Remediation (MECR). South Dakota School of Mines and Technology, 13p.

- Bang, S., Galinat, J., Ramakrishnan, V. (2001). Calcite precipitation induced by polyurethane-immobilized *Bacillus pasteurii*. *Enzyme and Microbial Technology*, 28, 404–409.
- Baron, E., Peterson, L. Finegold, S. (1994). *Diagnostic microbiology*. Ed. Mosby, 9a., St. Louis, Missouri, 958 p.
- Baskar, S., Baskar, R., Mauclaire, L. & McKenzie, J. A. (2006). Microbially Induced Calcite Precipitation In Culture Experiments: Possible Origin For Stalactites In Sahastradhara Caves, Dehradun, India *Current Science*, 90 (1): 58-64.
- Bourman, R. P. & Ollier, C. D. (2002). A critique of the Schellmann definition and classification of 'laterite'. *CATENA*. Vol. 47, Issue 2, p. 117–131
- Camapum de Carvalho, J. & Pereira, J.H.F. (2002). Estudo do Comportamento Mecânico dos solos Não-Saturados com Base na Sucção Normalizada. 4º Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, Porto Alegre-RS, vol. único: 134–148.
- Camapum de Carvalho, J., Leroueil, S. (2004). Curva Característica de Sucção Transformada. *Revista Solos e Rochas*, São Paulo, SP, 27 (3), p. 231-242.
- Camapum de Carvalho, J., Guimarães, R.C. & Pereira, J.H.F. (2002). Courbes caracteristiques d'un profil d'alteration. Third international conference on unsaturated soils. ABMS/ISSMGE, Recife-PE.
- Camapum de Carvalho, J. ; Konrad, J. ; Muma, M. (2000). Fluência em Material Granular estabilizado com Emulsão. 32a Reunião Anual de Pavimentação. *Pavimentação - A Rota para o Desenvolvimento Nacional*, v. 1, Brasília, DF, p. 175-183.
- Camapum de carvalho, J. (2007). Solo como material de construção. Livro: *Materiais de construção civil e princípios de ciências e engenharia de materiais*. Geraldo Cechella Isaia. São Paulo. Cap 17, 525-561.
- Camapum de Carvalho, J. (1985). Étude Du comportement mécanique d'une marne compactée. Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées – I.N.S.A., France-Toulouse, 181 p.
- Cardoso, E., Tsai, S. & Neves, M. C. (1992) *Microbiologia do solo*. Sociedade Brasileira de ciência do solo. Campinas, SP, 6-72.
- Cardoso, F.B.F. (1995). Análise química, mineralógica e micromorfológica de solos tropicais calapsíveis e o da dinâmica do colapso. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 140p.
- Cardoso, F.B.F. (2002). Propriedades e comportamento mecânico de solos do Planalto Central Brasileiro. Tese de Doutorado em Geotecnia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, FT UnB, Brasília, DF, 356 p.
- Castanier, S., Gaële Le, M. & Perthuisot, J. P. (1999). Ca-carbonates Precipitation and Limestone Genesis — the microbiogeologist point of view. *Sedimentary Geology* . Vol. 126, Issues 1-4: 9-23.
- Das, B. (2001). *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica*. Thomson. USA. 594 p.
- De Muynck, W.; De Belie, N.; Verstraete, W. (2010). Microbial carbonate precipitation in construction materials: A review. *Ecological Engineering*. V 36, (2): 118-136.
- Dejong, J. T.; Fritzes, M. B.; Nüsslein, K. (2006). Microbially Induced Cementation to Control Sand Response to Undrained Shear. *Journal Of Geotechnical And Geoenvironmental Engineering*. 1381-1392

- Delgado, A. K. C. (2002) Influência da Sucção no Comportamento de um Perfil de Solo Tropical Compactado. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 200p.
- Dick, J.; De Windt, W.; De Graef, B.; Saveyn, H.; Van der Meeren, P.; De Belie, N.; Verstraete, W. (2006). Bio-deposition of a calcium carbonate layer on degraded limestone by *Bacillus* species. *Biodegradation*. 17: 357–367.
- DNER-ME 228 (1994). Solo – Compactação em Equipamento Miniatura. 14 p.
- DNER-ME 254 (1997). Solos Compactados em Equipamento Miniatura – Mini-CBR e expansão. 14 p.
- Ércole, C.; Bozzelli, P.; Altieri, F.; Cacchio, P.; Del Gallo, M. (2012). Calcium Carbonate Mineralization: Involvement Of Extracellular Polymeric Materials Isolated From Calcifying Bacteria. *Microscopy and microanalysis*. 18: 829-839.
- Farias, W.M. (2003). Condutividade Hidráulica de Solos Tropicais Compactados a Hidrocarbonetos da Gasolina. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-108A/03, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 152 p.
- Farias, W. M.; Camapum de Carvalho, J.; da Silva ; Campos, I.C.; Santos Neto, P.M. (2011) Influência da compactação no micro e mesoporos nanoestruturados e na área superficial específica de um solo laterítico. In: VII Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, Pirenópolis. VII Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados. São Paulo. Vol 1. p. 169-175.
- Fitolito. Disponível em es.wikipedia.org/wiki/Fitolito. Acesso em fevereiro de 2009.
- Flórez, J. A. (2007). Estabilización de suelos con biocemento. Universidad de Los Andes, Bogotá, Colombia, 6p.
- Fonseca, J. A.; Rojas, L. B.; Zuluaga, P. I. (2004). Estudio del efecto de la aplicación de bacterias en la respuesta mecánica de suelos de subrasante – Etapa II. Tesis de Grado, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia, 73 p.
- GidiGasu, M. D. (1976). Laterite soil engineering pedogenesis and engineering principles. Elsevier scientific publishing company, Amsterdam, 554 p.
- Gómez, E. (2006). Evaluación de las propiedades geotécnicas de suelos arenosos tratados con bacterias calcificantes. Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia, 147 p.
- Gómez, C.M. (2009). Uso de biotecnologia na melhoria de solos para fins de pavimentação rodoviária. (2009). Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Universidade de Brasília, Brasília, DF, 98 p.
- Grim, R. E. (1962). *Applied Clay Mineralogy*. New York, McGraw Hill, 422p.
- Guimarães, R. (2002). Análise das propriedades e comportamento de um perfil de solo laterítico aplicada ao estudo do desempenho de estacas escavadas. Dissertação de Mestrado em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, FT, UnB, Brasília, DF, 172 p.
- Halverson, L. J. (2005). *Soil. Bacterial/Soil*. Elsevier Ltd. Iowa State University, Ames, IA, USA.

- Hammes, F. & Verstraete, W. (2002). Key roles and calcium metabolism in microbial carbonate precipitation. *Environmental Science & Bio/Technology* 1: 3-7.
- Hammes, F., Boon, N., Villiers, J., Verstraete, W. & Siciliano, D. (2003). Strain-Specific Ureolytic Microbial Calcium Carbonate Precipitation. *Appl Environ Microbiol.* August, 69(8): 4901–4909.
- Hogg, S. (2005). *Essential Microbiology*. Wiley. Inglaterra. 468 p.
- Ismail, M.A.; Joer H.A.; Randolph M.F.; Meritt, A. (2002). Cementation of porous material using calcite. *Geotechnique* 52: 5, 313 - 324.
- Jimenez-Lopez, C., et al. (2007). Consolidation of degraded ornamental porous limestone by calcium carbonate precipitation induced by the microbiota inhabiting the stone. *Chemosphere* 68:1929–1936.
- Jroundi, F.; Gómez-Suaga, P.; Jimenez-Lopez, C.; González-Muñoz, M. T.; Fernandez-Vivas, M. A. (2012). Stone-Isolated Carbonatogenic Bacteria As Inoculants In Bioconsolidation Treatments For Historical Limestone. *Science of The Total Environment*. 425: 89-98.
- Kile, D.E.; Eberl, D.D.; Hoch, A.R.; Reddy, M.M. (2000). An assessment of calcite crystal growth mechanisms based on crystal size distributions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. Vol 64 (17), September 2000: 2937–2950
- Lavelle, P. (2000). Ecological Challenges for Soil Science. *Soil Science. USA*. Vol 165, N° 1: 73 – 86.
- Lee, Y. N. (2003). Calcite Production by *Bacillus amyloliquefacies* CMB01. *Journal of Microbiology*, 41 (4): 345-348.
- Lima, M. (2003). Degradação físico-química e mineralógica de maciços junto às voçorocas. Tese de Doutorado. Universidade de Brasília, Faculdade de tecnologia, Departamento de engenharia civil e ambiental, Brasília, DF, 336 p.
- Lo Bianco, A. & Madonia, G. (2007). B.U.L.M. technique for increase of the bearing capacity in the pavement layers subjected to biological treatment. 4th INTERNATIONAL SIIV CONGRESS. Italia.
- López, I. (2008). Tratamiento de un suelo con *Bacillus pasteurii*. Efecto de la humedad y la porosidad. Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia, 160 p.
- Mann S. (2001) *Biomineralization: Principles and Concepts in Bioinorganic Materials Chemistry*. Oxford University Press, Oxford. 216 p.
- Martínez, G., Maya, L., Rueda, D. & Sierra, G. (2003). Aplicaciones estructurales de bacterias en la construcción de nuevas obras de infraestructura –Estabilización de suelos-. Trabajo de grado. Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia, 151 p.
- Meurs, G. V., Zon, W. V. D., Lambert, J., Ree, D. V. Whiffin, V., Moldendijk, W. (2006). Disponível em www.smartsoils.nl/files/2006_SmartSoil.pdf. Acesso em fevereiro de 2009.
- Montoya, C., Márquez, M., López, J. & Cuervo, C. (2005). Caracterización de cristales de calcita bioprecipitada por un aislamiento nativo de *Bacillus subtilis*. *Revista Colombiana de Biotecnología*. vol VII, número 002, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia, 19-25.
- Moreira, F. & Siqueira, J. O. (2002). Microbiologia e Bioquímica do solo. UFLA. Universidade Federal de Lavras, MG, 48-343.

- Mota, N. M. B. (2003). Ensaio Avançado de Campo na Argila Porosa Não Saturada de Brasília: Interpretação e Aplicação em Projetos de Fundação. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-013A/03, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 335 p.
- Muniz de Faria, M. & Palmeira, E. M. (2007). Agregados para a construção civil. Livro: Materiais de construção civil e princípios de ciências e engenharia de materiais. Geraldo Cechella Isaia. São Paulo. Cap 16, 481-525.
- Naka, K. (2007). Biomíneralization I: Crystallization and Self-Organization Process. Springer Verlag. 199 p.
- Nogami, J. S., Villibor, D. F. (1995). Pavimentação de Baixo Custo com Solos Lateríticos. Brasil. Ed. Vilibor, São Paulo, SP, 213p.
- Narayanaswamy. 1992. Geochemistry and genesis of laterite in parts of Cannanore district, North Kerala. Cochin University of Science and Technology. 116 p.
- Otálvaro, I.F. (2013). Comportamento Hidromecânico de um Solo Tropical Compactado. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 122p.
- RedBi. (2001). Biomíneralización, los micro-organismos reconstruyen monumentos. Disponível em www.biologia-en-internet.com/default.asp?Id=22&Fd=2. Acesso em março de 2008.
- Ribeiro, L. (1999). Técnicas administrativas para a construção de bases de pavimentos rodoviários. Dissertação de Mestrado em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, FT, UnB, Brasília, DF, 143 p.
- Riding, R. (2000). Microbial carbonates: the geological Record of calcified bacterial -algal mats and biofilms. *Sedimentology*, 47, 179-214.
- Rodríguez-Navarro, C.; Rodríguez-Gallego, M.; Ben Chekroun, K.; González-Muñoz, M.T. (2003) Conservation Of Ornamental Stone By Myxococcus Xanthus-Induced Carbonate Biomíneralization. *Applied And Environmental Microbiology*. N° 69: 2182–2193.
- Roseno, J.L., Camapum de Carvalho, J. (2007) Avaliação granulométrica de um perfil de solo tropical usando o granulômetro a laser. III Simpósio sobre Solos Tropicais e Processos Erosivos no Centro-Oeste. Cuiabá, MT, 53p.
- Santos, J. (2004). Estabilização de uma Argila Laterítica do Distrito Federal para uso em Rodovias de Baixo Volume de Tráfego. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-127/04, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 95 p.
- SECSASA. 2010. Permazyme 11X. Disponível em www.secsasa.com/PermaZyme_Home.htm#QEPZ. Acesso em Janeiro de 2010.
- Silva Filho, G.N.; Oliveira, V. L. (2007) Microbiologia - Manual de Aulas Práticas. 2a. ed. rev.. Florianópolis: Editora da UFSC. Vol 1. 157p.
- Sondi, I. & Matijević, E. (2001). Homogeneous Precipitation of Calcium Carbonates by Enzyme Catalyzed Reaction. *Journal of Colloid and Interface Science*, 238, 208–214.
- Soto, A. (2003). Introducción a los Biomínerales y Biomateriales. Universidade de Chile. 31 p.

- Stocks-firscher, S., Galinat, J. & Bang, S. (1999). Microbiological precipitation of CaCO₃. *Soil Biology & Biochemistry*, 31, 1563-1571.
- Teixeira, W., Mota, M. C. T., Fairchild, T. R., Taioli, Fabio. (2000). *Decifrando a terra. Oficina de textos. São Paulo. 558 p.*
- Terrazyme. Disponível em www.naturezyme.com.br/produtos.html. Acesso janiero de 2009.
- Tortora, G. J., Funke, B. R., Case, C. L. (2007). *Introduccion a la microbiología. 9ª Ed. Buenos Aires: Buena Panamericana. 988 p.*
- Valencia, Y. (2009). *Influência da biomineralização nas propriedades físicas e mecânicas de um perfil de solo tropical afetado pela erosão. Tese de doutorado. Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 183p.*
- Valencia, Y. (2010). *Estudo da melhoria de um solo tropical a partir de técnicas biotecnológicas utilizadas em campo. Relatório 1 pós-doutorado. Universidad Nacional de Colobia. 43 p.*
- Valencia, Y.; Camapum de Carvalho, J.; Lara, L. A. (2012). *Estudio De La Mejoría De Un Suelo Tropical A Partir De Técnicas Biotecnológicas Utilizadas En Campo. Dyna. Vol 173: 56-65.*
- Villibor, D. F.; Nogami, J. S.; Miranda, P. R.; Zuppolini, A. (1996). *A Importância Dos Solos Tropicais Em Pavimentação. 7ª Reunião De Pavimentação Urbana. São José Dos Campos, São Paulo.*
- Villibor, D. F.; Nogami, J. S.; Cincerre, J. R.; Miranda, P. R.; Zuppolini, A. (2009). *Pavimentos de Baixo Custo para Vias Urbanas. 2ª edição, São Paulo: Arte & Ciência, 2009. 196 p.*
- Whiffin, V., Van Paasen, L. A., Harkes, M. P. (2007). *Microbial carbonate precipitation as a soil improvement technique. Geomicrobiology Journal, 24, 1-7.*
- Whiffin, V., Lambert, J., Dert F. &, Van ree, C. (2005). *Biogrout and Biosealing. Pore space engineering with bacteria. September-October, 13-36.*
- Zilli, J., Gouvea, N., da Costa, H. & Prata, M. C. (2003). *Diversidade Microbiana como indicador da qualidade do solo. Cadernos de Ciência & Tecnologia, Brasília, 20 (3): 391-411.*

ANEXO A

RESULTADOS TESTES

CARACTERIZAÇÃO MICROBIOLÓGICA

A seguir são apresentados os resultados dos testes bioquímicos realizados na identificação das colônias microbiológicas do perfil de solo. Para melhor entendimento são descritos os símbolos das tabelas.

B	→	Bacillus	CB	→	Cocobacillus
AA	→	Amarelo Amarelo	NR	→	Não Reativo
O	→	Oxidativo	F	→	Fermentativo
-	→	Negativo	+	→	Positivo

Tabela A.1 Resultados das provas bioquímicas para cada bactéria da camada com 1,0 m de profundidade do perfil de solo do campo experimental da UnB

IDENTIFICAÇÃO BACTERIANA CAMADA 1,0 m																			
BACTERIA	MICROSCOPIO	GRAM	CATALISE	OXIDASE	KOH 3%	INDOL	MACCONKEY	TSI	GELATINA	SACAROSE	LACTOSE	VM	LISINA	OF	ARGININA	NITRATO	UREIA	CITRATO	VP
1	B	+	+	-	+												+		
2	CB	-	+	-	-	-	+	AA	+	+		-					-	-	+
3	B	-	+	+	+												+		
4	CB	-	+	-	-	-	+	AV	+	+		-					-	-	+
5	B	+	+	-	+												-		
6	B	+	+	-	+												-		

Tabela A.2 Resultados das provas bioquímicas para cada bactéria da camada com 2,0 m de profundidade do perfil de solo do campo experimental da UnB

IDENTIFICAÇÃO BACTERIANA CAMADA 2,0 m																			
BACTERIA	MICROSCOPIO	GRAM	CATALISE	OXIDASE	KOH 3%	INDOL	MACCONKEY	TSI	GELATINA	SACAROSE	LACTOSE	VM	LISINA	OF	ARGININA	NITRATO	UREIA	CITRATO	VP
1	CB	-	+	-	-	-	+	AA	+	+		-					-	-	+
2	B	+	-	-	+												-		
3	B	-	+	+	-	-	-		+					NR		-	+		
4	B	+	+	-	+												-		
5	CB	-	+	-	-		+	AA	+	+	+	-	-		+		-	+	+
6	B	-	+	+	-		-		+					NR		-	+		
7	CB	-	+	+	-		+							O			-		
8	CB	-	+	+	-		+							F			+		
9	CB	-	+	+	-		+							F			+		

Tabela A.3 Resultados das provas bioquímicas para cada bactéria da camada com 3,0 m de profundidade do perfil de solo do campo experimental da UnB

IDENTIFICAÇÃO BACTERIANA CAMADA 3,0 m																			
BACTERIA	MICROSCOPIO	GRAM	CATALISE	OXIDASE	KOH 3%	INDOL	MACCONKEY	TSI	GELATINA	SACAROSE	LACTOSE	VM	LISINA	OF	ARGININA	NITRATO	UREIA	CITRATO	VP
1	CB	-	+	-	-	-	+	AA	+	+		-					-	-	+
2	CB	-	+	+	-		+							O			-		
3	B	+	+	-	+												-		
4	CB	-	+	-	-	-	+	AA	+	+		-					-	-	+
5	CB	-	+	+	-		+							F			-		
6	CB	-	+	-	-	-	+	AA			+	-	-		+		-	+	+

Tabela A.4 Resultados das provas bioquímicas para cada bactéria da camada com 4,0 m de profundidade do perfil de solo do campo experimental da UnB

IDENTIFICAÇÃO BACTERIANA CAMADA 4,0 m																			
BACTERIA	MICROSCOPIO	GRAM	CATALISE	OXIDASE	KOH 3%	INDOL	MACCONKEY	TSI	GELATINA	SACAROSE	LACTOSE	VM	LISINA	OF	ARGININA	NITRATO	UREIA	CITRATO	VP
1	CB	-	+	-	-	-	+	AA	+	+		-					+	-	+
2	CB	-	+	-	-	-	+	AA	+	+		-					+	-	+
3	B	+	+	-	+												-		
4	CB	-	+	-	-	-	-	AA	+	+		-					+	-	+
5	B	+	+	-	+												-		
6	B	+	+	-	+												-		
7	CB	-	+	+	-		+							F			-		

Tabela A.5 Resultados das provas bioquímicas para cada bactéria da camada com 5,0 m de profundidade do perfil de solo do campo experimental da UnB

IDENTIFICAÇÃO BACTERIANA CAMADA 5,0 m																			
BACTERIA	MICROSCOPIO	GRAM	CATALISE	OXIDASE	KOH 3%	INDOL	MACCONKEY	TSI	GELATINA	SACAROSE	LACTOSE	VM	LISINA	OF	ARGININA	NITRATO	UREIA	CITRATO	VP
1	CB	-	+	-	-	-	+	AA	+	+		-					+	-	+
2	CB	-	+	+	-		+							F			-		
3	CB	-	+	+	-		+							F			-		
4	CB	-	+	-	-	-	+	AA	+	+		-					+	-	+
5	CB	-	+	-	-	-	+	AA	+		+	-	+		+		+	+	+
6	B	+	+	-	+												-		
7	CB	-	+	-	-	-	+	AA	+	+		-					-	-	+
8	B	+	+	-	+														

Tabela A.6 Resultados das provas bioquímicas para cada bactéria da camada com 6,0 m de profundidade do perfil de solo do campo experimental da UnB

IDENTIFICAÇÃO BACTERIANA CAMADA 6,0 m																			
BACTERIA	MICROSCOPIO	GRAM	CATALISE	OXIDASE	KOH 3%	INDOL	MACCONKEY	TSI	GELATINA	SACAROSE	LACTOSE	VM	LISINA	OF	ARGININA	NITRATO	UREIA	CITRATO	VP
1	CB	-	+	+	-		+							F			-		
2	CB	-	+	+	-		+							F			-		
3	CB	-	+	-	-	-	+	AA	+	+		-					-	-	+
4	B	+	+	-	+												+		
5	B	+	+	-	+												+		
6	CB	-	+	-	-	-	+	AA	+	+		-					-	-	+
7	CB	-	-	-	-		-							F			-		
8	CB	-	+	-	-	-	+	AA				-					-	-	+
9	B	+	+	-	+												-		

Tabela A.7 Resultados das provas de carbonato com HCl nas bactérias de cada camada

CAM	BACT	BACTERIA PURA	BACTERIA EM MEIO B4	CAM	BACT	BACTERIA PURA	BACTERIA EM MEIO B4
		EFERV	EFERV			EFERV	EFERV
1,0 m	1	X	✓✓	2,0 m	1	X	✓✓
	2	X	✓		2	X	X
	3	X	✓✓		3	X	✓✓
	4	X	✓✓		4	X	✓
	5	X	X		5	X	✓✓
	6	X	X		6	X	X
					7	X	✓✓
					8	X	✓✓
					9	X	✓✓
3,0 m	1	X	✓✓	4,0 m	1	X	✓✓
	2	X	✓✓		2	X	✓✓
	3	X	✓		3	X	X
	4	X	✓✓		4	X	X
	5	X	✓✓		5	X	X
	6	X	✓✓		6	X	X
			7		X	X	
5,0 m	1	X	✓✓	6,0 m	1	X	✓✓
	2	X	✓✓		2	X	✓✓
	3	X	✓✓		3	X	✓✓
	4	X	✓		4	X	✓
	5	X	✓		5	X	✓✓
	6	X	X		6	X	✓✓
	7	X	✓		7	X	X
	8	X	X		8	X	✓✓
			9		X	✓	
X	Não reage	✓	Efervesce	✓✓	Efervesce muito		

ANEXO B

CURVAS GRANULOMÉTRICAS

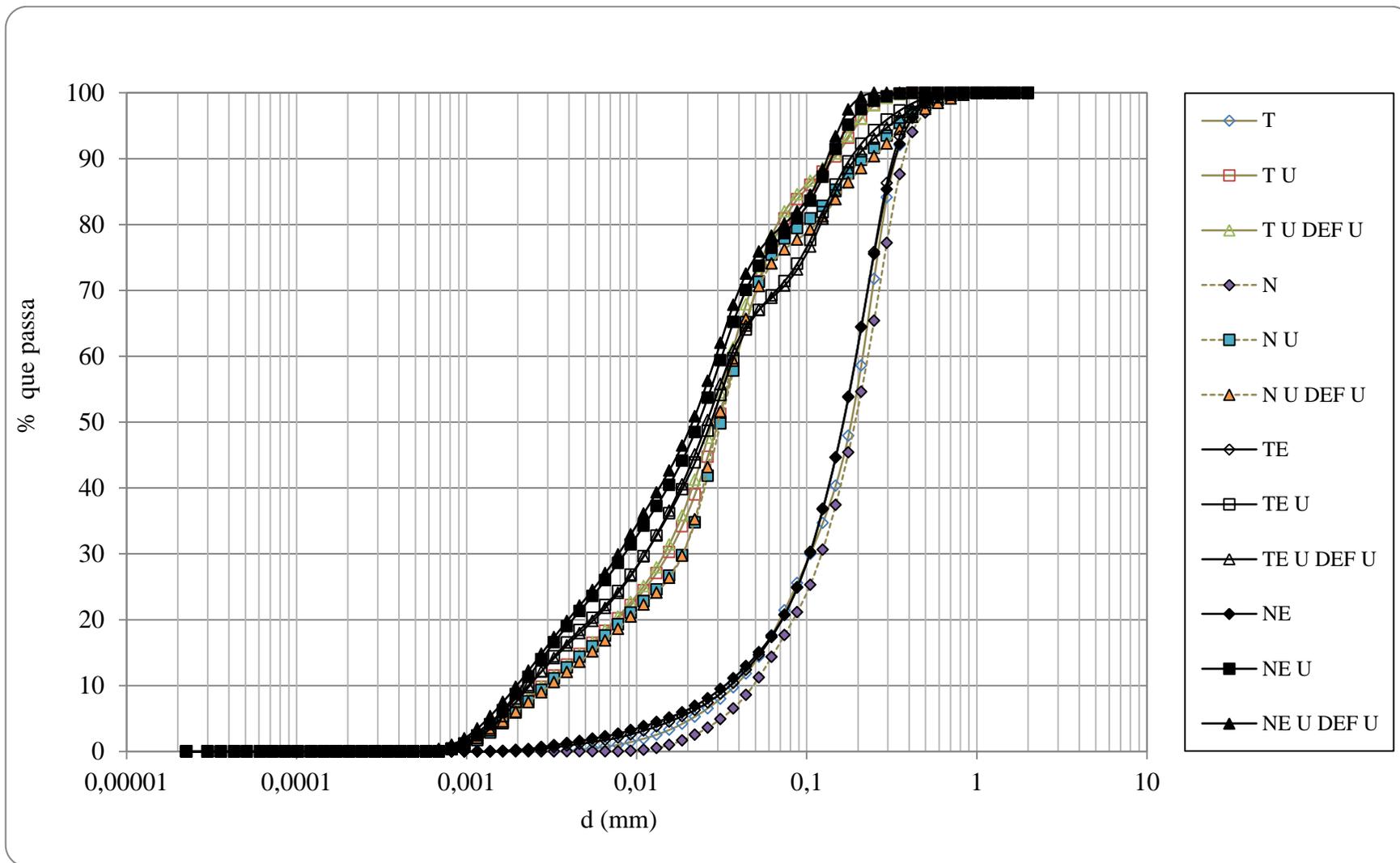


Figura B.1 Curvas granulométricas para ramo seco da camada 1,0 m

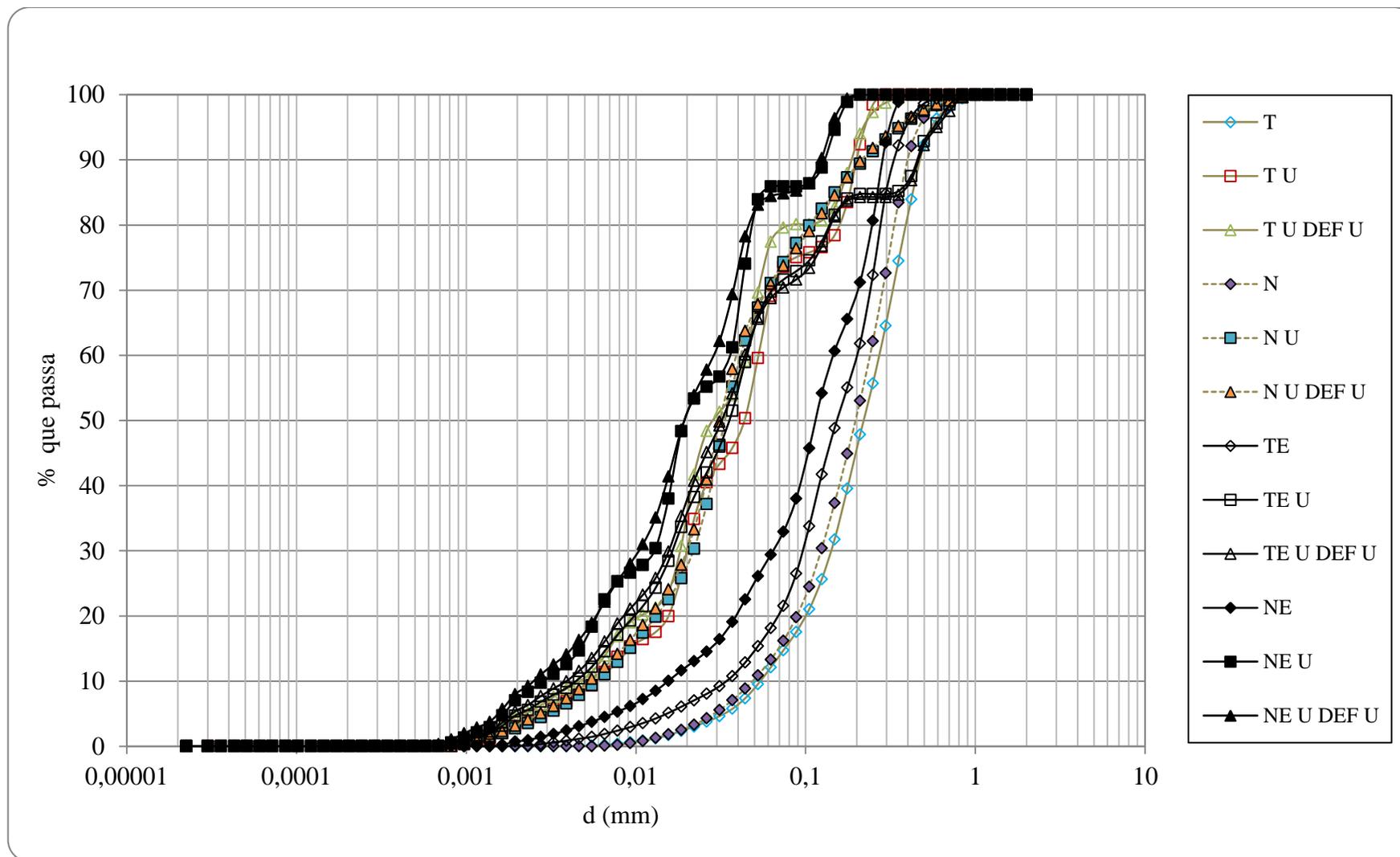


Figura B.2 Curvas granulométricas para ramo seco da camada 3,0 m

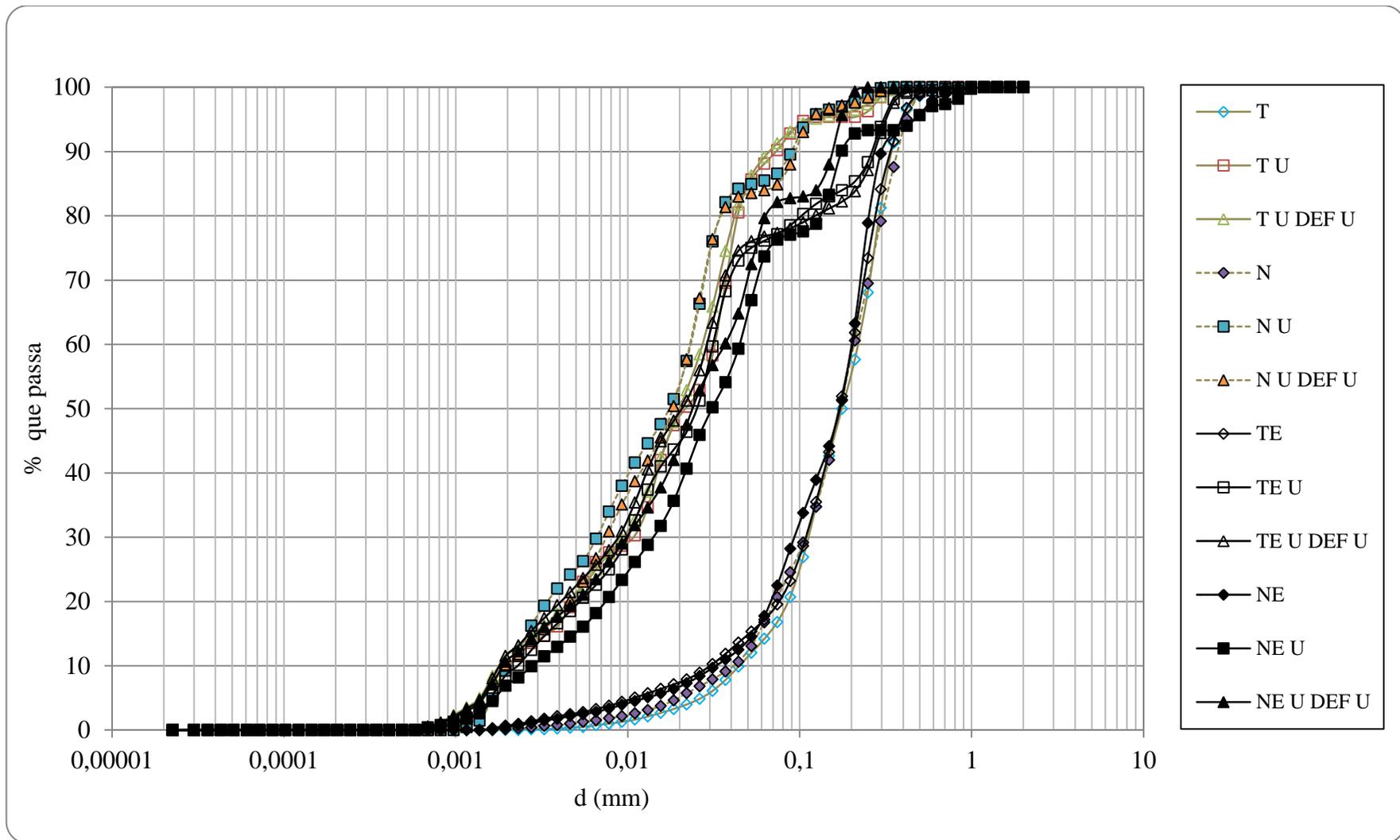


Figura B.3 Curvas granulométricas para ramo seco da camada 6,0 m

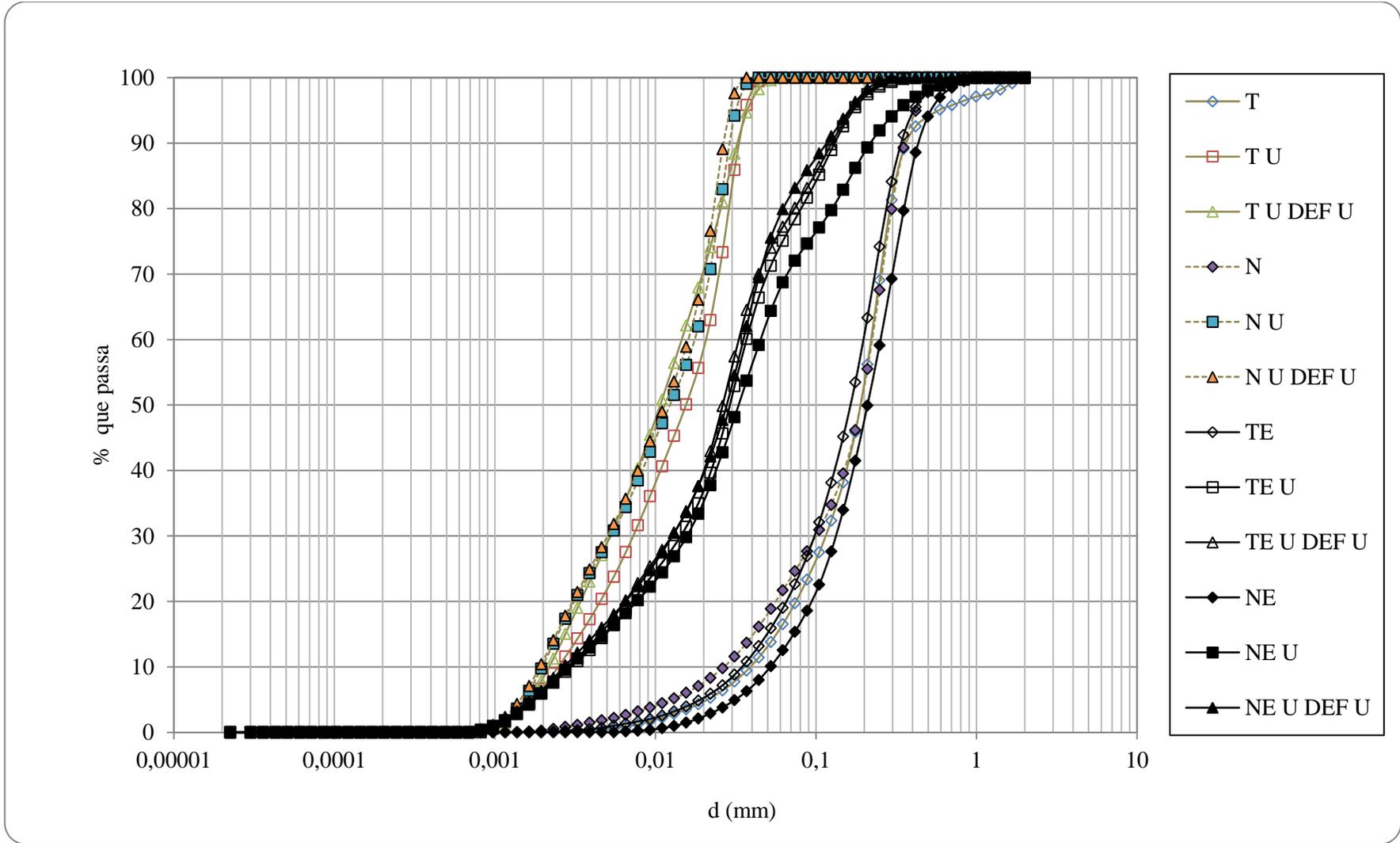


Figura B.4 Curvas granulométricas para umidade ótima da camada 1,0 m

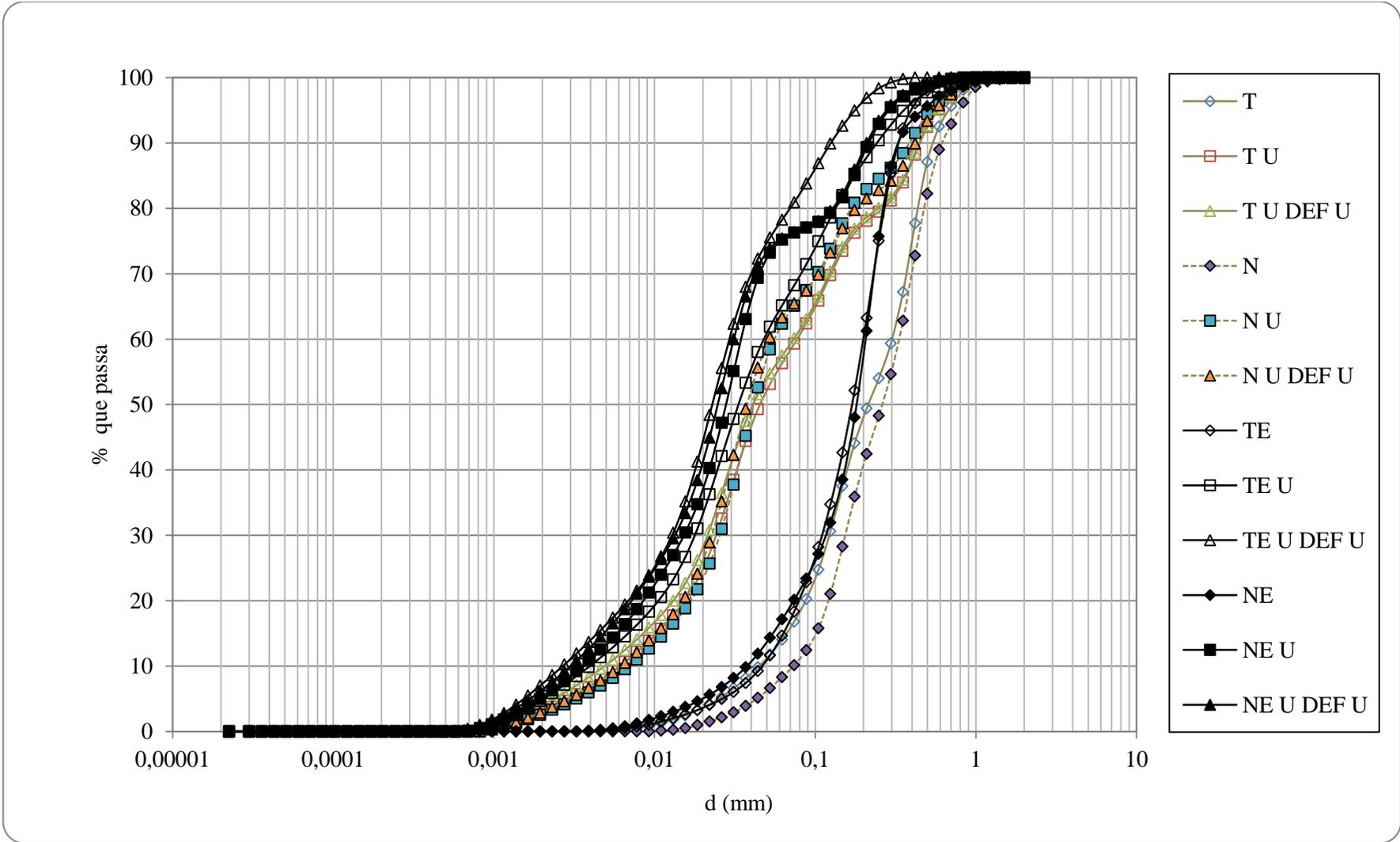


Figura B.5 Curvas granulométricas para umidade ótima da camada 3,0 m

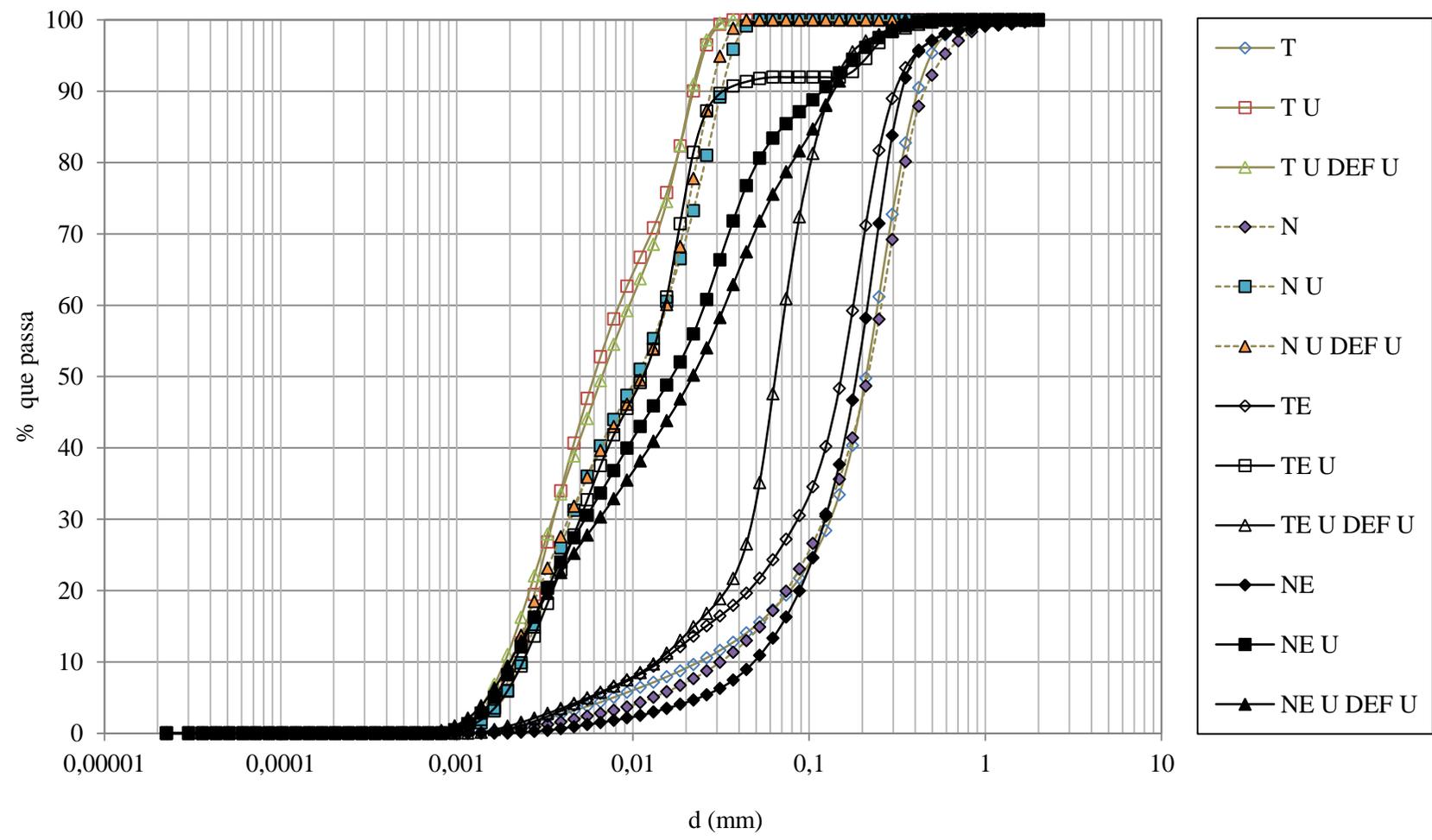


Figura B.6 Curvas granulométricas para umidade ótima da camada 6,0 m

