

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

**INFLUÊNCIA DA BIOMINERALIZAÇÃO NAS
PROPRIEDADES FÍSICO - MECÂNICAS DE UM PERFIL
DE SOLO TROPICAL AFETADO POR PROCESSOS
EROSIVOS**

YAMILE VALENCIA GONZÁLEZ

**ORIENTADOR: JOSÉ CAMAPUM DE CARVALHO, PhD.
CO-ORIENTADORA: ÂNGELA PATRÍCIA SANTANA, DSc.**

TESE DE DOUTORADO EM GEOTECNIA

**PUBLICAÇÃO: G.TD-059/09
BRASÍLIA/DF: JULHO – 2009**

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

**INFLUÊNCIA DA BIOMINERALIZAÇÃO NAS PROPRIEDADES
FÍSICO - MECÂNICAS DE UM PERFIL DE SOLO TROPICAL
AFETADO POR PROCESSOS EROSIVOS**

YAMILE VALENCIA GONZÁLEZ

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

APROVADA POR:

**Prof. José Camapum de Carvalho, PhD (ENC-UnB)
(Orientador)**

**Prof. Fernando Araripe Gonçalves, PhD (DBC-UnB)
(Examinador Interno)**

**Prof. Marcio Muniz de Farias, PhD (ENC-UnB)
(Examinador Interno)**

**Prof. Vitor Paulo Pereira, PhD (DEMIPE-UFRGS)
(Examinador Externo)**

**Prof. Marco Antonio Márquez Godoy, DSc (UNALMED)
(Examinador Externo)**

BRASÍLIA/DF, 27 DE JULHO DE 2009

FICHA CATALOGRÁFICA

VALENCIA GONZÁLEZ, YAMILE

Influência da biomineralização nas propriedades físico - mecânicas de um perfil de solo tropical afetado por processos erosivos. [Distrito Federal] 2009.

xxv, 183p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Tese, Geotecnia, 2009).

Tese de Doutorado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Biomineralização

2. Erosão

3. Solo Tropical

4. Carbonato de cálcio

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

VALENCIA, Y. G. (2009). Influência da biomineralização nas propriedades físico - mecânicas de um perfil de solo tropical afetado por processos erosivos. Tese de Doutorado em Geotecnia, Publicação G.TD-059/09, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 183p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Yamile Valencia González.

TÍTULO: Influência da biomineralização nas propriedades físico - mecânicas de um perfil de solo tropical afetado por processos erosivos.

GRAU: Doutor

ANO: 2009

É concedida à Universidade de Brasília 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 dessa tese de doutorado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Yamile Valencia González

SCLN 209, Bloco B, Apto. 201.

70.854-520 Brasília – DF – Brasil.

Aquel que desee convertirse en maestro del hombre,
debe empezar por enseñarse así mismo
antes de enseñar a los demás;
y debe enseñar primero con el ejemplo
antes de que lo haga verbalmente.
Pues aquel que se enseña a sí mismo
y rectifica sus propios procedimientos,
merece más respeto y estimación
que el que enseña y corrige a otros,
eximiéndose a él mismo.

Khalil Gibran

Dedico este trabalho a Deus, por oferecer-me a oportunidade de viver esta grande experiência.

A meu querido esposo, por seu apoio incondicional, suas palavras de alento nos momentos em que desfalecia e por estar sempre do meu lado, sendo a luz que ilumina minha vida.

A minha família, por suas orações, apoio e força para seguir sempre adiante.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelas oportunidades e as bênçãos recebidas em todo momento.

A meu esposo, que sempre esteve comigo me apoiando, dando-me forças e me ajudando em tudo o que poder e o que não poder. Por alegrar-me nos dias em que senti desfalecer e por recorrer este caminho segurando a minha mão; obrigada, vida de minha vida.

A minha família, que com suas orações, suas palavras e seu orgulho de mim, alentaram-me para continuar na luta.

Ao professor José Camapum de Carvalho, por estar sempre aberto a compartilhar seu conhecimento, pela confiança que sempre teve em mim e por dar-me a oportunidade de crescer intelectual e pessoalmente com seu ensino.

À professora Ângela Patrícia Santana, pela força e pelos conhecimentos transmitidos na área de microbiologia.

À CAPES (Bolsista da CAPES/CNPq - IEL Nacional – Brasil), pelo apoio econômico para a realização do Doutorado.

À Empresa EMBRE S.A., especialmente a Carlos Medeiros, pelo apoio na primeira etapa da coleta de amostras em campo e ao programa de Pós-graduação em Geotecnia, pela ajuda econômica na segunda etapa.

Ao Fundo de Pesquisa – FUNPE, instituído pelo Decanato de Pesquisa e Pós-Graduação – DPP, no âmbito da UnB, pela ajuda econômica para a compra de insumos e a realização de alguns ensaios da pesquisa.

Ao professor Fernando Araripe e Vitor Pereira pelos valiosos aportes feitos ao trabalho durante sua execução.

Aos professores da Pós-graduação em Geotecnia, pelos conhecimentos transmitidos e, em especial, ao professor Manoel Porfírio Cordão Neto, pela ajuda e confiança, e ao professor Marcio Munis de Farias, pelo ensino constante.

À professora Izabel Cristina Campos e aos técnicos do laboratório de Geotecnia da UnB, Ricardo, Tiago, Alessandro, Vanilson, pela ajuda na parte experimental da pesquisa.

A Hudson e Vinicius do laboratório de veterinária, como a Camila do laboratório de microbiologia dos alimentos da FAV, UnB.

Muito especialmente a Nara Rubia do laboratório de microbiologia de alimentos da FAV, UnB por seu imensurável apoio na área de microbiológica e por sua valiosa amizade.

À FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S.A. e seus funcionários Heliosa Helena, Renato e Renata, pela colaboração nos ensaios de difração de raios X e MEV e sua mão sempre aberta para me ajudar.

À professora Edit Mendes Guimarães do laboratório de difratometria de raios X do Instituto de Geociências, assim como ao laboratório de Geologia da UnB.

A meu amigo e colega Oscar Echeverri, que sempre me apoiou, ajudando e colaborando para o desenvolvimento do trabalho. Ao professor Fabian Hoyos, por seu valioso tempo.

Aos colegas do programa da Pós-graduação em Geotecnia da UnB, que me colaboraram de uma ou outra forma, especialmente ao James, a Ângela, a Claudia, Wisley e o Ludger.

A meus amigos da Colômbia e do Brasil, pelo carinho que me ofereceram em todo momento.

À “Universidad Nacional de Colombia”, pelo apoio ao final do trabalho para terminá-lo com sucesso.

À professora Maria Heloisa C. Fernandes pela ajuda na correção do português.

Ao Brasil e sua gente, por me acolher de braços abertos e fazer-me sentir como em casa.

E finalmente agradeço a todos aqueles que contribuíram direta ou indiretamente para o desenvolvimento desta pesquisa e que não foram citados.

RESUMO

INFLUÊNCIA DA BIOMINERALIZAÇÃO NAS PROPRIEDADES FÍSICO - MECÂNICAS DE UM PERFIL DE SOLO TROPICAL AFETADO POR PROCESSOS EROSIVOS

Autor: Yamile Valencia González

Orientador: José Camapum de Carvalho

Programa de Pós-graduação em Geotecnia

Brasília, julho de 2009

Grande parte dos solos dos países da América do Sul são afetados por processos erosivos, sendo estes considerados como um dos problemas ambientais mais importantes dos últimos anos. Mas, são poucas as pesquisas na área de geotecnia, especificamente, no âmbito da “biotecnologia” ou “bioengenharia”, que procuram, a partir da utilização de microrganismos, melhorar as propriedades geotécnicas e de estabilidade dos solos. Com esse enfoque, foi desenvolvida esta pesquisa, buscando analisar o efeito que tem a aplicação de um nutriente precipitador de carbonato de cálcio sobre a microbiota nativa na mitigação de processos erosivos um perfil de solo tropical.

A metodologia usada nesta pesquisa consistiu na coleta de solo de um perfil localizado a 20m da margem da voçoroca de Santa Maria no Distrito Federal - Brasil. Em tal amostra foram identificadas as bactérias nativas e, posteriormente, determinou-se qual seria o nutriente que melhor induz a precipitação do carbonato de cálcio com essas bactérias. Posteriormente, foram caracterizadas física, química, mineralógica e mecanicamente as amostras de solo natural, para logo adicionar em blocos inalterados do solo o meio nutritivo selecionado de modo a induzir a precipitação de carbonato de cálcio. Após quinze dias de tratamento se realizaram nestes solos tratados, os mesmos ensaios de caracterização feitos nas amostras sem tratamento.

Finalmente, concluiu-se que o uso do nutriente B4 interage com as bactérias do solo, precipitando carbonato de cálcio, o que causa melhoria nas propriedades físicas, químicas, mineralógicas e mecânicas dos solos estudados, mitigando, em termos gerais, os processos erosivos atuantes no perfil. Assim, a técnica de biomineralização através da precipitação de carbonato de cálcio estudada para melhorar as propriedades dos solos, demonstrou ser positiva, o que constitui um avanço na biotecnologia, pois contempla a possibilidade de reduzir o impacto ambiental e econômico causado por outras alternativas.

ABSTRACT

INFLUENCE OF BIOMINERALIZATION ON THE PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF A TROPICAL SOIL PROFILE AFFECTED BY EROSION

Author: Yamile Valencia González
Counselor: José Camapum de Carvalho
Masters degree / Geotechnic Studies
Brasília, July 2009

Large amounts of lands in South American countries are affected by erosive processes. They have been considered one of the most significant environmental problems in the last years. However, few researches on the use of microorganisms to improve geotechnical properties and soil stability have been carried out, especially in the "biotechnology" or "bioengineering" areas. This paper aims to analyze application effects of a nutrient precipitant made of calcium carbonate on native microbiota in order to minimize erosive processes on tropical soils.

The methodology consisted of collecting soil samples from an area 20 meters away from a voçoroca in Santa Maria (Distrito Federal – Brazil). Native bacteria were found in the sample and, eventually, the best nutrient to induce calcium carbonate precipitation was identified. Physical, chemical, mineral, and mechanical data from the natural soil were collected. Then, a previously selected nutritious substrate was applied in unaffected soil blocks to induce calcium carbonate precipitation. After fifteen days, soil characterization tests were accomplished in the soil blocks and in samples without any treatment.

Conclusions showed that the B4 nutrient interacts with the soil bacteria, resulting in calcium carbonate precipitation. That interaction improved physical, chemical, mineral, and mechanical properties of the studied soils, minimizing active erosive processes in the samples. As a result, the biomineralization technique through calcium carbonate precipitation to improve soil properties proved to be effective. Such conclusion is a great progress in the biotechnology field, as it might reduce environmental and economic impacts caused by other techniques.

SUMÁRIO

1 - INTRODUÇÃO	1
1.1 - JUSTIFICATIVA DO TRABALHO	2
1.2 - OBJETIVO GERAL	3
1.3 - OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
1.4 - ESCOPO DO TRABALHO.....	3
2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	6
2.1 - MICROBIOLOGIA DO SOLO	6
2.2 - BIOMINERALIZAÇÃO	11
2.3 - EROSÃO	32
3 - CARACTERÍSTICAS DA ÁREA DE TRABALHO.....	39
4 - MATERIAIS E MÉTODOS.....	46
4.1 - COLETA DE AMOSTRAS EM CAMPO	46
4.2 - CARACTERIZAÇÃO MICROBIOLÓGICA.....	48
4.3 - IDENTIFICAÇÃO DO MELHOR NUTRIENTE PARA INDUZIR PRECIPITAÇÃO DE CARBONATO DE CÁLCIO	59
4.4 - CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO PERFIL	63
4.4.1 - Determinação do teor de umidade	63
4.4.2 - Peso específico dos grãos.....	64
4.4.3 - Granulometria	64
4.5.3.1 - Determinação da granulometria por sedimentação	64
4.5.3.2 - Determinação da granulometria pelo granulômetro laser	65
4.4.4 - Limites de Atterberg	66
4.4.5 - Ensaio Miniatura Compactada Tropical (MCT) expedita	67
4.5 - CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DO PERFIL	70
4.6 - CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA DO PERFIL.....	70
4.7 - CARACTERIZAÇÃO DA ESTRUTURA DO PERFIL	72
4.8 - CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DO PERFIL	73
4.8.1 - Resistência à Compressão simples	73
4.8.2 - Resistência à tração indireta	74
4.8.3 - Sucção total e sucção matricial.....	75

4.8.4 - Resistência ao cisalhamento direto natural e saturado.....	77
4.8.5 - Adensamento duplo edométrico.....	78
4.8.6 - Permeabilidade	81
4.8.7 - “ <i>Pinhole test</i> ” ou furo de agulha	81
4.8.8 - Desagregação	83
5 - APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	86
5.1 - CARACTERIZAÇÃO MICROBIOLÓGICA.....	86
5.2 - IDENTIFICAÇÃO DO MELHOR NUTRIENTE PARA INDUZIR A PRECIPITAÇÃO DO CARBONATO DE CÁLCIO NOS SOLOS DO PERFIL.....	93
5.3 - CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO SOLO.....	97
5.3.1 - Peso específico dos grãos, índice de vazios, saturação e teor de umidade	97
5.3.2 - Granulometria	99
5.3.2.1 - Determinação da granulometria por sedimentação	99
5.3.2.2 - Determinação da granulometria pelo granulômetro laser	105
5.3.3 - Limites de Atterberg	109
5.3.4 - Classificação dos solos.....	113
5.4 - CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DO PERFIL	114
5.5 - CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA DO PERFIL.....	118
5.6 - CARACTERIZAÇÃO DA ESTRUTURA DO PERFIL	127
5.7 - CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DO PERFIL	135
5.7.1 - Resistência à Compressão simples	135
5.7.2 - Resistência à tração indireta	137
5.7.3 - Sucção total e sucção matricial.....	140
5.7.4 - Resistência ao cisalhamento direto natural e saturado.....	144
5.7.5 - Adensamento duplo edométrico.....	146
5.7.6 - Permeabilidade	150
5.7.7 - “ <i>Pinhole test</i> ” ou furo de agulha	152
5.7.8 - Desagregação	154
5.7.9 - Custo estimado para o controle da erosão da voçoroca de Santa Maria	157
5.7.10 - Riscos que devem ser avaliados.....	158

5.7.11 - Conclusão sobre a análise dos resultados.....	158
6 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....	159
6.1 - CONCLUSÕES.....	159
6.2 - SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	163
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	165
 ANEXOS	
1 – CORRELAÇÕES ESTATÍSTICAS.....	176
2 – DIFRATOGRAMAS DE RAIOS X.....	178
3 - IMAGENS NO MEV.....	182

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1- Perfil esquemático da voçoroca de Santa Maria	45
Tabela 4.1 - Classificação MCT expedita.....	69
Tabela 5.1 - Resultados das análises bioquímicas para cada bactéria isolada oriunda do solo a 1m de profundidade do perfil da voçoroca de Santa Maria..	88
Tabela 5.2 - Resultados das análises bioquímicas para cada bactéria isolada oriunda do solo a 2m de profundidade do perfil da voçoroca de Santa Maria.	89
Tabela 5.3 - Resultados das análises bioquímicas para cada bactéria isolada oriunda do solo a 3m de profundidade do perfil da voçoroca de Santa Maria.	90
Tabela 5.4 - Resultados das análises bioquímicas para cada bactéria isolada oriunda do solo a 4m de profundidade do perfil da voçoroca de Santa Maria	90
Tabela 5.5 - Resultados das análises bioquímicas para cada bactéria isolada oriunda do solo a 5m de profundidade do perfil da voçoroca de Santa Maria	91
Tabela 5.6 - Classificação das bactérias presentes no perfil de solo da voçoroca de Santa Maria.	92
Tabela 5.7 - Classificação pelo SUCS e pelo MCT expedita para cada camada de solo do perfil da voçoroca de Santa Maria.....	113
Tabela 5.8 - Resultados da análise química das camadas do perfil de solo da voçoroca da Santa Maria com nutriente (C.N.) e sem nutriente (S.N.)	114
Tabela 5.9 - Porcentagens de precipitados, calculado a partir das imagens tratadas para o perfil de solo da voçoroca de Santa Maria	129
Tabela 5.10 - Parâmetros de coesão (c) e ângulo de atrito (ϕ) a partir do ensaio de resistência ao cisalhamento direto natural e saturado para perfil de solo da voçoroca de Santa Maria	144
Tabela 5.11 - Resultados do ensaio de desagregação sem nutriente para o perfil de solo da voçoroca de Santa Maria.....	154
Tabela 5.12 - Resultados do ensaio de desagregação com nutriente para o perfil de solo da voçoroca de Santa Maria.....	155

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Etapas de vida das bactérias.....	8
Figura 2.2 - Variação mensal na população microbiana (bactérias e actinomicetes x 10 ⁵ e fungos x 10 ³ g ⁻¹ solo seco), evolução do CO ₂ da superfície do solo, temperatura e conteúdo de umidade do solo (1978-1979).....	10
Figura 2.3 - Localização de bactérias em agregados de solo.....	11
Figura 2.4 - Imagem de microscópio eletrônico de varredura, a) Agregado biomineral de estrutura pré-cristalina, b) Biocristais, c) Biocristal maior	15
Figura 2.5 - Imagem em microscópio eletrônico de varredura da precipitação de cristais a partir da concha calcárea do molusco de água doce <i>Physa</i> spp.....	15
Figura 2.6 - Precipitação mineral por <i>Bacillus</i>	16
Figura 2.7 - Temperatura vs produção de bactérias.....	16
Figura 2.8 - Imagem com microscópio ótico, a) Calcita depois de uma semana, b) Calcita depois de 15 dias	17
Figura 2.9 - Imagens em microscópio eletrônico de varredura: a) cristais de calcita formados sobre as partículas de areia, b) detalhe dos cristais apresentados em <i>a</i> na seta, c) aumento da área de <i>b</i> , os cilindros pretos correspondem à bactéria <i>Bacillus pateurii</i> embebidos nos cristais.....	17
Figura 2.10 - Efeito do pH na atividade uréase num <i>Bacillus pasteurii</i>	18
Figura 2.11 - Taxa específica de CaCO ₃ e amônio em relação à concentração bacteriana	18
Figura 2.12 - Bactéria calcificada “cbc”.....	19
Figura 2.13 - Diferenças morfológicas na precipitação de calcita dentro de colônias bacterianas ureásicas	20
Figura 2.14 - Imagem em microscópio eletrônico de varredura do precipitado bacteriano em ambiente marino unindo grãos de areia.....	21
Figura 2.15 - Efeito da concentração de acetato de cálcio na produção de <i>Bacillus amyloquefacie</i> em meio B4	23
Figura 2.16 - Imagens no microscópio ótico, a) Cristais produzidos por <i>Micrococcus</i> spp., b) Cristais produzidos por <i>Bacillus subtilis</i>	24
Figura 2.17 - Estrutura de uma bactéria agregada a um biofilme num solo não saturado ..	25
Figura 2.18 - Princípio de formação de <i>biograout</i> e <i>biosealing</i> em areias	25

Figura 2.19 - Relação entre número de ensaios e permeabilidade, a) Areia, b) Areia argilosa	26
Figura 2.20 - Imagem com lupa binocular dos minerais de carbonato de cálcio recuperados de tamanhos aproximados de 0,45µm	27
Figura 2.21 - Esquema do ensaio na coluna de areia.....	29
Figura 2.22 - Conteúdo de cálcio e resistência ao longo da coluna de areia.....	30
Figura 2.23 - Variação da permeabilidade ao longo da coluna de areia.....	30
Figura 2.24 - Conteúdo de cálcio e decréscimo da porosidade ao longo da coluna de areia.....	31
Figura 2.25 - Formação de sulcos, ravinas e voçorocas	36
Figura 3.1 - Mapa de localização do perfil de estudo.....	39
Figura 3.2 - Localização da voçoroca de Santa Maria dentro do mapa geológico do Distrito Federal	41
Figura 3.3 - Localização da voçoroca de Santa Maria dentro do mapa pedológico do Distrito Federal.....	42
Figura 3.4 - Localização da voçoroca de Santa Maria dentro do mapa geomorfológico do Distrito Federal.....	43
Figura 3.5 - Localização da voçoroca de Santa Maria dentro do mapa de modelo numérico altimétrico do Distrito Federal	43
Figura 3.3 - Voçoroca de Santa Maria.....	44
Figura 4.1 - Croqui em planta da retirada de amostras da voçoroca de Santa Maria	46
Figura 4.2 - Imagem coleta de amostras com ajuda do trado manual	47
Figura 4.3 - Coleta de blocos.....	48
Figura 4.4 - Esquema do método de diluição para isolamento das bactérias.....	49
Figura 4.5 - Jarra de anaerobiose.....	49
Figura 4.6 - Prova coloração por Gram	50
Figura 4.7 - Prova de catalase.....	51
Figura 4.8 - Prova de oxidase	52
Figura 4.9 - Prova positiva em ágar MacConkey	52
Figura 4.10 - Prova de TSI	53
Figura 4.11 - Prova de oxidação/Fermentação.....	54
Figura 4.12 - Prova com Indol.....	54
Figura 4.13 - Produção de Urease	55

Figura 4.14 - Prova redução de Nitrato	56
Figura 4.15 - Prova positiva de descarboxilasis e de deshidrolasis de aminoácidos.....	56
Figura 4.16 - Prova de hidrólise da gelatina.....	57
Figura 4.17 - Prova do Vermelho de Metila.....	57
Figura 4.18 - Utilização do citrato.....	58
Figura 4.19 - Prova de motilidade	59
Figura 4.20 - a) Placas de petri com o nutriente B4 e com o nutriente com uréia, b) incubação das bactérias.....	60
Figura 4.21 - Placas com nutriente B4 com bactérias repicadas após 15 dias.....	61
Figura 4.22 - Adição do meio B4 nos blocos de solo do perfil da voçoroca de Santa Maria	62
Figura 4.23 - Amostra de solo secada na estufa para determinação do teor de umidade	63
Figura 4.24 - Equipamento para determinação do peso específico dos grãos.....	64
Figura 4.25 - Ensaio de granulometria.....	65
Figura 4.26 - Ensaio de granulometria no granulômetro laser da UnB.....	66
Figura 4.27 - a) Ensaio para determinar o limite de liquidez, b) Ensaio para determinar o limite de plasticidade.....	67
Figura 4.28 - Secagem ao ar de pastilhas e bolinhas de solo para o ensaio MCT expedita	68
Figura 4.29 - Penetração das pastilhas com o penetrômetro	68
Figura 4.30 - Difratorômetro de raios X do Laboratório de Mecânica das Rochas da Divisão de Geotecnia de FURNAS	71
Figura 4.31 - a) Microscópio eletrônico de varredura, b) Metalização de amostra para ser analisada no microscópio eletrônico de varredura.....	73
Figura 4.32 - Ensaio de resistência à compressão simples	74
Figura 4.33 - Ensaio de resistência à tração indireta	74
Figura 4.34 - Disposição dos papeis filtros e da membrana impermeável na amostra para a medida da sucção total e matricial.....	76
Figura 4.35 - Ensaio de sucção total e matricial.....	77
Figura 4.36 - Ensaio de resistência ao cisalhamento direto.....	78
Figura 4.37 - Corte transversal esquemático da célula "Rowe"	79
Figura 4.38 - Ensaio de adensamento na célula "Rowe".....	79
Figura 4.39 - Ensaio adensamento na célula "Rowe" em condição inundada	80
Figura 4.40 - Montagem ensaio de permeabilidade	81

Figura 4.41 - Ensaio de “ <i>Pinhole test</i> ”	82
Figura 4.42 - Resultados ensaio do “ <i>Pinhole test</i> ”.....	83
Figura 4.43 - Ensaio de desagregação.....	84
Figura 5.1 - Isolados bacterianos em ágar sangue para as diferentes profundidades do perfil de solo da voçoroca de Santa Maria	86
Figura 5.2 - Análises bioquímicas a 5m de profundidade do perfil de solo da voçoroca de Santa Maria.....	87
Figura 5.3 - Imagens em lupa eletrônica de alta resolução dos precipitados bacterianos nos meios B4 e com uréia para a camada de solo a 4m de profundidade com uma bactéria <i>Bacillus</i> spp.....	93
Figura 5.4 - Placas de petri com os dois meios testados (B4 e com uréia) para a camada a 4m de profundidade com uma bactéria <i>Bacillus</i> spp.....	94
Figura 5.5 - Precipitados bacterianos nos meios B4 e com uréia para a bactéria <i>Bacillus</i> spp. oriunda da camada de solo a 3m de profundidade. Imagem no microscópio petrográfico	95
Figura 5.6 - Precipitados bacterianos no porta-amostras para análise no microscópio eletrônico de varredura	96
Figura 5.7 - Precipitados bacterianos nos meios B4 e com uréia a 3m de profundidade com uma bactéria <i>Bacillus</i> spp. no microscópio eletrônico de varredura.....	96
Figura 5.8 - Variação em profundidade dos índices físicos do perfil de solo da voçoroca de Santa Maria sem adição e com a adição do nutriente B4	97
Figura 5.9 - Umidade – peso específico aparente seco dos sólidos para o perfil de solo da voçoroca de Santa Maria.	98
Figura 5.10 - Curvas granulométricas por sedimentação sem nutriente (S.N), com nutriente (C.N.), sem defloculante (S.D.), com defloculante (C.D.) para o perfil de solo da voçoroca de Santa Maria.	100
Figura 5.11 - Imagens lupa eletrônica com luz natural das partículas produto da sedimentação na amostra a 5m de profundidade sem nutriente e com nutriente, perfil da voçoroca de Santa Maria, a partir do microscópio de alta resolução.....	101
Figura 5.12 - Granulometria por sedimentação, amostras secas ao ar e úmidas, sem (S.N.) e com nutriente (C.N.), sem (S.D.) e com defloculante (C.D.), para o perfil de solo da voçoroca de Santa Maria	102

Figura 5.13 - Granulometria por sedimentação, amostras úmidas, sem nutriente (S.N.), com 24 horas de nutriente e com 15 dias com nutriente (C.N.), sem (S.D.) e com defloculante (C.D.), para o perfil de solo da voçoroca de Santa Maria	104
Figura 5.14 - Granulometria a laser sem (S.U.) e com ultrassom (C.U.), sem (S.D.) e com defloculante (C.D.) para as amostras do perfil de solo da voçoroca da Santa Maria sem nutriente (S.N.).....	105
Figura 5.15 - Granulometria a laser sem (S.U.) e com ultrassom (C.U.), sem (S.D.) e com defloculante (C.D.) para as amostras do perfil de solo da voçoroca da Santa Maria com nutriente (C.N.).....	106
Figura 5.16 - Curvas granulométricas pelo granulômetro laser sem defloculante (S.D), com defloculante (C.D), sem ultrassom (S.U), com ultrassom (C.U), para o perfil de solo da voçoroca de Santa Maria sem nutriente (S.N) e com nutriente (C.N.).....	107
Figura 5.17 - Variação dos agregados totais no perfil de solo da voçoroca de Santa Maria.....	108
Figura 5.18 - Variação do teor de agregação no perfil da voçoroca de Santa Maria.....	108
Figura 5.19 - Agregados totais (A.T.) amostras úmidas, sem nutriente, com 24 horas de nutriente e com 15 dias com nutriente, para o perfil de solo da voçoroca de Santa Maria	109
Figura 5.20 - Variação do w_L e I_p com a profundidade para o perfil de solo da voçoroca de Santa Maria.....	110
Figura 5.21 - Variação do w_L e I_p com a profundidade em estado úmido para o perfil de solo da voçoroca de Santa Maria.....	110
Figura 5.22 - Análise comparativa entre os resultados desta pesquisa e os obtidos por Camapum de Carvalho (1985) quanto à influência do carbonato de cálcio na plasticidade	111
Figura 5.23 - Atividade, segundo Skempton, nos solos do perfil de solo da voçoroca de Santa Maria	112
Figura 5.24 - Atividade, segundo a EMBRAPA (1999), nos solos do perfil de solo da voçoroca de Santa Maria.....	112
Figura 5.25 - Contração pele método MCT expedita com a porcentagem de finos dos solos do perfil da voçoroca de Santa Maria.....	114
Figura 5.26 - Propriedades químicas para os solos do perfil da voçoroca Santa Maria....	116

Figura 5.27 - Variações do teor de cálcio com algumas propriedades químicas no perfil de solo da voçoroca de Santa Maria	117
Figura 5.28 - Variações do índice de plasticidade com a acidez do perfil de solo da voçoroca de Santa Maria	118
Figura 5.29- Difratoograma de raios X para 1m de profundidade sem nutriente para o perfil da voçoroca de Santa Maria	119
Figura 5.30 - Difratoograma de raios X para 2m de profundidade sem nutriente para o perfil da voçoroca de Santa Maria.....	119
Figura 5.31 - Difratoograma de raios X para 3m de profundidade sem nutriente para o perfil da voçoroca de Santa Maria	120
Figura 5.32 - Difratoograma de raios X para 4m de profundidade sem nutriente para o perfil da voçoroca de Santa Maria.	120
Figura 5.33 - Difratoograma de raios X para 5m de profundidade sem nutriente para o perfil da voçoroca de Santa Maria.....	121
Figura 5.34 - Difratoograma de raios X para 1m de profundidade com nutriente para o perfil da voçoroca de Santa Maria	121
Figura 5.35 - Difratoograma de raios X para 2m de profundidade com nutriente para o perfil da voçoroca de Santa Maria.....	122
Figura 5.36 - Difratoograma de raios X para 3m de profundidade com nutriente para o perfil da voçoroca de Santa Maria	122
Figura 5.37 - Difratoograma de raios X para 4m de profundidade com nutriente para o perfil da voçoroca de Santa Maria.	123
Figura 5.38 - Difratoograma de raios X para 5m de profundidade com nutriente para o perfil da voçoroca de Santa Maria.....	123
Figura 5.39 - Intensidade dos picos principais dos diferentes minerais em profundidade para as amostras sem nutriente no perfil de solo da voçoroca de Santa Maria.....	124
Figura 5.40 - Intensidade dos picos principais dos diferentes minerais em profundidade para as amostras com nutriente do perfil de solo da voçoroca de Santa Maria.....	124
Figura 5.41 - Teste com o ácido clorídrico.....	125
Figura 5.42 - Correlação entre propriedades físicas e a soma dos picos dos oxi-hidróxidos de Fe e Al para o perfil de solo da voçoroca de Santa aria.....	126

Figura 5.43 - Correlação entre a Capacidade de Troca Catiônica e os minerais de carbonato de cálcio dos solos do perfil da voçoroca de Santa Maria.....	127
Figura 5.44 - Imagens na lupa de alta resolução com luz natural da estrutura das camadas de solo sem e com nutriente do perfil da voçoroca de Santa Maria.....	128
Figura 5.45 - Tratamento da imagem obtida com a lupa eletrônica de alta resolução para a amostra com nutriente a 3m de profundidade para a voçoroca de Santa Maria.....	129
Figura 5.46 - Imagens no MEV das diferentes camadas de solo sem nutriente do perfil de solo da voçoroca de Santa Maria.....	131
Figura 5.47 - Imagens no MEV das diferentes camadas de solo com nutriente do perfil de solo da voçoroca de Santa Maria	133
Figura 5.48 - Imagens no MEV para duas profundidades no solo com nutriente do perfil da voçoroca de Santa Maria, mostrando a agregação dos grãos causada pelo tratamento	134
Figura 5.49 - Imagens no MEV para quatro profundidades no solo com nutriente do perfil da voçoroca de Santa Maria, mostrando os minerais formados com o tratamento.....	134
Figura 5.50 - Tratamento de imagem do MEV para a amostra com nutriente a 3m de profundidade para a voçoroca de Santa Maria	135
Figura 5.51 - Variação da resistência à compressão simples com a profundidade no perfil de solo da voçoroca de Santa Maria	136
Figura 5.52 - Variação da resistência à compressão simples com a umidade no perfil de solo da voçoroca de Santa Maria.....	137
Figura 5.53 - Variação da resistência à compressão simples com a sucção para o perfil de solo da voçoroca de Santa Maria.....	137
Figura 5.54 - Variação da resistência à tração indireta com a umidade para o perfil de solo da voçoroca de Santa Maria.....	138
Figura 5.55 - Variação da coesão total com a umidade para o perfil de solo da voçoroca de Santa Maria	139
Figura 5.56 - Variação da sucção matricial e total com a umidade para o perfil de solo da voçoroca de Santa Maria.....	140
Figura 5.57 - Variação da sucção matricial e total com a saturação para o perfil de solo da voçoroca de Santa Maria.....	141

Figura 5.58 - Variação do índice de vazios dos macro e micro-poros x sucção (pF) com a saturação para o perfil de solo da voçoroca de Santa Maria.....	143
Figura 5.59 - Variação da resistência ao cisalhamento natural e saturada (τ) com o esforço (σ) para o perfil de solo da voçoroca de Santa Maria.....	145
Figura 5.60 - Variação do índice de vazios com a tensão no ensaio duplo edométricos para o perfil de solo da voçoroca de Santa Maria	148
Figura 5.61 - Variação do índice de colapso com a tensão para as amostras sem nutriente e com nutriente do perfil de solo da voçoroca de Santa Maria	150
Figura 5.62 - Variação da permeabilidade com a profundidade do perfil de solo da voçoroca de Santa Maria	151
Figura 5.63 - Variação da permeabilidade com o índice de vazios para o perfil de solo da voçoroca de Santa Maria.....	151
Figura 5.64 - Variação da permeabilidade com o índice de vazios inter-agregado para o perfil de solo da voçoroca de Santa Maria	152
Figura 5.65 - Variação da vazão com o gradiente hidráulico para as amostras sem nutriente e com nutriente do perfil de solo da voçoroca de Santa Maria	153
Figura 5.66 - Imagens ensaios de desagregação após 24 horas de imersão (com inundação parcial e total) nos solos sem nutriente e com nutriente para o perfil de solo da voçoroca de Santa Maria	157

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACÕES

Å	Ångstrom
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Al	Alumínio
ASTM	American Society for Testing and Materials
A.T.	Agregados Totais
B	<i>Bacillus</i>
B4	Meio nutriente formado por acetato de cálcio, extrato de levedura, glicose
c	Coesão
Ca	Cálcio
CaCl ₂	Cloreto de cálcio
CaCO ₃	Carbonato de cálcio
CaSO ₄ .2H ₂ O/CaSO ₄	Gibso
CB	<i>Cocos Bacillus</i>
CD	Com defloculante
CODEPLAN	Companhia de Planejamento do Distrito Federal.
cm	Centímetros
CN	Com nutriente
CO	Carbono
CO ₂	Dióxido de carbono
CO ₃ ⁻²	Carbonato
Cos	Coseno
ct	Contração
CTC	Capacidade de troca catiônica
CU	Com ultrassom
c'	Constante para classificação MCT
D	Diâmetro
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem.
e _{int}	Índice de vazios inter-agregado
e _{inundado}	Índice de vazios inundado final do solo para uma determinada tensão aplicada

e_0	Índice de vazios inicial
e_{nat}	Índice de vazios natural final do solo para uma determinada tensão aplicada
$e_{oinundado}$	Índice de vazios inundado inicial do solo para uma determinada tensão aplicada
e_{onat}	Índice de vazios natural inicial do solo para uma determinada tensão aplicada
$e_{omédio}$	Índice de vazios inicial médio do solo
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
<i>et al.</i>	e outros
FAV	Faculdade de Alimentos e Medicina Veterinária
FeS_2	Pirita
g	Gramas
G	Módulo cisalhante
h	Hora
HCO_3^{-1}	Bicarbonato em água
H_2O	Água
H_2S	Sulfeto de hidrogênio
i	Índice de Colapso
I_p	Índice de plasticidade
K	Potássio
KCl	Cloreto de potássio
kg	Quilograma
KOH	Hidróxido de potássio
kPa	Quilo Pascal
kV	Quilo volts
L	Espessura
m	Metros
M	Molécula
MCT	Miniatura Compactada Tropical
MEV	Microscópio eletrônico de varredura
Mg	Magnésio
mA	Mili ampéres

min	Minuto
ml	Mililitro
mm	Milímetro
mM	Mil molaes
MN	Meio nutriente
MO	Matéria Orgânica
Na	Sódio
N ₂	Nitrogênio
NaHCO ₃	Bicarbonato de sódio
NaOH	Hidróxido de sódio
NBR	Norma Brasileira
NH ₄ Cl	Cloreto de amônio
N ₂	Nitrogênio
nM	Nanômolaes
N°	Número
O ₂	Oxigênio
P	Carga
pF	Logaritmo da sucção em coluna da água
p _f	Esforço último na direção p
q _f	Esforço último na direção q
Sat	Saturado
S	Sul
SD	Sem defloculante
seg	Segundos
SN	Sem nutriente
SU	Sem ultrassom
SUCS	Sistema Unificado de Classificação de Solos
T.A.	Teor de Agregação
Tan	Tangente
TFSA	Terra Fina Seca ao Ar
UFC	Unidades formadoras de colônia
UnB	Universidade de Brasília
W	Oeste

w	Umidade
w _p	Limite de plasticidade
w _L	Limite de liquidez
w _s	Limite de contração
x	Aumentos
μM	Micro molares
μm	Micro metros
%	Porcentagem
σ _t	Resistência à tração
Φ	Ângulo de atrito
τ	Resistência ao cisalhamento
σ	Esforço vertical
→	Carga
←	Descarga
°	Graus
°C	Graus celsius

1 – INTRODUÇÃO

Os solos tropicais são solos influenciados, dentre outros, por fatores climáticos, geológicos, hidrológicos e pela própria ação humana (Lima, 2003), gerando uma extensa variedade de perfis com uma ampla diferença em suas propriedades geológico-geotécnicas, que favorece a ocorrência de fenômenos erosivos. São poucos os estudos já realizados que buscam relacionar as características químicas e mineralógicas com os processos de degradação e comportamento mecânico dos solos e, menos ainda as pesquisas na área da geotecnia no âmbito da “biotecnologia” ou “bioengenharia”, que procuram, a partir da utilização de microrganismos, melhorar as propriedades geotécnicas e de estabilidade dos solos. Lima (2003), estudando ravinas e voçorocas do Distrito Federal, mostrou que o mecanismo de evolução das erosões está muitas vezes associado à degradação físico-química do maciço junto aos taludes, o que realça a importância da melhoria do solo nesses casos.

A maioria dos estudos em biotecnologia foram enfocados ao entendimento do comportamento das bactérias, sua interação com muitos dos minerais presentes na natureza, ou sua aplicação na descontaminação de solos, aproveitamento de recursos hidráulicos, e restauração de esculturas (Tiano *et al.*, 1999). Mas, em geral, poucas são as pesquisas em relação à influência que têm as bactérias no comportamento dos solos quanto às propriedades desde o ponto de vista da engenharia (Martinez *et al.*, 2003). Assim, esta é uma oportunidade enorme de aplicar todos os conhecimentos obtidos em outras áreas relacionadas às bactérias, para dar solução aos problemas de engenharia, empregando técnicas como a biomineralização induzida, onde se gera um mineral pela estimulação por meio de um nutriente da população bacteriana.

Uma das vantagens e virtudes desta linha de pesquisa é a necessidade de o pesquisador trabalhar em um grupo multidisciplinar com variedade de profissionais (microbiólogos, geólogos, etc.) para, combinando os conhecimentos das áreas relacionadas, obter uma proposta mais adequada para a solução do problema.

Motivados por uns poucos trabalhos realizados no mundo sobre bioestabilização, nos quais se pretendia melhorar as propriedades dos solos arenosos com a adição de um meio

nutriente, que continha uma bactéria calcificante (Whiffin *et al.*, 2005), e pelos trabalhos feitos pelo grupo de pesquisa BACEST (“*Bactérias Estructurales*”) na Colômbia, onde por meio da adição de algumas bactérias calcificantes no solo, foi melhorada a resistência, permeabilidade e rigidez dos mesmos, decidiu-se estudar a possibilidade de estabilização de taludes junto à voçorocas, utilizando as próprias bactérias nativas presentes no solo, visando mitigar os processos erosivos e melhor a qualidade de vida dos habitantes residentes nas áreas afetadas por estes processos.

Destaca-se que o uso destas técnicas biotecnológicas não tem ocorrido no Brasil para fins de engenharia, daí o caráter inovador da pesquisa, a qual permitirá um avanço no desenvolvimento tecnológico do país.

A técnica de estudo consiste na estimulação por meio de um nutriente que induz a precipitação de carbonato de cálcio por microrganismos nativos do solo, para melhorar os parâmetros físicos e mecânicos de um perfil de solo tropical afetado pela erosão. Isto permitirá um avanço no desenvolvimento biotecnológico, que se traduz numa redução significativa do impacto econômico, ambiental e, conseqüentemente, numa melhoria da qualidade de vida dos habitantes.

Cabe ressaltar que, do ponto de vista ambiental, o uso das bactérias, mesmo se tratando de microrganismos nativos, deve ser estudado com maior profundidade para prever e determinar com precisão o impacto ambiental que poderia ocasionalmente causar o uso do nutriente na microbiota do solo.

1.1 – JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

Grande parte dos países de América do Sul se encontra afetados por problemas de degradação e erosão dos solos em áreas agrícolas e urbanas, sendo considerado um dos problemas ambientais mais importantes dos últimos anos. O Distrito Federal não escapa disto, apresentando solos bastante agredidos pelos processos erosivos.

Na maioria das vezes, quando se iniciam os processos erosivos, sua estabilização natural pode demorar a ocorrer, o que implicaria em grandes danos materiais (Martines *et al.*,

2006). Para prevenir, cessar ou recuperar estes processos de maneira mais rápida são usados controles, que em muitos casos têm custos altos ou causam um impacto ambiental nem sempre desprezível. Nesta pesquisa, para diminuir estes efeitos se propõe o uso da técnica de biomineralização induzida, a qual, além de ser uma técnica inovadora que permitirá o avanço no desenvolvimento biotecnológico, possibilitará uma redução significativa do impacto econômico e ambiental, oferecendo ao geotecnista a possibilidade de interatuar em áreas diferentes, combinando os conhecimentos para a solução de problemas de engenharia.

1.2 - OBJETIVO GERAL

Estudar o melhoramento das propriedades físicas e mecânicas de um perfil de solo tropical afetado pela erosão, por meio da aplicação, na microflora nativa, de um nutriente precipitador de carbonato de cálcio.

1.3 – OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos desta pesquisa são:

- Identificar as bactérias nativas existentes num perfil de solo tropical afetado pela erosão.
- Testar e selecionar o melhor nutriente precipitador de carbonato de cálcio para interatuar com as bactérias nativas do solo em estudo.
- Caracterizar física, química, mineralógica e mecanicamente o perfil de solo tropical afetado pela erosão.
- Caracterizar física, química, mineralógica e mecanicamente solos extraídos do perfil, após a adição do melhor nutriente precipitador de carbonato de cálcio.
- Estudar a mudança nas propriedades do solo e a mitigação do processo erosivo no perfil pela adição do nutriente precipitador de carbonato de cálcio.

1.4 – ESCOPO DO TRABALHO

Esta tese se dividiu em nos seguintes tópicos:

- **CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO**

Neste capítulo se apresenta uma introdução ao problema e se justifica o motivo pelo qual é desenvolvida a pesquisa. Adicionalmente, são apresentados o objetivo geral e os específicos.

- **CAPÍTULO 2: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

O capítulo de revisão bibliográfica aborda três temas fundamentais para o entendimento da pesquisa, que são a microbiologia do solo, a biomineralização e a erosão.

- **CAPÍTULO 3: CARACTERÍSTICAS DA ÁREA DE TRABALHO**

Apresenta-se neste capítulo, de forma sucinta, o contexto geológico e geomorfológico da área onde se localiza o perfil de solo estudo.

- **CAPÍTULO 4: MATERIAIS E MÉTODOS**

É apresentada neste capítulo a forma como se desenvolveu a coleta das amostras de campo, os materiais e os procedimentos utilizados para a execução dos ensaios desenvolvidos na pesquisa.

- **CAPÍTULO 5: APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS**

Neste capítulo é feita a apresentação e as análises dos resultados da caracterização microbiológica, definição do melhor nutriente precipitador e, a caracterização física, química, mineralógica e mecânica do perfil de solo sem e com tratamento.

- **CAPÍTULO 6: CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS**

São apresentadas neste capítulo, as conclusões finais da pesquisa, baseadas nas análises feitas no capítulo 5. Adicionalmente, são apresentadas sugestões para pesquisas futuras.

Finalmente, são mostradas as referências bibliográficas utilizadas no decorrer do trabalho, assim como os anexos.

2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O marco conceitual desta investigação se desenvolverá em três partes essenciais que servirão como base para um melhor entendimento dos resultados da pesquisa. Os tópicos tratados serão: Microbiologia do solo, Biomineralização e Erosão.

2.1 - MICROBIOLOGIA DO SOLO

Para o entendimento dos processos de biomineralização, é importante o estudo dos microorganismos, suas características e as variáveis que exercem influência neles.

As pesquisas com microrganismos tiveram início em 1673, com Van Leeuwenhoek, mas, segundo Zilli *et al.* (2003), somente ganharam impulso em 1857, com os estudos de Louis Pasteur. Entretanto, a microbiologia do solo só teve sua primeira grande contribuição no final do século XIX por Beijerinck, com o isolamento de estirpes de rizóbio. Até pouco tempo atrás, a detecção e identificação de microrganismos em amostras ambientais eram realizadas utilizando meios de cultura. No entanto, qualquer meio de cultura é, em maior ou menor grau, seletivo para um ou outro grupo de microrganismo. Na última década, métodos moleculares de análise da estrutura e diversidade microbiana, utilizando DNA genômico extraído diretamente de amostras ambientais, têm permitido um avanço considerável no estudo da ecologia de microrganismos.

O estudo da microbiota do solo é tão vasto quanto desconhecido, devido ao fato de o solo ser um habitat extremamente peculiar em relação a outros habitats terrestres, por sua natureza heterogênea, complexa e dinâmica.

Os cinco grupos principais de microrganismos presentes no solo são: as bactérias, actinomicetos, fungos, algas e protozoários. As bactérias sobressaem, de maneira especial, pois formam o grupo de microrganismos de maior abundância e diversidade entre as espécies. A comunidade bacteriana é estimada em cerca de 10^8 a 10^9 organismos por grama de solo. Em solos arejados adequadamente predominam bactérias e fungos, enquanto que nos ambientes microaerófilos ou anaeróbios, as bactérias são unicamente as responsáveis por quase todas as mudanças químicas e biológicas (Cardoso *et al.*, 1992).

As bactérias do solo podem-se dividir em dois grandes grupos: as espécies nativas ou *autóctones*, que são residentes verdadeiros e os organismos invasores ou *alóctones*. As populações nativas participam nas funções bioquímicas da comunidade bacteriana do solo, enquanto os alóctones não participam de maneira significativa (Peña, 1980).

De acordo com a capacidade de crescimento em ausência de oxigênio é possível diferenciar também três categorias distintas de bactérias: *aeróbias*, as quais requerem O₂; *anaeróbias*, que crescem só em ausência de O₂, e *anaeróbias facultativas*, as quais se desenvolvem tanto em ausência como em presença de O₂ (Cardoso *et al.*, 1992).

A morfologia celular é outra característica de classificação das bactérias. Entre os principais tipos morfológicos estão os Bacillus ou bactérias em forma de bastonete, que são os mais numerosos, os Cocos ou bactérias com forma esférica e os Espirilos com forma de espiral (Cardoso *et al.*, 1992).

Outro aspecto que permite caracterizar as bactérias é através de sua reação à coloração de Gram. Quando a parede celular tem uma camada espessa de peptidoglicanos, as células se tingem de cor púrpura ou azul quando fixadas com violeta-cristal (uma preparação conhecida como técnica de Gram), e se denominam de bactérias "Gram-positivas". As "Gram-negativas" se tingem de vermelho com a técnica de Gram, por conterem uma camada de lipídios no exterior da parede celular, então sua parede celular é composta por uma camada de peptidoglicanos e lipídios que ficam mais externos, por isso na hora da coloração há uma diferenciação, pois durante o processo de coloração o lipídio dissolve e solta a cor do cristal violeta, dando-lhe apenas a coloração vermelha (Wikipédia, 2009).

As bactérias dos solos apresentam uma elevada taxa de crescimento e alta capacidade de decomposição dos diferentes substratos contidos no solo, exercendo um importante papel na decomposição da matéria orgânica e na ciclagem dos elementos. Nos solos, também estão presentes bactérias *fotossintetizantes*, responsáveis pela produção de matéria orgânica através da utilização de energia luminosa. As bactérias *diazotróficas* são as que têm a capacidade de fixar o nitrogênio molecular (N₂) presente na atmosfera e as *quimiolitotróficas* são capazes de oxidar compostos minerais de nitrogênio e enxofre como

também de fixar CO₂, obtendo, dessa forma, energia e carbono necessário para seu desenvolvimento (Cardoso *et al.*, 1992).

Do ponto de vista nutricional, as bactérias podem ser divididas em duas grandes classes fisiológicas dependendo da forma de obtenção de fontes de energia para a realização de suas atividades vitais: as bactérias autótrofas e as bactérias heterótrofas. As bactérias autótrofas são capazes de produzir seu próprio alimento e podem ser fotossintetizantes ou quimiolitotróficas. As heterótrofas se alimentam de uma fonte externa, podendo-se alimentar de matéria orgânica ou de animais e plantas (www.enq.ufsc.br/labs, 2009).

O crescimento bacteriano desenvolve-se basicamente em quatro etapas, como se apresenta na Figura 2.1 (Cardona & Usta, 2002):

- Etapa de latência: etapa onde a bactéria não apresenta crescimento, sendo a fase de adaptação;
- Etapa de crescimento exponencial: caracteriza-se pela multiplicação sucessiva de bactérias;
- Etapa estacionária: quando mais e mais células competem por alimento e nutrientes, o crescimento pára e o número de bactérias se estabiliza;
- Etapa de morte: é quando ocorrem os dejetos tóxicos, o alimento é escasso e as células morrem numa velocidade maior que a divisão.

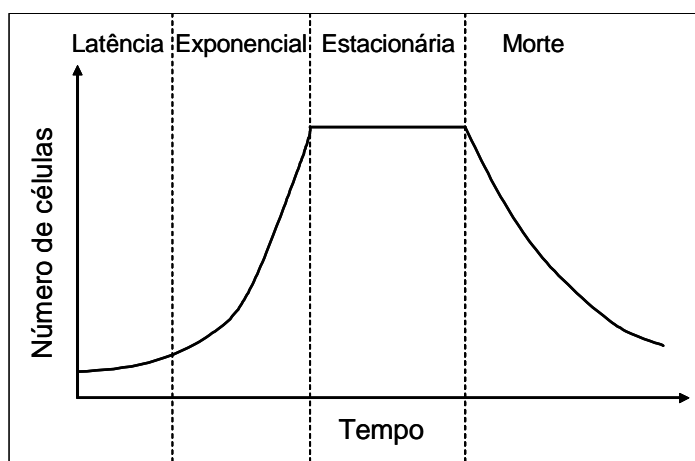


Figura 2.1. Etapas de vida das bactérias (Modificado de Gómez, 2006).

Existem variáveis que exercem influência sobre as bactérias do solo, encontram-se entre elas, a umidade, aeração, temperatura, matéria orgânica, acidez e presença de nutrientes

inorgânicos. Outras variáveis tais como os plantios, a estação do ano e a profundidade têm significado, mas sua influências provêm das combinações dos principais determinantes (Peña, 1980).

A umidade ótima para as diferentes atividades metabólicas varia entre os tipos de solo, teor de argila, grupos de microrganismos, vegetação, etc.. Este teor de umidade afeta o suprimento de oxigênio e, como já foi descrito, de acordo com a disponibilidade de oxigênio se apresentam condições ótimas para o crescimento das diferentes bactérias aeróbias, anaeróbias e facultativas (Brandy, 1979).

A aeração e a umidade estão inversamente relacionadas, pelo movimento e substituição do ar e da água (Peña, 1980).

Quanto à temperatura, cada microrganismo tem uma temperatura de crescimento ótima e um intervalo no qual o crescimento se detém. O intervalo de temperatura ótima serve para definir três grupos microbianos. Os *mesófilos* com temperatura ótima de crescimento entre 25° e 40°C, a este grupo pertencem a maioria das bactérias, actinomicetes e fungos que vivem no solo. Certas espécies se desenvolvem melhor em temperaturas menores que 20°C denominando-se *psicrófilos*, pertencem a este grupo os bastonetes Gram-negativos. Os *termófilos* são os que apresentam a taxa de crescimento máxima a 45°C, sendo a mínima da ordem de 35°C a 40°C, não são muito abundantes nos solos, dependendo do teor de matéria orgânica, pertencem a este grupo os microrganismos que crescem em pilhas de compostagem. E os *termófilos facultativos* que se desenvolvem bem numa ampla faixa de temperatura, variando desde 28°C até 56°C (Cardoso *et al.*, 1992).

Segundo Moreira & Siqueira (2002), as variações sazonais de temperatura e umidade afetarão as comunidades biológicas do solo e sua atividade (Figura 2.2). Geralmente potencial hídrico (composto do potencial matricial: água atraída por superfícies sólidas e do potencial osmótico: água em solução do solo) de 0,01MPa é ótimo para a atividade microbiana. Em baixos potenciais hídricos a maioria das bactérias, dos protozoários e das microalgas é inativa, enquanto leveduras e fungos filamentosos continuam seu metabolismo. Isto porque a combinação do potencial matricial e do potencial osmótico

determina o estresse sofrido por um organismo para obter água para sua atividade e crescimento.

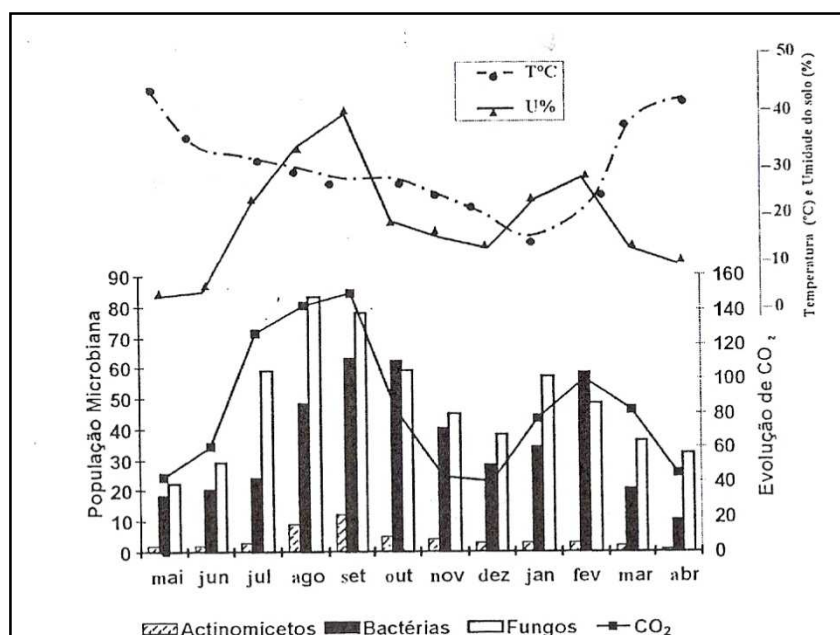


Figura 2.2. Variação mensal na população microbiana (bactérias e actinomicetos x 10⁵ e fungos x 10³ g⁻¹ solo seco), evolução do CO₂ da superfície do solo, temperatura e conteúdo de umidade do solo (1978-1979), (Rai & Srivastava, 1981 apud Moreira & Siqueira, 2002).

O principal problema da acidez do solo está na concentração de íons de hidrogênio e alumínio que provocam o aparecimento de elementos tóxicos não aptos para algumas bactérias. Outros problemas são a deficiência de cálcio, fósforo e molibdênio e as quantidades excessivas de manganês (Moreira & Siqueira, 2002).

A ação do pH sobre os microrganismos do solo depende da sua tolerância a esse fator. Distinguem-se quatro categorias de microrganismos segundo Cardoso *et al.* (1992), quais sejam: a) as *indiferentes*, que crescem numa faixa ampla de valores de pH; neste grupo se encontram numerosas bactérias, as quais apresentam crescimento mais satisfatório entre valores de pH 6 a 9. Para os fungos os valores variam entre pH 2 a 8; b) os *neutrófilos*, que preferem um pH próximo à neutralidade até ligeiramente alcalino. Numerosos actinomicetos não apresentam crescimento em valores de pH inferiores a 5,5. As cianobactérias e diatomáceas preferem ambientes alcalinos; c) os *acidófilos* que preferem ambientes francamente ácido; e, finalmente, d) os *basófilos*, que não suportam valores de pH inferiores a 8 (Brandy, 1979).

A atividade que os microrganismos desempenham nos solos pode estar intimamente relacionada à estrutura do mesmo. Devido ao tamanho semelhante dos microrganismos, principalmente das células bacterianas e as partículas de argila, existe a possibilidade de adesão ou ligação das partículas de argila às células microbianas. A natureza dessa adesão é principalmente química e mediada por substâncias cimentantes (Figura 2.3).

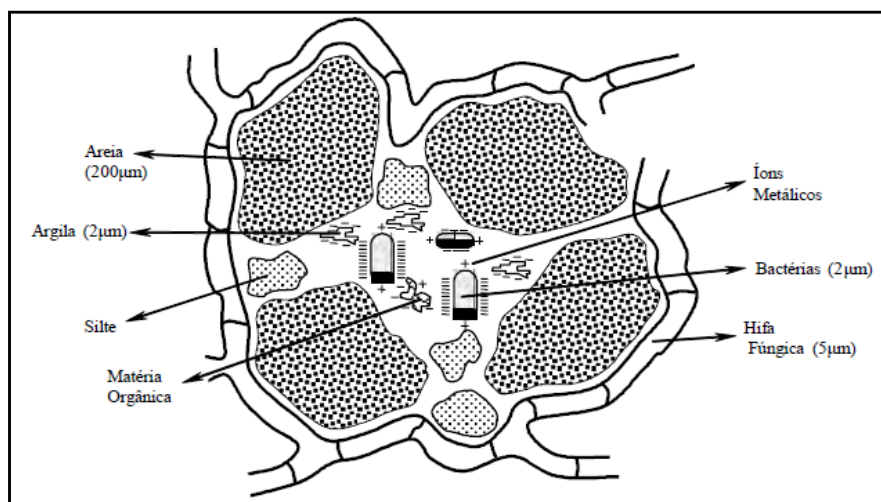


Figura 2.3. Localização de bactérias em agregados de solo (Moreira & Siqueira, 2002).

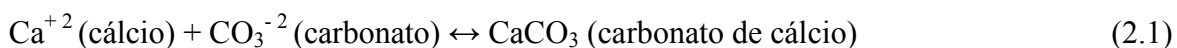
A taxa de adesão dos microrganismos do solo às partículas minerais é muitas vezes bastante considerável, podendo atingir até 90% da população. Este efeito dependerá do diâmetro das partículas (quanto menor o diâmetro, maior a adesão). Também da natureza do microrganismo e do tipo de mineral argiloso, sendo as bactérias Gram-positivas as mais facilmente aderidas aos minerais de argila carregados negativamente como as caulinitas e as bactérias Gram-negativas aos minerais de argila carregados positivamente como as gibbsitas (Cardoso *et al.*, 1992).

2.2 - Biomineralização

A biomineralização é um processo comum na natureza mediante o qual os organismos vivos formam precipitados minerais cristalinos ou amorfos. Destes, aproximadamente 80% são cristalinos e 20% são amorfos, sendo que o cálcio constitui em torno de 50% de todo o biomineral conhecido (Soto, 2003).

A biomineralização ocorre por reações químicas entre íons específicos ou compostos, como resultado das atividades metabólicas de um organismo em certas condições ambientais. A “Carbonatogênese” é um bom exemplo de biomineralização, na qual se produz a precipitação de carbonatos (Lee, 2003).

A precipitação do carbonato de cálcio (CaCO_3) ocorre pela reação de equilíbrio apresentada na equação 2.1:



Onde a produção de CO_3^{-2} de bicarbonato em água (HCO_3^{-1}) é altamente dependente do pH; o crescimento ocorre sob condições alcalinas. Em conclusão, a precipitação de carbonato de cálcio ocorre facilmente em ambientes alcalinos abundantes em cálcio (Ca^{+2}) e íons de carbonato (CO_3^{-2}) (Lee, 2003).

O papel principal da bactéria no processo tem sido associado a sua habilidade em criar ambientes alcalinos (alto pH e incremento da concentração e dissolução do carbono inorgânico (DIC)) por meio de várias atividades fisiológicas (Hammes & Vestraete, 2002).

A precipitação do carbonato de cálcio é um fenômeno comum nos ambientes marinhos, de água doce e no solo (Castanier *et al.*, 1997; Erlich, 1998). Este processo químico é simples e é governado por quatro fatores chave:

1. Concentração de cálcio (Ca^{2+});
2. Concentração da dissolução do carbono inorgânico (DIC);
3. pH;
4. Disponibilidade de nucleação do local.

Testes mostraram que a produção de partículas de carbonato pelas bactérias heterotróficas segue caminhos diferentes, a “carbonatogênese passiva e ativa”. A “carbonatogênese passiva” é gerada por modificações do meio que levam a acumulações de carbonato e íons de bicarbonato e finalmente à precipitação de partículas sólidas. Isto é produzido por vários metabolismos como o ciclo do nitrogênio (amonificação de amônio, degradação de uréia e

ácido úrico e redução de nitratos) e do ciclo do enxofre (redução de compostos de enxofre). A “carbonatogênese ativa” é independente dos aspectos metabólicos já mencionados. As partículas de carbonato são produzidas por trocas de íons através da membrana celular como é o caso das bactérias autotróficas. As cianobactérias fotossintéticas também podem contribuir para a precipitação de carbonatos (carbonatos autotróficos). Particularmente, a “carbonatogênese” ocorre durante a fase exponencial da vida da bactéria e termina mais ou menos depois do começo do estado estacionário. A “carbonatogênese ativa” é a primeira a ocorrer e é seguida pela passiva que produz o crescimento e a modificação da forma das partículas precipitadas (Castanier *et al.*, 1997).

Hammes & Vestraete (2002) assinalam que a fotossíntese é a forma mais comum de precipitação microbiana de carbonato e está associado, como já foi apresentado, às bactérias autotróficas e às algas ou cianobactérias em ambientes aquosos, sejam marinhos ou de águas doces. Este processo baseia-se na utilização metabólica do CO₂ dissolvido, que se equilibra com o HCO₃⁻ e CO₃⁻² (Equação 2.2), ao redor da bactéria. Tal reação induz a uma mudança no equilíbrio do bicarbonato e subsequentemente um aumento no pH na maior parte do meio (Equação 2.3 e 2.4). Nestas circunstâncias, a precipitação pode ocorrer se os íons de cálcio solúvel estão presentes.



Outro tipo de processo que precipita carbonatos é aquele que envolve o ciclo do enxofre, especificamente a redução do sulfato. Esta redução ocorre em águas oceânicas, formações geológicas e durante o tratamento biológico do ácido da drenagem das minas. A reação começa com a dissolução do gipso (CaSO₄·2H₂O/CaSO₄), (Equação 2.5). Nestas circunstâncias, a matéria orgânica pode ser consumida pela bactéria sulfato redutora e o enxofre e CO₂ metabólico são liberados (Equação 2.6).



Castanier *et al.* (1999) mostram que a retirada do hidrogênio do enxofre produzido (H_2S) e o resultado do incremento do pH é um pré-requisito para que a precipitação do carbonato aconteça. Em ambientes naturais, o enxofre combinado com ferro pode, por exemplo, produzir pirita (FeS_2).

Outra forma de precipitação envolve o ciclo do nitrogênio e, mais especificamente, da amonificação de aminoácidos, redução de nitrato e degradação da uréia (Hammes *et al.*, 2003). Este processo é mais frequentemente associado à precipitação em solos e sedimentos. Esses três mecanismos têm em comum a produção de CO_2 *metabólico* e amônia (NH_3), a qual em presença de íons de cálcio resulta na precipitação de amônio e a liberação de íon de carbonato. A reação se dá de acordo com as equações 2.7 e 2.8:



Em ambientes naturais complexos os diferentes metabolismos se podem combinar para produzir a precipitação.

Hammes & Vestraete (2002) assinalam que espécies específicas de bactérias são capazes de precipitar diferentes quantidades, formas e tipos de cristais de carbonato (calcita, aragonita, dolomita, etc.) a partir do mesmo meio sintético. A calcita e a aragonita são dois dos polimorfos mais estáveis de carbonato de cálcio.

Castanier *et al.* (1999) na procura de ver a relação entre a bactéria, o mineral e o ambiente, realizou seu estudo *in situ*, em ambientes formados por águas de origem eutrófico cárstico. Nele encontrou que os primeiros cristais produzidos na precipitação de carbonato de cálcio são amorfos e provavelmente hidratados. Eles aparecem na superfície dos corpos bacterianos como manchas ou estrias, que se estendem e se unem até formar uma capa rígida. Em outros casos, as partículas sólidas se formam dentro do corpo celular e são excretadas para fora da célula. Todas estas pequenas partículas, incluindo as células bacterianas mais ou menos endurecidas, se reúnem em agregados biominerais, os quais se visualizam como estrutura “precrystalina” ou “procrystalina” (Figura 2.4a). Os primeiros minerais crescem e formam *ensembles* de “biocristais secundários”, os quais

progressivamente mostram estrutura mais cristalina com o crescimento (Figura 2.4b e 2.4c) (Castanier *et al.*, 1999). Adicionalmente, verificou-se que as bactérias heterotróficas são mais eficientes na geração dos precipitados de carbonato de cálcio que as bactérias autotróficas. Estas bactérias heterotróficas foram usadas no estudo da restauração de monumentos calcários.

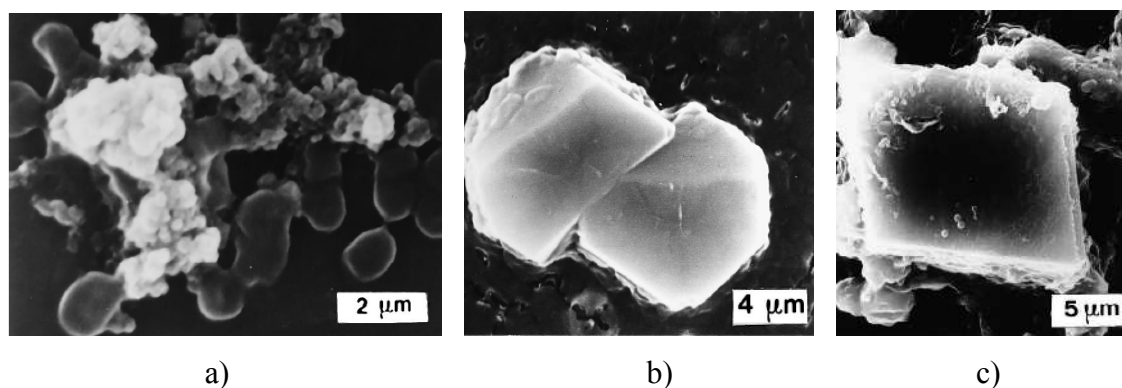
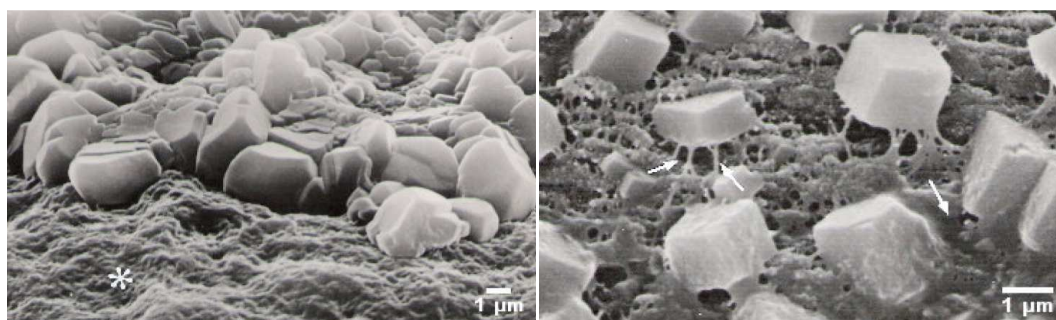


Figura 2.4. Imagem de microscópio eletrônico de varredura, a) Agregado biomineral de estrutura pré-cristalina, b) Biocristais, c) Biocristal maior (Castanier *et al.*, 1999).

De Paula (2006) estudou na sua tese de doutorado a biomineralização induzida pela concha calcária do molusco de água doce *Physa* spp. A concha é essencialmente composta por carbonato de cálcio e uma porção de matéria orgânica. As conchas foram trituradas e colocadas em forma de lamínulas em duas soluções de iguais proporções de CaCl_2 (20mM) pH 6,0, NHCO_3 (20mM) pH 9,5 e $\text{MgCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (40mM) pH 6,0, e outra omitindo o cloreto de magnésio, contidas em béqueres. Passados 7 dias observou-se o crescimento de cristais de aragonita no primeiro meio (a sobre-saturação do meio inibe o crescimento do mineral) e de calcita no segundo, conforme Figura 2.5.



a) Cristais Aragonita

b) Cristais Calcita

Figura 2.5. Imagem em microscópio eletrônico de varredura da precipitação de cristais a partir da concha calcária do molusco de água doce *Physa* spp. (De Paula, 2006).

Em pesquisas desenvolvidas em cavernas na Índia, com o propósito de determinar a possível origem das estalactites encontradas nelas (Baskar *et al.*, 2006), foram isoladas bactérias heterotróficas nativas, Actinomicetos, Cianobactéria e Musgos. As bactérias dominantes foram *Bacillus thuringiensis* e *Bacillus pumilis*. As colônias inoculadas, colocadas em meio B4 (2,5g acetato de cálcio, 4g extrato de levedura, 10g de glicose e 18g ágar por litro de água destilada), precipitaram calcita (Figura 2.6). A predominância de *Bacillus* neste trabalho mostra que eles apresentam um papel importante na precipitação do carbonato no habitat natural.



Figura 2.6. Precipitação mineral por *Bacillus* (Baskar *et al.*, 2006).

A habilidade destas bactérias em formar CaCO_3 em diferentes temperaturas de incubação, indicou que 25°C foi a temperatura ótima para a precipitação (Figura 2.7). Esta precipitação começou a ocorrer depois de 15 dias desde o início do experimento. A quantidade e o tamanho dos cristais incrementados com o tempo são apresentados nas Figuras 2.8a e 2.8b.

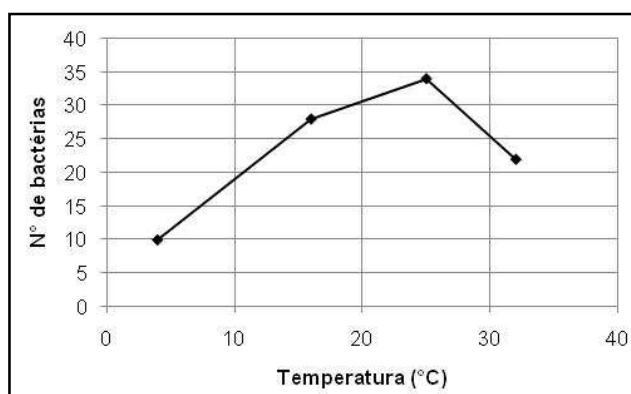


Figura 2.7. Temperatura vs produção de bactérias (Baskar *et al.*, 2006).

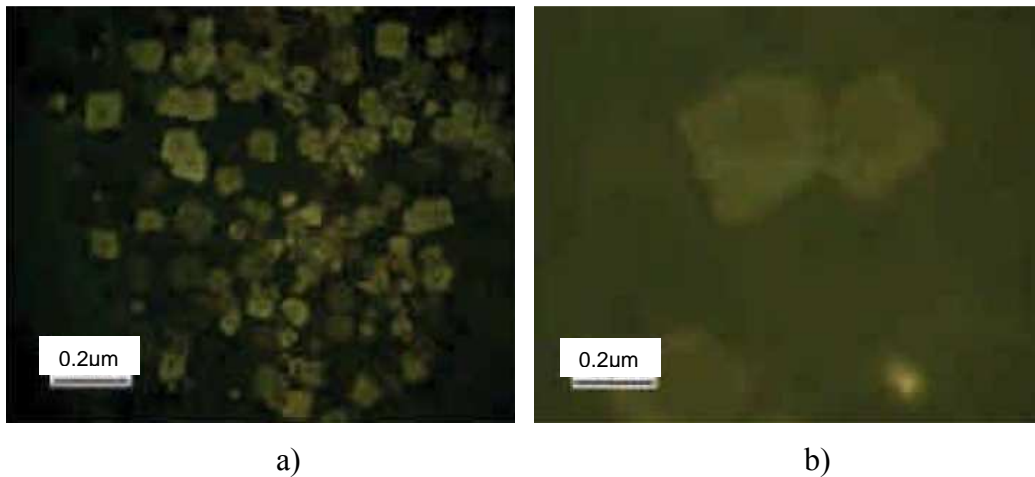


Figura 2.8. Imagem com microscópio ótico, a) Calcita depois de uma semana, b) Calcita depois de 15 dias (Baskar *et al.*, 2006).

Stocks–Fischer *et al.* (1999) estudaram o uso da uréia como resultado da hidrólise de ácido úrico via enzima uréase na precipitação de carbonatos. Utilizaram *Bacillus pasteurii*, em quatro tipos de areia. Efetivamente a calcita foi formada como se apresenta na Figura 2.9.

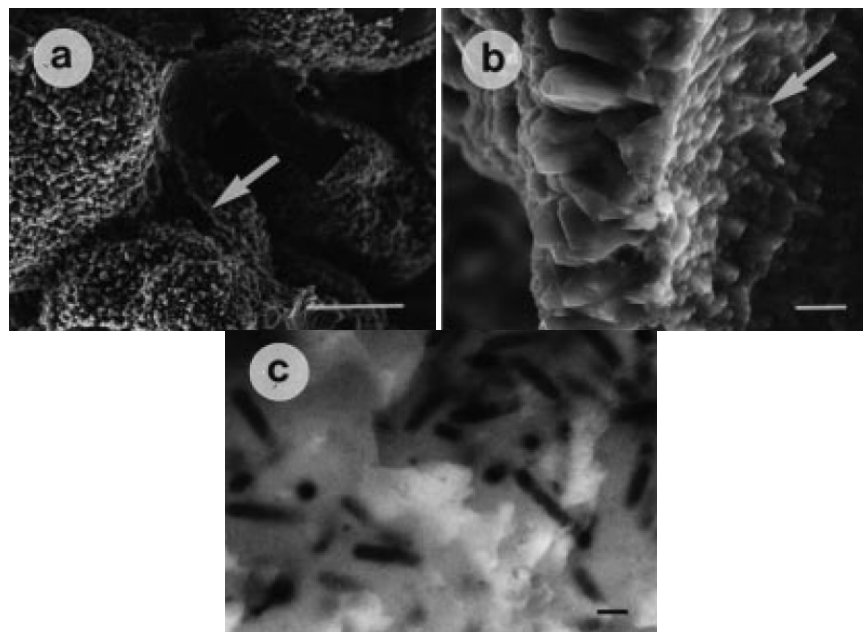


Figura 2.9. Imagens em microscópio eletrônico de varredura: a) cristais de calcita formados sobre as partículas de areia (escala bar 100µm), b) detalhe dos cristais apresentados em *a* na seta (escala bar 10µm), c) aumento da área de *b*, os cilindros pretos correspondem à bactéria *Bacillus pasteurii* incrustadas nos cristais, escala bar 1µm (Stocks–Fischer *et al.*, 1999).

Adicionalmente, Stocks–Fischer e co-autores determinaram nesta pesquisa que a atividade ureásica das bactérias é afetada pelo aumento que geram no pH, mostrando, como aconteceu em outros estudos, que a maior atividade ureásica se dá em um pH igual a 8 (Figura 2.10). Além disso, encontraram, como se observa na Figura 2.11, que quando se tem muita bactéria, diminui a precipitação de carbonato de cálcio devido à maior concentração bacteriana e, por consequência, menor disponibilidade de uréia, limitando-se assim à produção adicional de amônio.

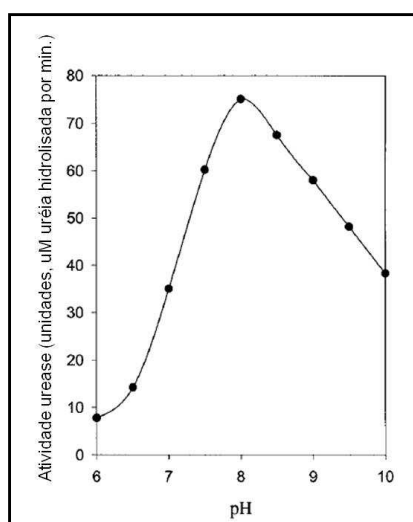


Figura 2.10. Efeito do pH na atividade urease num *Bacillus pasteurii* (Modificado de Stocks–Fischer *et al.*, 1999).

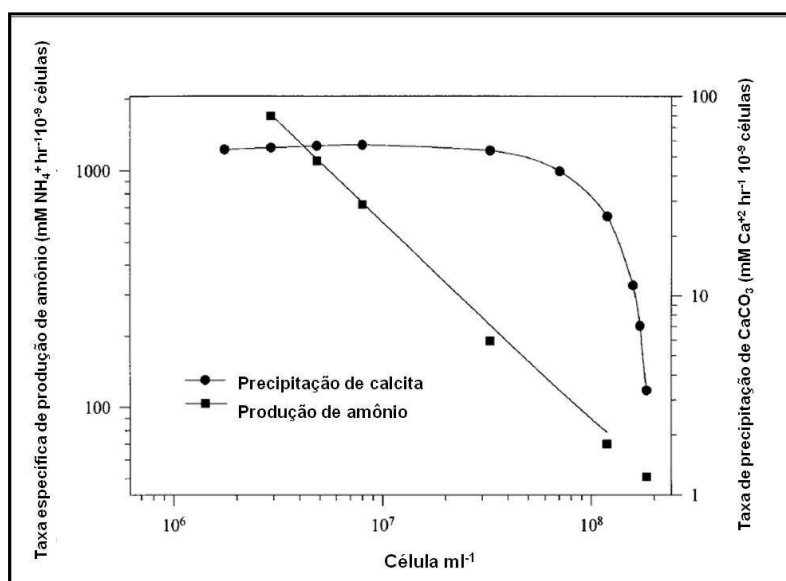


Figura 2.11. Taxa específica de CaCO₃ e amônio em relação à concentração bacteriana (Modificada de Stocks–Fischer *et al.*, 1999).

Navarro *et al.* (2003) propõem o uso do microrganismo uréasico *Myxococcus xanthus* na precipitação de calcita para o recobrimento de poros em rochas ornamentais (Figura 2.12).

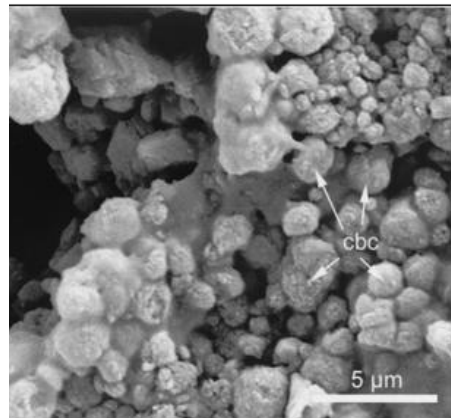


Figura 2.12. Bactéria calcificada “cbc” (Navarro *et al.*, 2003).

Hammes *et al.* (2003) trabalharam com solo de jardim e de aterros, com cimento *Portland* e com lama calcária, tratadas com meio composto por uréia. A finalidade era analisar a atividade ureásica das bactérias contidas nas amostras na produção de carbonato de cálcio. Foram encontradas nas amostras espécies como *Bacillus pasteurii*, *Pseudomonas* spp., *Variovorax* spp, *Leuconostoc mesenteroides*, *Bacillus sphaericus*. Este grupo de bactérias é comum em solos (pelo menos 40% das bactérias do solo são *Bacillus*) e o nutriente constituído de uréia é o meio preferido para o crescimento de bactérias *Bacillus urease*.

Aproximadamente 10% das colônias bacterianas isoladas produziram cristais sobre o ágar de precipitação. Isto começou com um escurecimento no centro da colônia bacteriana, que foi atribuído à formação de CaCO_3 amorfo (entre 20h e 5 dias dependendo do isolamento), seguido pela cristalização e o aumento do tamanho do cristal com o tempo (Figura 2.13). O precipitado se formou dentro da colônia de bactérias sobre a superfície do ágar. Observaram-se pelo menos três tipos diferentes de cristais, os quais se devem, provavelmente, às diferenças nas atividades ureásicas.

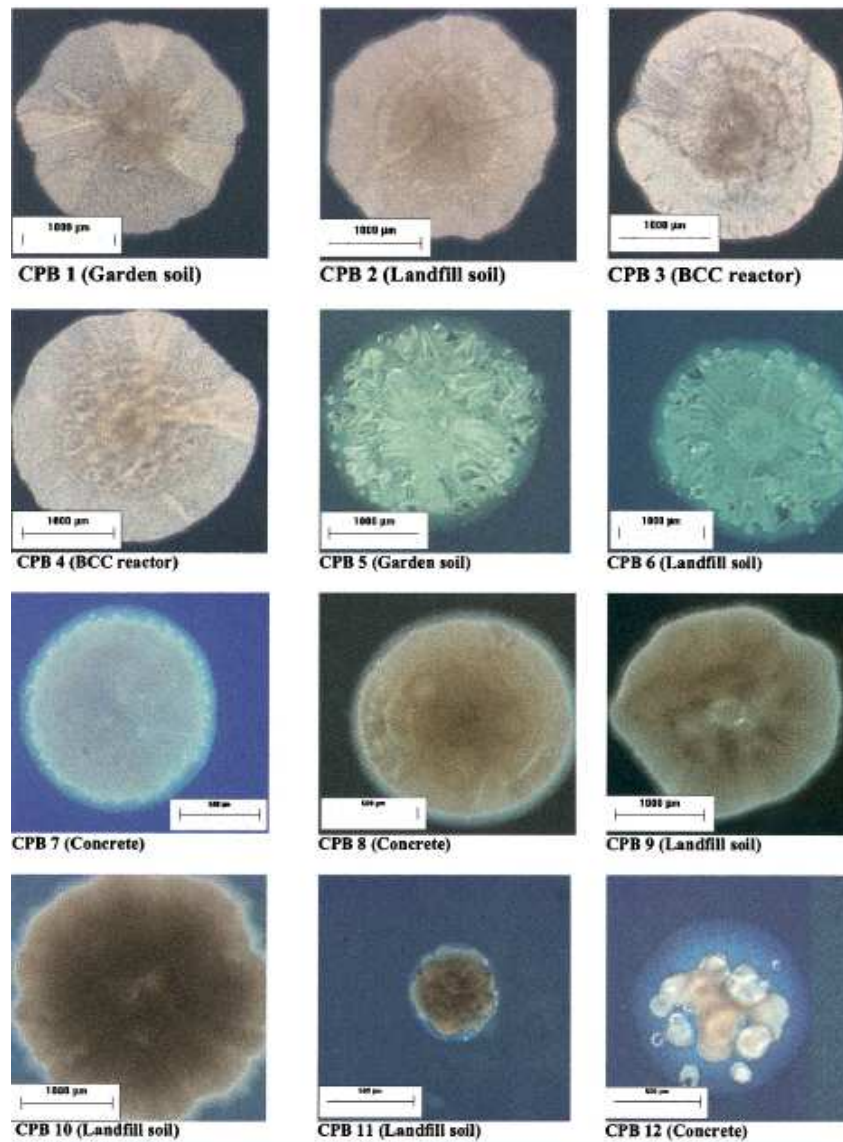


Figura 2.13. Diferenças morfológicas na precipitação de carbonato de cálcio dentro de colônias bacterianas ureásicas (Hammes *et al.*, 2003).

As análises por difração de raios X possibilitaram verificar a calcita como primeira componente, com detecção de vaterita em alguns casos. Como a vaterita é metaestável na temperatura ambiente e na pressão atmosférica, os polimorfos metaestáveis se formam e se convertem em polimorfos estáveis, por exemplo, a calcita. Em conclusão, primeiro se forma CaCO_3 amorfo, logo vaterita e, finalmente calcita. Embora a calcita seja o precipitado comum durante a precipitação de carbonato por uréia, os microrganismos precipitam outros polimorfos, como a aragonita (Hammes *et al.*, 2003).

Segundo Martínez *et al.* (2003) o estudo dos microrganismos no processo de biomineralização começou ao final do século XIX por Nadson (1899/1903) no lago Veisovoe em Kharkov (Rússia), em especial com a precipitação de carbonato de cálcio (CaCO_3). Posteriormente, Black *et al.* (2001) concluíram que diversas bactérias nos ambiente marinhos têm relação com a precipitação de carbonato de cálcio (Figura 2.14). Já, em 1979, Goreau, T. e Goreau, N. observaram a biomineralização em recifes coralinos (Martínez *et al.*, 2003).

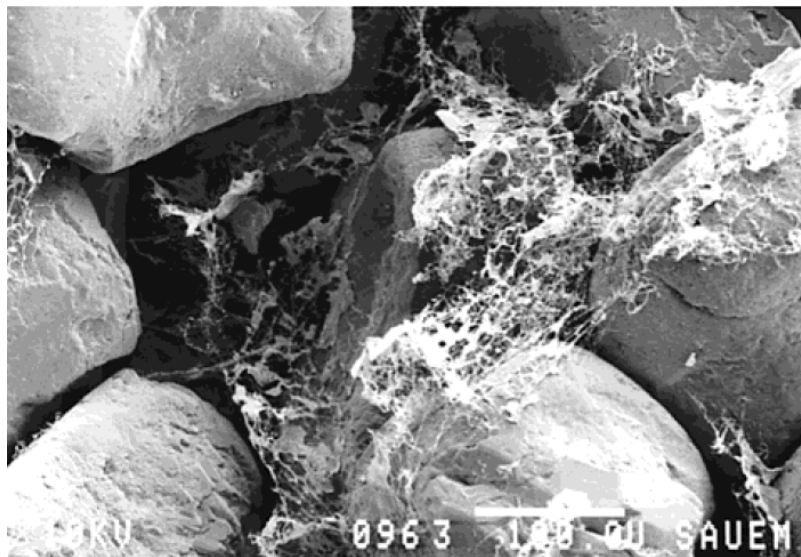


Figura 2.14. Imagem em microscópio eletrônico de varredura do precipitado bacteriano em ambiente marinho unindo grãos de areia, escala bar 100 μm (Black *et al.*, 2001).

A primeira sugestão para trabalhar com biomineralização na conservação de monumentos foi feita aplicando substâncias de organismos de matriz macromolecular extraídos de lanchas marítimas. Mas, sua prática foi dificultada pela complexidade do procedimento de extração e baixo cultivo do produto utilizável (Tiano *et al.*, 1999). Portanto, estudos posteriores têm analisado o uso de outras bactérias que precipitem carbonato de cálcio para a proteção contra a deterioração de materiais utilizados na construção civil, como as pedras ornamentais e os concretos, método que reduz o impacto ambiental. Este processo denomina-se **bioremediação** (Lee, 2003).

A bioremediação *in situ* como primeira experiência, foi aplicada sobre a torre da igreja Saint Me'dard (França). Esta igreja foi construída durante o século XII com pedra calcária e desde aquela época até este momento foi restaurada várias vezes. O tratamento por

bioremediação foi aplicado em Junho de 1993, sobre uma área de 50m², utilizando *Bacillus cereus*. A evolução da produção bacteriana foi testada várias vezes. Primeiro depois de 6 meses e outra vez depois de 1 ano. Testes foram realizados em 20 pontos, observados por microscopia eletrônica de varredura, além de ter sido medida a permeabilidade superficial. A última medição (Junho 1994) confirmou a boa qualidade e consistência de uma biopelícula de cálcio. Depois de 3,5 anos do tratamento, o aspecto externo da torre não mudou. A biopelícula confere à pedra uma camada protetora, que reduz a absorção da água em 1/5 sem afetar sua aparência estética (Me'tayer-Levrel *et al.*, 1999).

Em décadas recentes, as estátuas de pedra e os monumentos históricos ao redor do mundo têm sofrido acelerados processos de intemperização e deterioração devido ao aumento da contaminação atmosférica, conseqüentemente os métodos de conservação são de grande utilidade para a proteção e conservação de rochas, antes que sofram uma desintegração granular irreversível (Lee, 2003). As tentativas de diminuir a velocidade de deterioração de materiais ornamentais e na construção civil têm sido feitas a partir de métodos conservadores, com produtos orgânicos e inorgânicos. O uso destes últimos constitui-se numa desvantagem devido à sua composição química e aos coeficientes de expansão térmica destes materiais (Pérez *et al.*, 1995). Como a precipitação de carbonato de cálcio é um processo comum na terra, água doce e água marinha (Boquet *et al.*, 1973), a formação de minerais dentro dos poros das rochas, por processos biologicamente controlados, podem ser muito importantes para a manutenção dos monumentos (Tiano *et al.*, 1999).

Em estudos feitos por Me'tayer-Levrel *et al.* (1999), em vinte estátuas que foram fabricadas e cobertas com a biopelícula de cálcio em Janeiro de 1994 e colocadas em ambientes climáticos diferentes para ser comparadas com outras estátuas sem a biopelícula, após um ano do tratamento, as estátuas sem cobertura apresentaram envelhecimento acelerado e aquelas tratadas ficaram preservadas. A biopelícula de cálcio, portanto, aparece como um bom protetor de estátuas de rocha calcária e outros materiais ornamentais.

A bioremediação, por precipitação de cristais de calcita com bactérias calcinogêneas, tem um grande valor para a restauração de monumentos calcários, devido à sua pureza e aderência.

Em pesquisa desenvolvida por Lee (2003) com *Bacillus amyloliquefacies*, usando quatro meios de precipitação, incubando as colônias durante cinco dias a 30°C, obteve-se precipitações de CaCO₃. O autor também testou diferentes concentrações de acetato de cálcio encontrando que 1,5% é o melhor valor para a produção de calcita (Figura 2.15). Em conclusão, verifica-se que *Bacillus amyloliquefacies* promove uma ótima precipitação de carbonato de cálcio para um pH igual a 8 a 30°C, no meio B4, que consiste, neste caso, em 0,4% de extrato de levedura; 0,5% de glicose e 1,5% de acetato de cálcio.

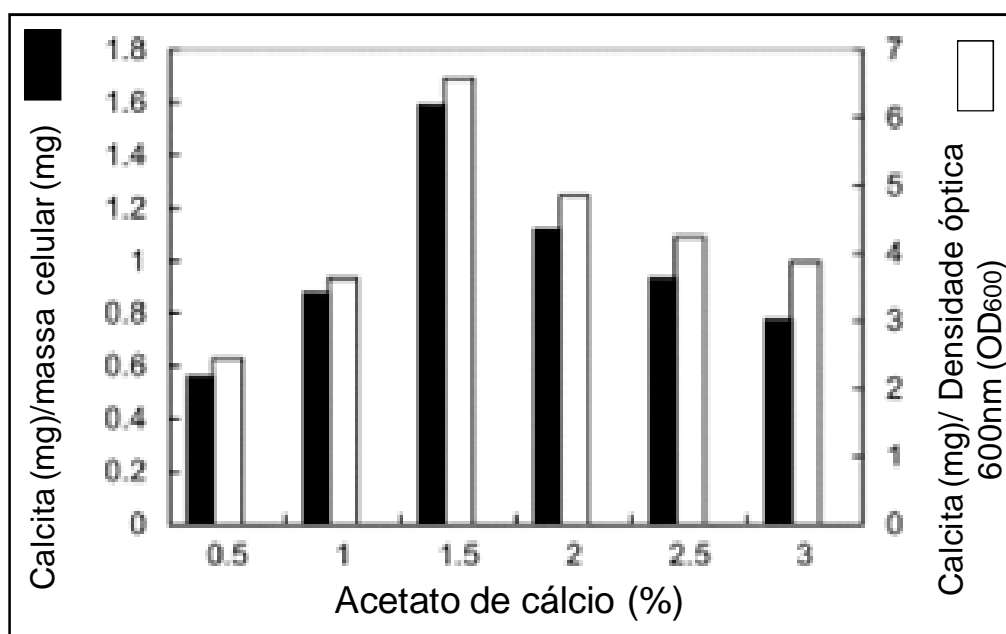
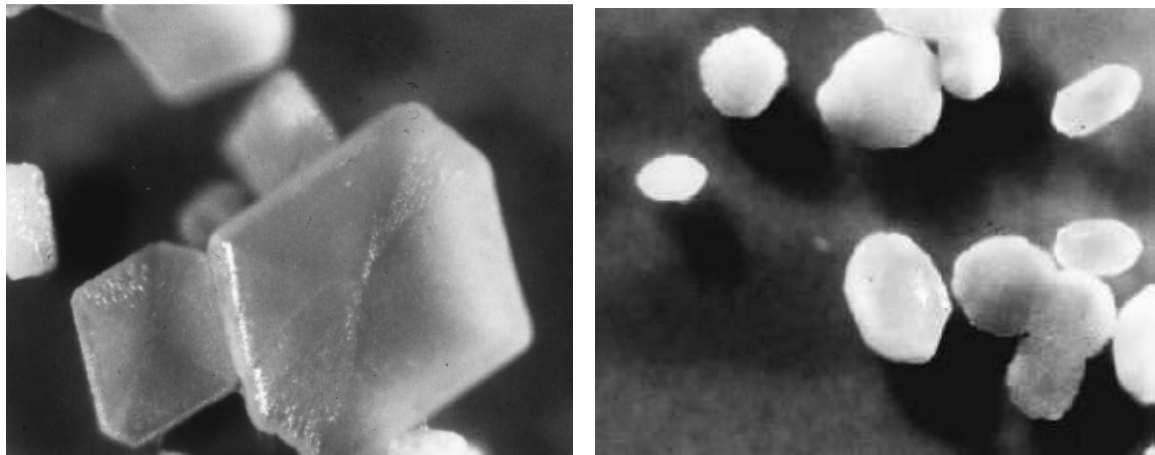


Figura 2.15. Efeito da concentração de acetato de cálcio na produção de *Bacillus amyloliquefacies* em meio B4 (Modificado de Lee, 2003).

Autores, como Tiano *et al.* (1999) utilizaram bactérias como *Micrococcos spp.* e *Bacillus subtilis*, com o cultivo B4, espalhado sobre uma pedra ornamental. Também foi colocado só o meio B4 sobre a pedra sem bactéria. As duas amostras foram incubadas a 28°C e 37°C respectivamente, até que foram observados macroscopicamente os cristais (aproximadamente após 15 dias) (Figura 2.16). No caso das amostras tratadas só com B4, foi verificado um aumento biológico não calcificante devido ao desenvolvimento de contaminantes transportados pelo ar. Porém, se observou um decréscimo na absorção de água pela alta presença de material biológico de 60%, que dificultou o movimento do fluxo. Como consequência da presença de cristais de calcita, oriundos do meio com as bactérias, obteve-se uma redução da absorção de água de aproximadamente 50%.



a)

b)

Figura 2.16. Imagens no microscópio ótico (aumento 100 vezes), a) Cristais produzidos por *Micrococos* spp., b) Cristais produzidos por *Bacillus subtilis* (Tiano *et al.*, 1999).

Em revestimento de fraturas, autores como Bang & Ramakrishnan (2001) trabalharam com bactérias urease como *Escherica coli* e *Bacillus pasteurii*. Os microrganismos foram aplicados na remediação de fraturas em concretos. Embora as precipitações de calcita não aumentassem as forças de tensão nem os módulos de elasticidade dos polímeros em que foram colocados, a argamassa de cimento cuja fratura foi remediada com o polímero indicou um aumento importante na resistência à compressão.

Outra técnica na qual se utilizam bactérias é a **Bioinduração**, que consiste na selagem dos poros de um solo por meio da aplicação de microrganismos capazes de produzir uma biopelícula (*biofilm*), com o fim de reduzir a permeabilidade do solo. A biopelícula é um biopolímero, que consiste numa estrutura de carboidratos altamente hidratada (99% de água), que permite às bactérias associações entre células, com o fim de criar um microambiente na superfície, ou seja, atua como um material cimentante entre a superfície e os microrganismos (Figura 2.17). A adesão destes microrganismos é influenciada pela disponibilidade e concentração de nutrientes, pH e temperatura entre outros (Cardona & Usta, 2002).

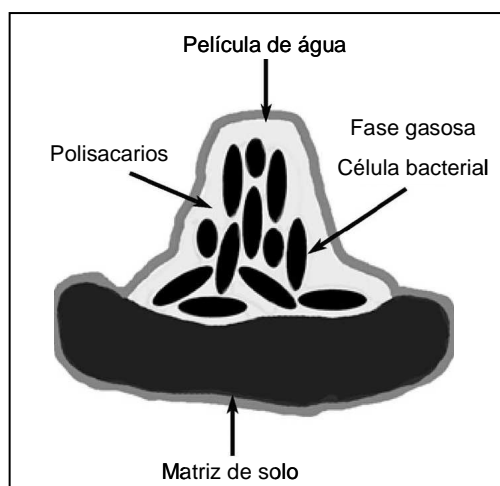


Figura 2.17. Estrutura de uma bactéria agregada a um *biofilm* num solo não saturado (Modificado de Halverson, 2005).

Segundo Gómez (2006), entre os trabalhos mais relevantes em bioinduração destaca-se o dos pesquisadores Michael, Dennys e John, Turner (1998), que pretendiam avaliar a possibilidade de usar a biopelícula para modificar a permeabilidade dos solos para serem usados na construção de barreiras impermeáveis. Verificaram que o *biofilm* produzido pela bactéria *Beijerinckia indica* causa redução na permeabilidade (de 10^{-5} cm/s a 10^{-8} cm/s) do meio poroso devido à diminuição do volume e forma dos poros.

Outras pesquisas realizadas na Holanda (Whiffin *et al.*, 2005) denominam esta técnica de tamponar poros dos solos como *bioselagem* (*Biosealing*). Neste trabalho, os autores também tratam outra técnica usada em materiais permeáveis, a *biosedimentação* (*Biogrout*) com microrganismos que degradam a uréia. Estas técnicas têm sido usadas em solos arenosos (Figura 2.18).

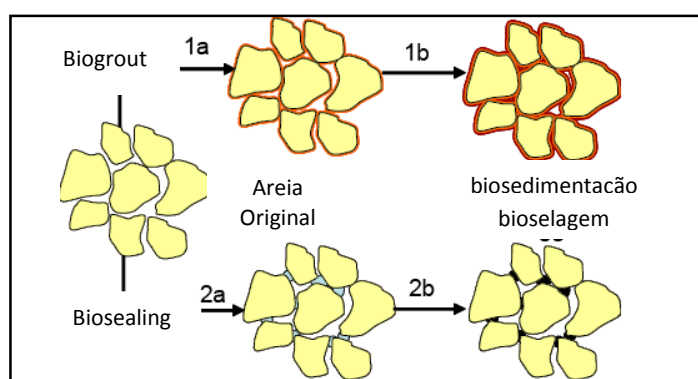
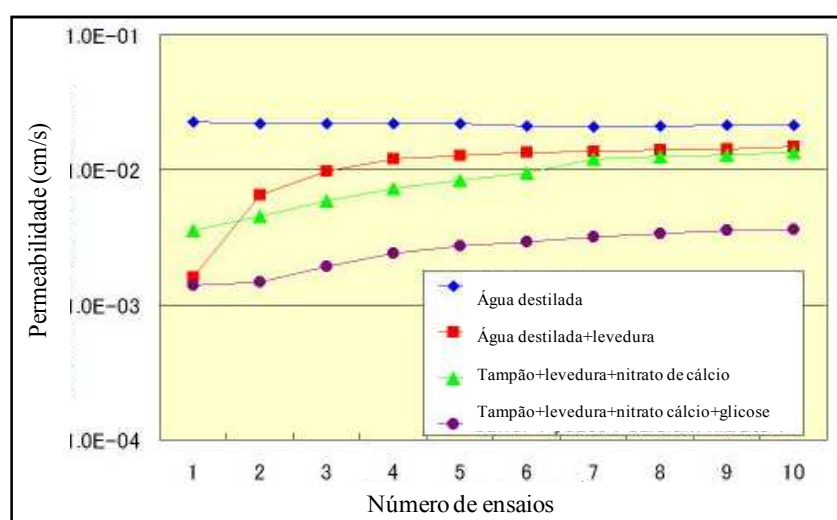
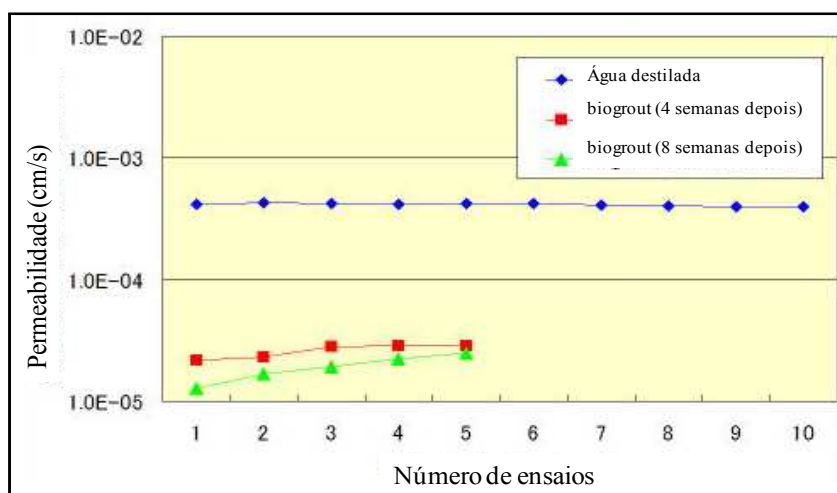


Figura 2.18. Princípio de formação de *biogrout* e *biosealing* em areias (Modificado de Meurs *et al.*, 2006 apud Gómez, 2009).

Um exemplo de *biogROUT* consiste num nutriente orgânico (glicose neste caso), um tampão (pH 8) e uma solução de cálcio (nitrato de cálcio), o qual é injetado no solo ou rocha para induzir precipitação de CaCO_3 nos vazios ou nas trincas das rochas usando o metabolismo microbial. O *biogROUT* é uma metodologia de melhoria de solos, para fins de engenharia, por meio da qual se melhora a rigidez e a resistência e diminui a permeabilidade de solos arenosos. O efeito do *biogROUT* foi testado na Universidade de Hokkaido – Japão a partir de ensaios de permeabilidade, onde para areias e areias argilosas este parâmetro diminuiu em aproximadamente uma ordem de grandeza como se pode observar nas Figuras 2.19a e 2.19b. A quantidade de *biogROUT* foi variada em cada um dos dez ensaios.



a) Areia



b) Areia argilosa

Figura 2.19. Relação entre número de ensaios e permeabilidade, a) Areia, b) Areia argilosa. (Imagem obtida e modificada de <http://geo-er.eng.hokudai.ac.jp/new2/research/softrock-e/softrock-e.html> no dia 23/04/2006).

Esta última técnica de melhoramento das propriedades do solo mediante a adição de microrganismos é mais comumente denominada **Bioestabilização**. Segundo Gómez (2006), o trabalho mais relevante em bioestabilização foi do Dr. Donald H. Gray (2001), que faz referência a alguns ensaios executados com bactérias como *Pseudomonas atlântica*, *Bacillus pasteurii*, *Sporosarcina ureae* e o fungo *Penicillium chrysogenum*, os quais secretam substâncias que atuam como cola, melhorando as características geotécnicas dos solos. No trabalho executado sobre uma areia de quartzo, com o fungo *Penicillium chrysogenum*, a coesão aumentou em 5kPa depois de três semanas de incubação com a bactéria.

O grupo BACEST da Colômbia tem desenvolvido várias pesquisas em bioestabilização. O primeiro trabalho foi feito por Martínez *et al.* (2003), onde se selecionou a bactéria *Bacillus subtilis*, a qual foi adicionada a um meio nutritivo precipitante (MN) em três concentrações. O meio nutritivo MN+bactéria foi adicionado como parte da água de compactação. O solo foi caracterizado física, química, mineralógica e mecanicamente, com e sem tratamento, concluindo-se que *Bacillus subtilis* é realmente uma bactéria com propriedade calcificante, visto que o material precipitado num meio rico em nutrientes e com um pH adequado é a calcita (Figura 2.20). O mineral fez com que o solo tratado, quando comparado com o solo sem tratamento, melhorasse suas propriedades físico-mecânicas.

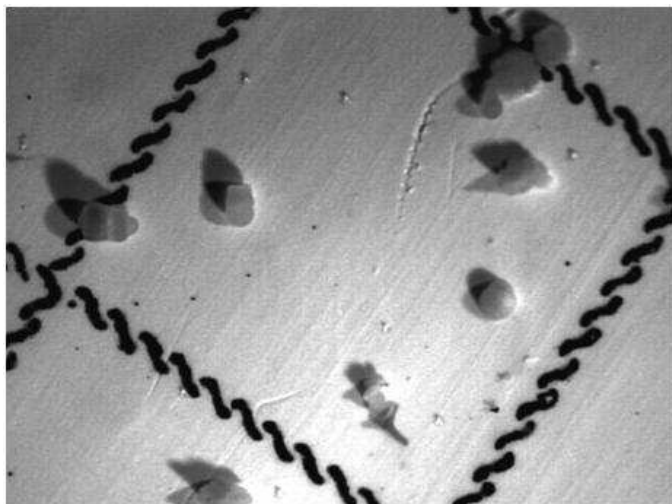


Figura 2.20. Imagem com lupa binocular dos minerais de carbonato de cálcio recuperados de tamanhos aproximados de 0,45 μ m, aumento de 15vezes (Montoya *et al.*, 2005).

Outra pesquisa importante desenvolvida pelo grupo BACEST foi o trabalho feito por Gómez (2006). Nele foram utilizados solos de textura grossa e executados ensaios de laboratório não destrutivos, que permitiram determinar o módulo cisalhante (G).

Gómez secou em estufa o solo para anular o efeito da flora nativa e posteriormente adicionou *Bacillus subtilis* e *Bacillus pasteurii* com nutriente B4. No trabalho, Gómez verificou que as reduções na permeabilidade obtidas em solos com maior tamanho de poro indicaram que a utilização da bactéria *Bacillus subtilis* para modificar as propriedades hidrodinâmicas do solo é uma opção viável. Igualmente, tem-se um aumento no módulo cisalhante (G) nos solos tratados, módulo que está relacionado diretamente com a rigidez do material, então, quando este aumenta, igualmente aumenta a rigidez.

Gómez (2006) afirma que o *Bacillus pasteurii* parece ser um microorganismo mais promissor já que com ele se obtêm maiores módulos de cisalhamento máximos para os solos que com o *Bacillus subtilis*.

No trabalho mais recente do grupo BACEST, também com a bactéria *Bacillus pasteurii*, concluiu-se que a quantidade de ar nas amostras afeta de maneira desfavorável os parâmetros de resistência ao cisalhamento e as características de deformabilidade nos solos tratados. Em amostras com maior conteúdo de ar, os níveis de carbono CO_2 são maiores, ocasionando um desequilíbrio químico no meio, reduzindo a quantidade de cristais precipitados (López, 2008).

Autores, como Ciferri *et al* (2004) utilizaram bactérias que precipitaram carbonato de cálcio ou outros minerais capazes de aumentar a resistência do terreno ou de modificar as propriedades de outros materiais. Para isso coletaram amostras de rochas calcárias, de musgos e de excremento de gado. Foram isoladas as bactérias de cada amostra e misturadas com dois tipos de meios precipitadores, para logo serem adicionados areia, areia siltosa, geotêxtil e fragmentos de cimento duro. Nesta pesquisa, não se observou precipitação significativa de carbonato nas amostras de solo. Os autores atribuem essa ausência de precipitação à falta de cálcio. Pelo contrário, nas amostras com cimento apareceu uma biopelícula, que analisada por difração de raios X confirmou estar composta por carbonato.

Flórez (2007) reportou resultados de ensaios de adensamento 20 dias após o tratamento de uma areia com bactéria do tipo *Cocobacillus* Gram positivo - urease positiva. Aqui, os ensaios de compressão edométrica mostraram um aumento da rigidez do solo em 25% para uma concentração de 48×10^9 UFC (unidades formadoras de colônia/ml), enquanto para a concentração de 80×10^8 UFC /ml a rigidez aumentou em 13%.

Whiffin *et al.* (2007), em outros estudos, trabalharam com uma areia com peso específico de $1,65 \text{ g/cm}^3$ e porosidade de 37,8%, colocada num tubo de PVC de 5m de longitude (Figura 2.21), na qual foi injetado fluido com água, bactéria, CaCl_2 e uréia, a uma vazão de 0,35l/h. A bactéria usada foi *Sporosarcina pasteurii* (para 1 litro de bactéria em suspensão foi adicionado 9ml de 1,11M uréia (reação de concentração 1M de uréia)).

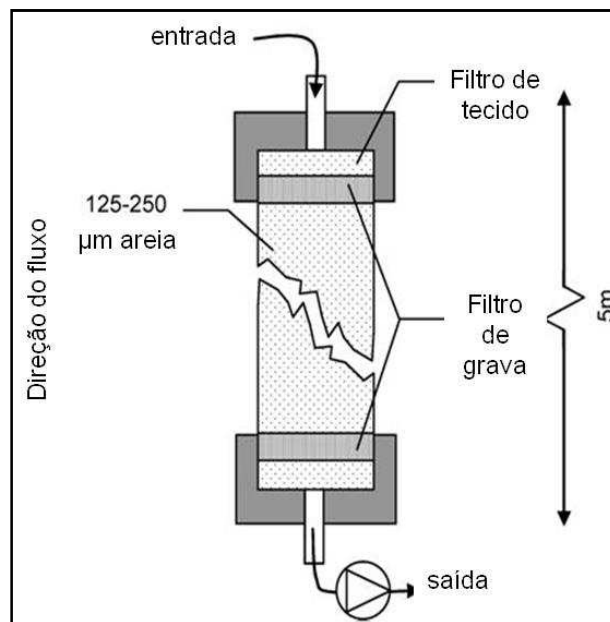


Figura 2.21. Esquema do ensaio na coluna de areia. (Modificado de Whiffin *et al.*, 2007).

A coluna foi cortada em amostras de 25cm, e determinada para cada amostra a resistência a partir do ensaio triaxial confinado-drenado. Como resultados, os pesquisadores obtiveram, que altas concentrações de cálcio significavam melhorias na resistência da amostra e baixos conteúdos de carbonato de cálcio não geraram melhorias significativas da resistência. Encontraram que, requer-se o mínimo de 60 kg/m^3 de carbonato de cálcio no solo para gerar melhoria da resistência (Figura 2.22). Adicionalmente, em relação à permeabilidade para a coluna completa, esta foi levemente reduzida, mais não pareceu ter relação direta com a precipitação de carbonato de cálcio (Figura 2.23). E finalmente

observaram, também na coluna completa, que o carbonato de cálcio tem uma relação lineal com a porosidade. O máximo conteúdo de cálcio (CaCO_3) gerou 90% da diminuição da porosidade (Figura 2.24).

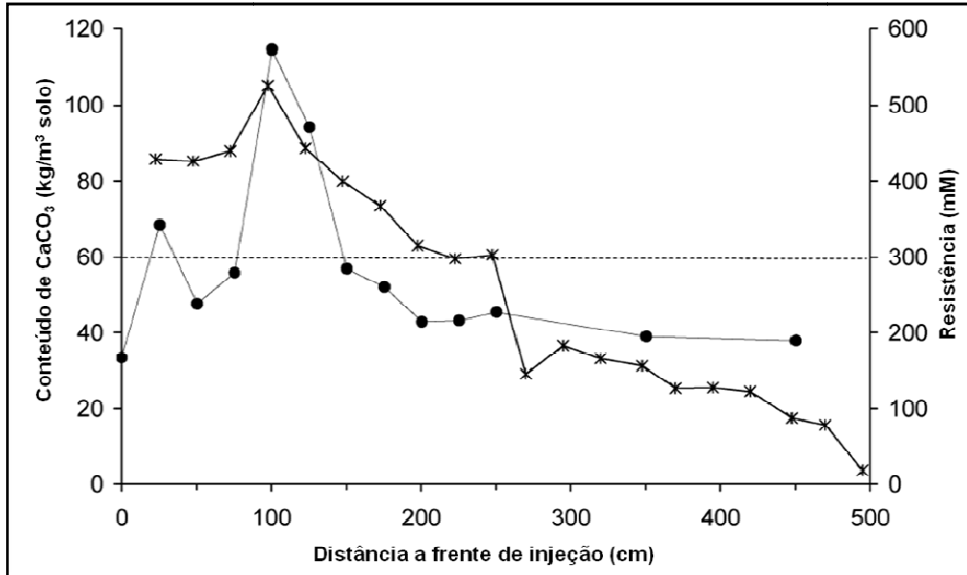


Figura 2.22. Conteúdo de cálcio (*) e resistência (•) ao longo da coluna de areia (Modificado de Whiffin *et al.*, 2007).

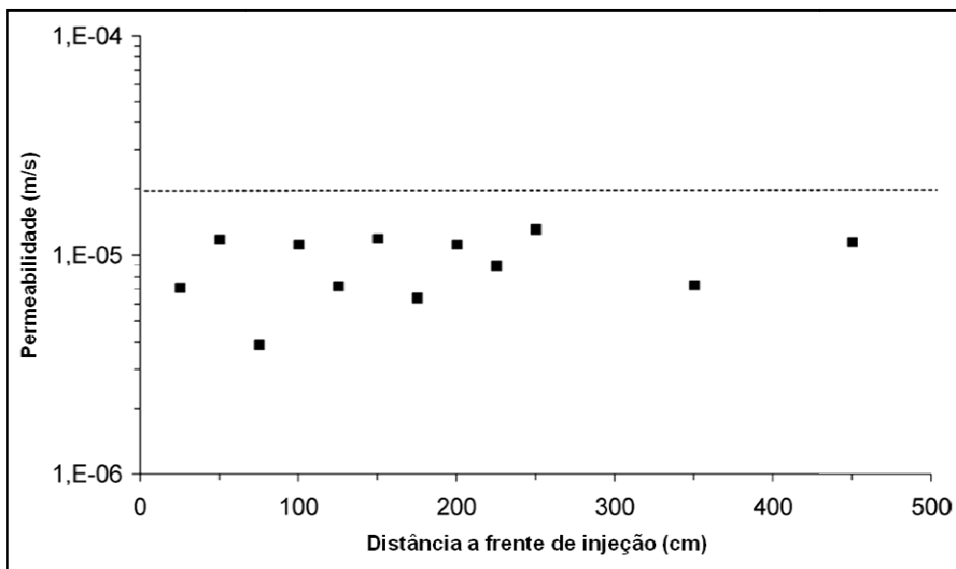


Figura 2.23. Variação da permeabilidade ao longo da coluna de areia (Modificado de Whiffin *et al.*, 2007).

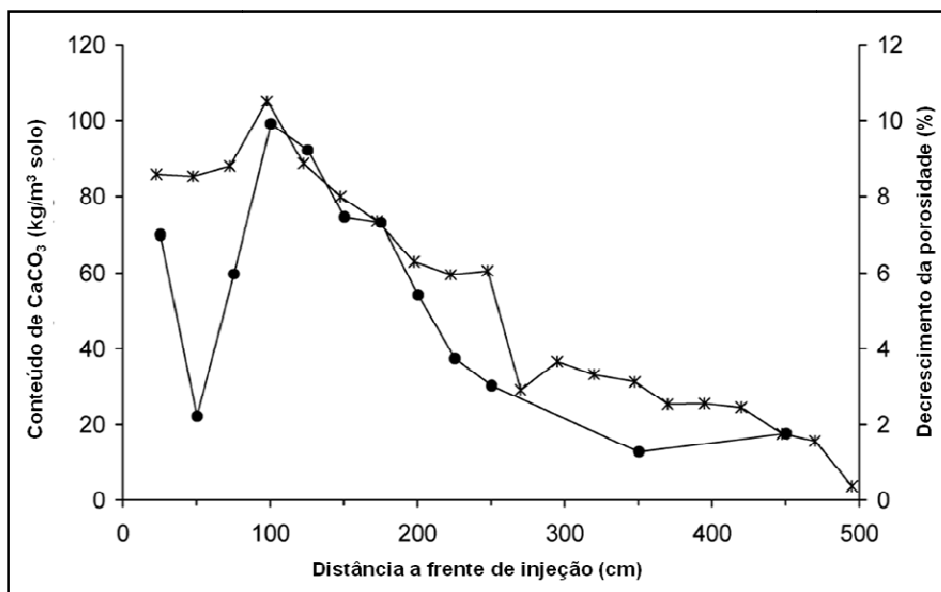


Figura 2.24. Conteúdo de cálcio (*) e decréscimo da porosidade (●) ao longo da coluna de areia (Modificado de Whiffin *et al.*, 2007).

Gómez (2009), em sua dissertação de mestrado no programa de pós-graduação da Universidade de Brasília, estudou a influência no comportamento mecânico de solos com fins rodoviários pela precipitação induzida de carbonato de cálcio. Neste trabalho concluiu que, o tratamento com o meio B4 (15g de acetato de cálcio, 4g de extrato de levedura e 5g de glicose, para 1000 ml de água destilada) não conduziu a melhorias significativas no comportamento mecânico do solo que justifiquem sua utilização em obras de pavimentação. Mas, em relação à resistência à tração, verificou-se que o tratamento proporcionou uma melhoria neste parâmetro relevante para o desempenho da estrutura do pavimento.

Existem diversas empresas que comercializam produtos como o “*Permazyme*”, “*Terrazyme*” e o “*Road Teach*”, que são aditivos elaborados a partir de extratos de plantas naturais mediante o uso da tecnologia de fermentação. A formulação final contém produtos provenientes de um processo metabólico microbial, incluindo enzimas. As moléculas interagem sobre os materiais finos orgânicos, eliminando a água mediante um processo catalítico, e produzindo um efeito de cimentação e compactação duradouro. O resultado é uma superfície menos permeável e com uma maior capacidade de suporte. Existem solos de obras tratados com estes produtos há mais de 10 anos, que ainda se encontram em ótimas condições (SECSA, GeoDelft, STASOIL, 2006).

Donald H. Gray (2001), citado por Gómez (2006), assinala que existem diversas vantagens ao usar microrganismos e não plantas, como por exemplo, a maior profundidade em que atuam, a maior tolerância destes às mudanças de umidade e ambientes tóxicos, a condições anaeróbicas e temperaturas extremas. E finalmente, os microrganismos têm maior capacidade de desenvolver-se dentro de poros pequenos.

2.3 - Erosão

Erosão é um termo que vem do latim (*erode*), que significa “corroer” e é um processo de degradação, desgaste, dissolução, remoção e transporte dos materiais da crosta terrestre pela ação de agentes naturais ou antrópicos (Lima, 2003).

De acordo com o Decreto Federal n. 97.62/89 da Legislação Ambiental Brasileira, citado por Oliveira (2005), o termo degradação é o “conjunto de processos resultantes de danos ao meio ambiente, pelos quais se perdem ou reduzem algumas propriedades, tais como: a qualidade ou a capacidade produtiva de recursos ambientais”. No mesmo trabalho, Oliveira diz que segundo Barow (1994), o termo degradação do solo é a redução da capacidade do solo, em termos quantitativos (erosão, movimento de massa, solução) e em termos qualitativos (diminuição de fertilidade, redução de nutrientes, mudanças estruturais, mudanças na aeração/umidade, mudanças químicas, salinidade, compostos, poluição química, mudanças na flora ou fauna do solo), bens e serviços.

A erosão dos solos enquadra-se em um dos grandes problemas no cenário mundial, principalmente pelo poder de destruição, promovendo situações de risco à população, ameaçando não só áreas agrícolas, mas áreas urbanas, destruindo loteamentos, habitações, estradas e obras (Martins & Souza, 2005).

É altamente preocupante o estado de erosão dos solos em consequência do manejo e uso inadequado dos mesmos. Uma grande parte dos municípios do Brasil apresenta problemas de degradação dos solos, podendo ser considerada como um dos mais importantes problemas ambientais dos nossos dias. O Distrito Federal, situado em região do cerrado, vem sendo atingido por diversos problemas de erosão, favorecido por sua geologia, geomorfologia e ocupação desordenada do solo (Lima, 2003).

Entre os principais fatores condicionantes para a aceleração dos processos erosivos se encontram fatores externos como o clima, a cobertura vegetal, a topografia e os tipos de solos e, fatores internos como o gradiente crítico, erosividade e erodibilidade do solo (Camapum de Carvalho, 2005). No entanto, o próprio homem é o grande responsável pela maioria desses processos e pela intensidade com que eles ocorrem.

- O clima: a ação das chuvas nas regiões tropicais é o principal responsável pelo processo de erosão, pois desagregam as partículas das camadas de solo que recobrem as rochas, fator também conhecido como erosividade da chuva (Oliveira, 2005). Segundo Bertoni & Lombardi (1999), as gotas de chuva são agentes que contribuem para o processo erosivo pelo menos de três formas: despreendendo as partículas de solo; transportando-as por salpicamento e imprimindo energia em forma de turbulência ao fluxo superficial.
- A cobertura vegetal: segundo Oliveira (2005), a cobertura vegetal é a defesa natural de um terreno contra a erosão porque protege contra o impacto das gotas, dispersa a água, melhora a estrutura do solo devido à adição da matéria orgânica, aumenta a infiltração pelos canalículos que formam as raízes no solo e diminui a velocidade de escoamento da enxurrada. Menor cobertura vegetal, maior velocidade de ação dos processos erosivos.
- A topografia: esta pode influir na velocidade dos processos erosivos. Maiores velocidades de escoamento e posterior erosão podem ser mais esperadas em relevos íngremes. Nas áreas com altas declividades há favorecimento da concentração e maiores velocidades de escoamento das águas aumentando a capacidade erosiva. A influência da topografia na erosão é analisada pela ponderação do fator declividade e comprimento da encosta (Oliveira, 2005).
- Os tipos de solo: este fator determina a susceptibilidade dos terrenos à erosão. As propriedades químicas, biológicas e mineralógicas do solo influem no estado de agregação entre partículas, aumentando ou diminuindo a resistência do solo à erosão (Oliveira, 2005).
- A ação antrópica: estes fatores são representados pelo desmatamento e formas de uso e ocupação do solo que deflagram o processo erosivo imediatamente, ou após de certo intervalo de tempo (Infante Jr. & Fonasari Filho, 1998; apud Oliveira, 2005).

Como foi visto anteriormente, a magnitude da erosão é afetada por vários fatores, como a erosividade e a erodibilidade do solo, sendo importante compreender que o termo

erosividade se refere à habilidade dos agentes erosivos, como água, de causar o destacamento e transporte do solo. O termo erodibilidade corresponde à falta de capacidade do solo em resistir aos processos erosivos (Camapum de Carvalho *et al.*, 2006).

Distinguem-se duas espécies de erosão: a erosão natural ou geológica e a erosão antrópica ou acelerada (Primavesi, 1952). Denomina-se erosão geológica, o processo erosivo que ocorre em ambientes com cobertura vegetal natural e sem pressão de fatores antrópicos, e manifesta-se de uma forma muito lenta, sendo perceptível somente com o decorrer de longos períodos de atividade (Bertoni & Lombardi, 1999). A erosão antrópica ou acelerada por vezes é utilizada como sinônimo de erosão por voçorocamento e derivada da concepção de que ravinas e voçorocas resultam da intervenção causada por atividades antrópicas (Camapum de Carvalho *et al.*, 2006).

As erosões antrópicas de origem hídrica são geralmente classificadas em três tipos principais: erosão superficial ou laminar, erosão interna e erosão linear. Nos três tipos de erosão o desprendimento e transporte das partículas de solo são visualmente notórios. Existe, no entanto, outro fenômeno associado ao fluxo da água, difícil de ser percebido, que, além de gerar a deterioração do maciço, contribui para a evolução da erosão, é o fenômeno da esqueletização (Camapum de Carvalho *et al.*, 2006).

Segundo Salomão & Iwasa (1995) e Salomão (1999), citados por Oliveira, (2005), a erosão laminar se caracteriza pelo escoamento superficial homogêneo e difuso, em grandes áreas, carreando camadas delgadas do solo, por meio de filetes de água. Estas águas escorrem encosta abaixo, lavando a superfície do terreno como um todo, sendo pouco visíveis os sinais no solo, mas perceptível com o aumento da turbidez da água do rio e da enxurrada e com o empobrecimento do solo ou com o assoreamento de áreas à jusante.

Segundo Salomão (1997) apud Oliveira (2005), as formas mais conhecidas de erosão interna é o *piping*. Este fenômeno provoca a remoção de partículas do interior do solo, formando canais que evoluem em sentido contrário ao do fluxo d'água, podendo dar origem a colapsos do terreno, os quais provocam desabamentos que alargam a voçoroca ou criam novos ramos ou braços.

Autores como Primavesi (1952), consideram a erosão interna muito perigosa, pois esta destrói a fertilidade do solo mais rapidamente. Este fenômeno se inicia a partir do momento em que, devido ao perecimento dos microorganismos responsáveis pela estabilidade do “complexo troca-adsorção” (complexo formado por substâncias de aglutinação como a fração argilosa, o ácido húmico e hidróxido de ferro e alumínio, que possuem caráter eletrolítico), desmorona-se a estrutura do solo. Para Primavesi, “a erosão é a consequência da morte dos microrganismos do solo”.

A erosão linear é o resultado das alterações do escoamento superficial causado pela concentração do fluxo das águas pluviais, devido à urbanização, e construção de estradas, entre outros, resultado de incisões na superfície do terreno. As principais feições que caracterizam a erosão linear são: sulcos, ravinas e voçorocas (boçorocas) (Iwasa & Fendrich, 1998).

A erosão em sulcos resulta, segundo Lima (2003), de pequenas irregularidades na declividade do terreno, fazendo com que a enxurrada se concentre em alguns pontos, atingindo volumes e velocidades suficientes para formar traços mais profundos ou menos profundos de até 10cm. A erosão nesse caso ocorre de maneira progressiva, seguindo a gravidade.

A erosão em ravinas são feições de maior porte (aprofundamento dos sulcos), com profundidade variável, de forma alongada e não atinge o nível d’água subterrânea, onde atuam mecanismos de desprendimento de material dos taludes laterais e transporte de partículas do solo. (CBH-AP, 1997; citado por Oliveira, 2005). Segundo Camapum de Carvalho *et al.* (2001), o termo ravina poderia ser aplicado para os canais com profundidade superior a 10cm, limitando-se a profundidade máxima de 50cm, ou àquela para qual começa a ocorrer instabilidade dos taludes por deficiência de coesão real, adotando-se o maior deles.

As voçorocas são o estado mais avançado e complexo da erosão e são canais esculpidos pelo afloramento do lençol freático, influenciados por fluxos d’água superficiais e subsuperficiais. As voçorocas surgem em consequência do aumento do gradiente

hidráulico, junto ao pé do talude, ao ser atingido e rebaixado o lençol freático em função da própria presença da erosão (Camapum de Carvalho, 2005).

Na Figura 2.25 é apresentada a morfologia dos processos de sulcos, ravinas e voçorocas.

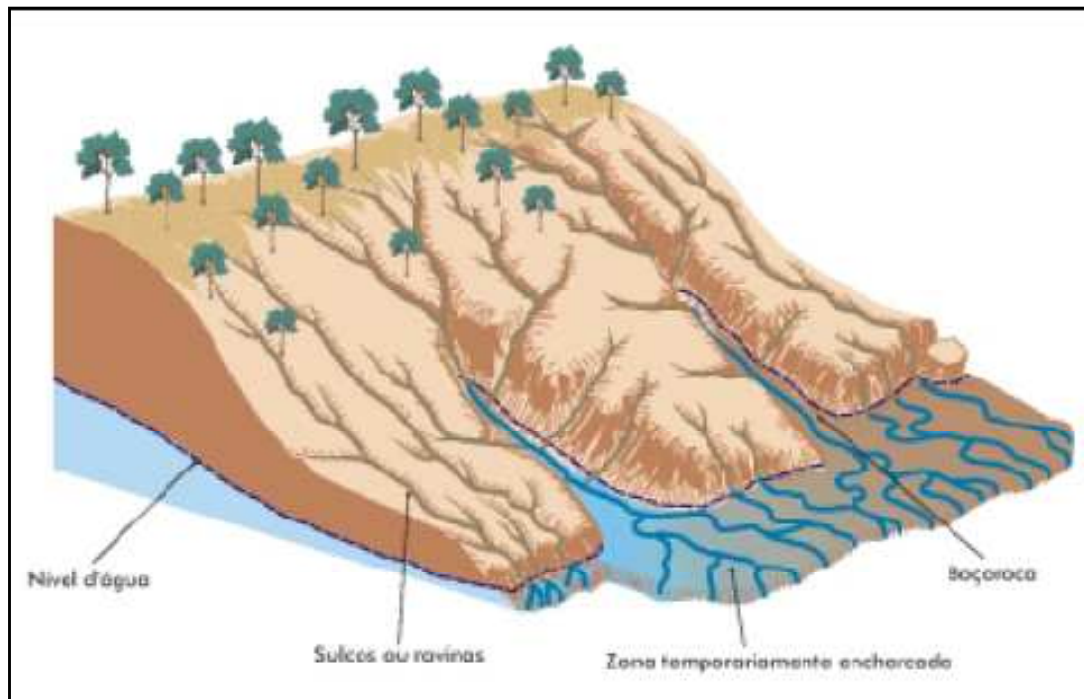


Figura 2.25. Formação de sulcos, ravinas e voçorocas (Teixeira, W. (2000); apud Lima, 2003).

Oliveira (1999) define como principais mecanismos atuantes no processo de formação de voçorocas, o deslocamento de partículas provocado pelas gotas de chuva, o transporte de partículas de solo pelo fluxo superficial e concentrado, erosão por quedas de água, solapamento de base de taludes, liquefação de matérias do solo, escorregamento de taludes e erosão interna.

- Transporte de partículas de solo pelo fluxo superficial e concentrado: normalmente as partículas menores podem ser transportadas por suspensão, dependendo da turbulência do fluxo e da velocidade de deposição da partícula. No caso das partículas maiores, elas são empurradas ou roladas provocando a erosão das outras partículas.
- Erosão por quedas de água: este fenômeno depende do regime de chuva, podendo ocorrer durante chuvas de alta intensidade e de baixa intensidade com longa duração e se

dá porque a água sempre procura se direcionar para locais de menor cota. Assim, quando existe algum processo erosivo em curso, todo fluxo superficial se direciona para ele, formando quedas de água que geram energia suficiente para provocar erosão na zona de impacto de partículas de solo.

- Solapamento de base de taludes: a lenta percolação da água junto às paredes dos taludes faz com que ocorra o solapamento da base dos mesmos. Quando essa porção de solo cai, impede o fluxo de água temporariamente, até atingir uma pressão de percolação capaz de vencer as resistências criadas, o que faz que o solo se desagregue e suas partículas sejam carregadas. O solapamento também pode ocorrer devido à erosão regressiva (*piping*), percolação de água no interior dos taludes e atuação do lençol freático.
- Liquefação de matérias de solo: a liquefação se manifesta quando os materiais de solo estão saturados. Quando o lençol freático fica exposto no interior da voçoroca, a surgência da água é difusa. De acordo com Rodrigues (1982), citado por Oliveira (2005), ela atua destacando partículas da face externa do talude e, progressivamente, também no interior do mesmo, originando uma liquefação, que forma um material movediço nas proximidades do pé do talude. Este material flui lentamente para a jusante, sendo carregado pela energia do curso de água que então se forma, ou é removido rapidamente pelas águas pluviais. Com este mecanismo, os taludes laterais, e mesmo as paredes da cabeceira das voçorocas, são solapadas.
- Escorregamento de taludes: os escorregamentos são uns dos principais movimentos em massa mais frequentes no Brasil, representados por movimentos rápidos bem definidos de uma porção do maciço, deslizando em relação ao restante, ao longo de uma superfície também definida, cujo centro de gravidade se desloca para baixo e para fora do talude.
- Erosão interna: surge devido ao aumento da taxa de infiltração ou do gradiente hidráulico, o que provoca a formação de canais de fluxo no interior do solo.

Lima (2003) verificou que nas diversas cidades satélites da região do Distrito Federal os solos são fortemente afetados por problemas de erosão, onde as voçorocas são bastantes características e diferenciadas das normalmente apresentadas em outras regiões do país. Mortari & Camapum de Carvalho (1994) argumentam que, para as voçorocas do Distrito Federal, a estabilidade dos taludes e seu processo evolutivo dependem de como variam os parâmetros de resistência com o perfil de umidade. Igualmente, Lima (2003) mostrou

como as propriedades físico-químicas e mineralógicas dos solos sofrem influência do fluxo em consequência do processo de voçorocamento.

De acordo com afirmações feitas por Camapum de Carvalho *et al.* (2001), embora a erosão laminar possa ocorrer na implantação de loteamentos, as formas mais ameaçadoras de erosão em áreas urbanas são as ravinas e voçorocas.

Existem outras formas de erosão citadas na literatura como a erosão em pedestal, que ocorre quando o solo erodível é protegido da erosão em *splash*, seja por uma pedra ou pela raiz de uma árvore, isolando pedestais. A erosão em pináculo, que deixa altos pináculos isolados, é usualmente relacionada com a dificuldade do solo em ser erodido. E a erosão da fertilidade do solo, que é a perda dos nutrientes das plantas, por diluição na água, sem ocorrer qualquer remoção física do solo (Camapum de Carvalho *et al.*, 2006).

A esqueletização é o processo de degradação física do solo que surge como consequência do transporte de partículas, de compostos ou elementos químicos solubilizados. Este processo é muito perigoso, não só porque deixa de ser reconhecido, mas também porque compromete a estabilidade de maciços em termos geomecânicos, como a estabilidade de taludes de ravinas e voçorocas (Camapum de Carvalho *et al.*, 2006).

3 – CARACTERÍSTICAS DA ÁREA DE TRABALHO

Como a pesquisa pretende mitigar os processos erosivos por meio de biomineralização, optou-se pela eleição de um local afetado por estes processos, especificamente, neste caso o voçorocamento. O perfil de solo selecionado se localiza no Distrito Federal - Brasil, na cidade satélite de Santa Maria, a 20m da margem da voçoroca que leva o mesmo nome (Figura 3.1).

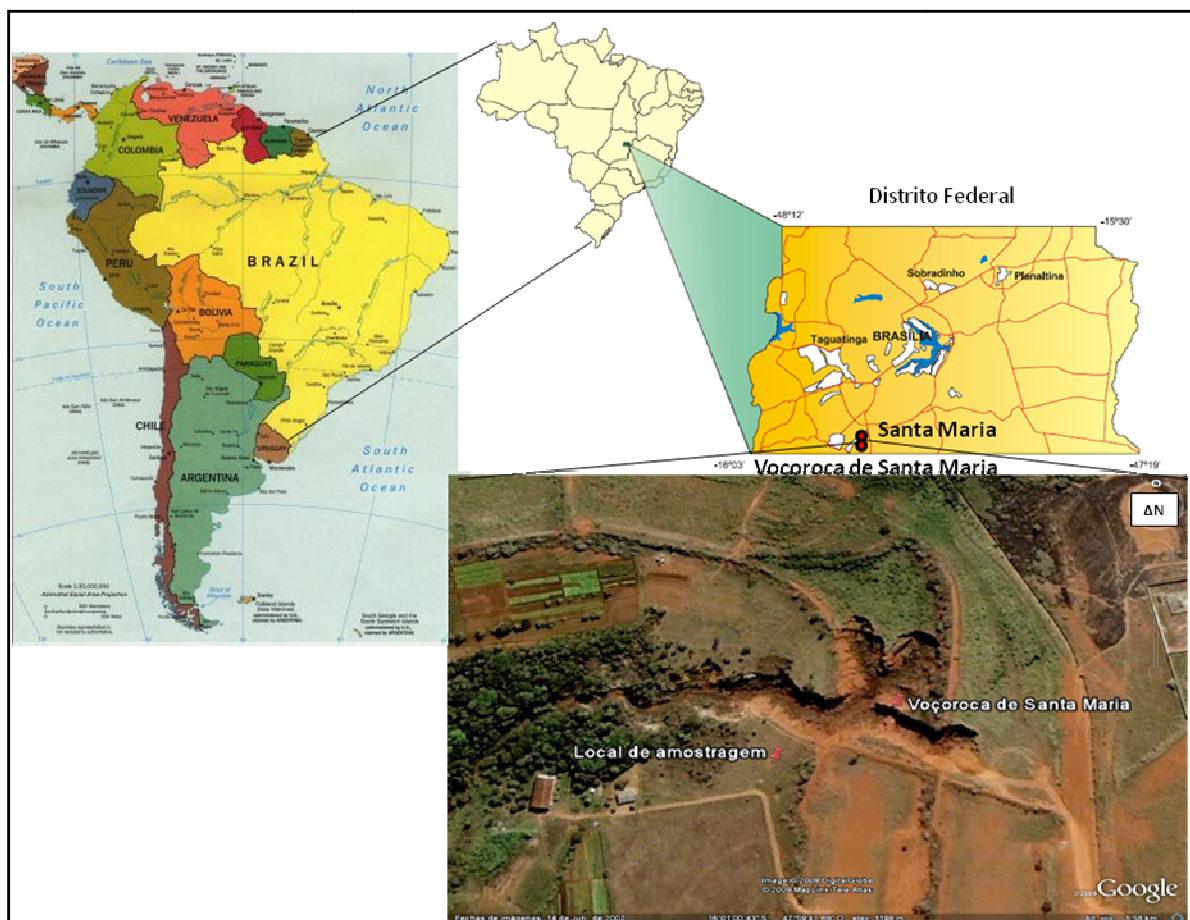


Figura 3.1. Mapa de localização do perfil de estudo (Imagem sem escala obtida do “Google Earth”, da página “postaisdazezinha.blogspot.com” o dia 31 de maio de 2009 e de Souza *et al.*, 2004).

O Distrito Federal está situado no Planalto Central do Brasil, dentro de um quadrilátero limitado ao norte pelo paralelo de $15^{\circ}30'S$, ao sul pelo paralelo $16^{\circ}03'S$, ao leste pelo Rio Preto e ao oeste pelo Rio Descoberto. Geologicamente, segundo Faria (1993) apud Lima (2003), a região do Distrito Federal apresenta uma cobertura detrito-laterítica terciária,

sobre rochas Pré-Cambrianas, predominando ardósias, quartzitos, meta-arenitos e metarritmitos do Grupo Paranoá. O Grupo Paranoá cobre praticamente toda a área do Distrito Federal.

Os tipos de solos predominantes no Distrito Federal são os Latossolos vermelhos-escuros e vermelhos-amarelos e o Cambissolo. A laterização se caracteriza por ser o processo pedogenético que controla a formação de seus solos. As unidades geomorfológicas agrupam-se na Região de Chapada, a Área de Dissecação Intermediária e a Região Dissecada de Vale (Lima, 2003).

Com relação ao clima, HIDROGEO (1990) apud Souza *et al.* (2004), informou que atualmente é caracterizado pela existência de duas estações, uma chuvosa e quente, entre outubro e abril, e outra, fria e seca, de maio a setembro. A média pluviométrica anual varia entre 1500mm e 2000mm, sendo a média de 1600mm (EMBRAPA, 1978 apud Souza *et al.*, 2004). A temperatura média anual varia entre 13°C e 22°C e a umidade relativa pode variar entre 11% e 75%. Sua vegetação é predominantemente do cerrado, constituída desde ervas espalhadas até árvores de grande porte (Lima, 2003).

A voçoroca de Santa Maria se localiza entre as coordenadas de latitude 16°1'0.66''S e longitude 47°59'46.13''W. Segundo Lima (2003), esta voçoroca se situa na unidade geológica do metarritmito arenoso do Grupo Paranoá. O metarritmito arenoso está composto por intercalações de quartzitos finos a médios, metassiltitos e ardósias (Figura 3.2). A espessura máxima desta unidade pode chegar a 150m (Souza *et al.*, 2004).

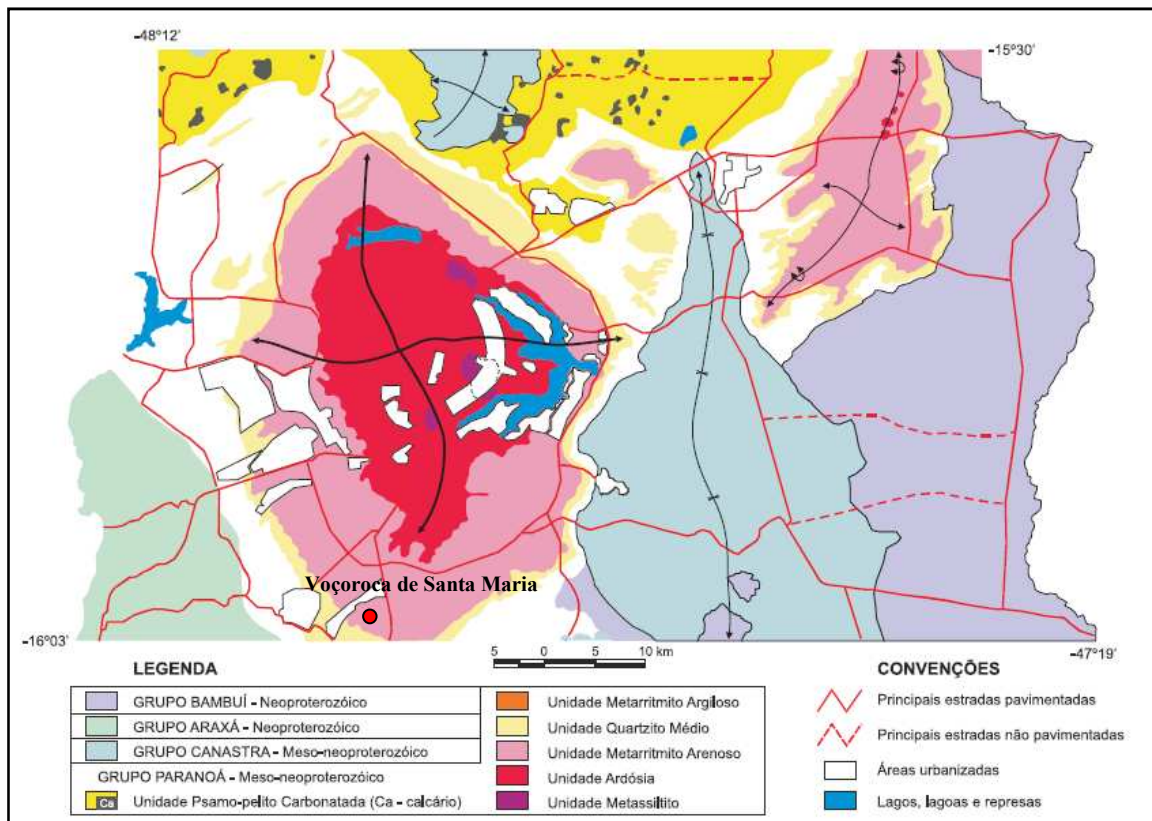


Figura 3.2. Localização da voçoroca de Santa Maria dentro do mapa geológico do Distrito Federal (Segundo Freitas-Silva e Campos (1999) apud Souza *et al.*, 2004.)

A partir do mapa pedológico (Figura 3.3), apresentado pela EMBRAPA (1978) apud Souza *et al.* (2004), os solos que compõem a voçoroca de Santa Maria se caracterizam por serem Latossolos vermelhos-escuros e vermelhos-amarelos, resultado de um alto grau de intemperização e lixiviação, formando uma estrutura porosa, metaestável, com índice de vazios altos e pesos específicos baixos, bastante permeáveis e de acentuados a fortemente drenados. Estes solos, segundo Lima (2003), são pouco suscetíveis à erosão, mas a ação do escoamento concentrado e/ou declive acentuado das encostas, assim como a própria ação humana, facilita o surgimento das ravinas e voçorocas.

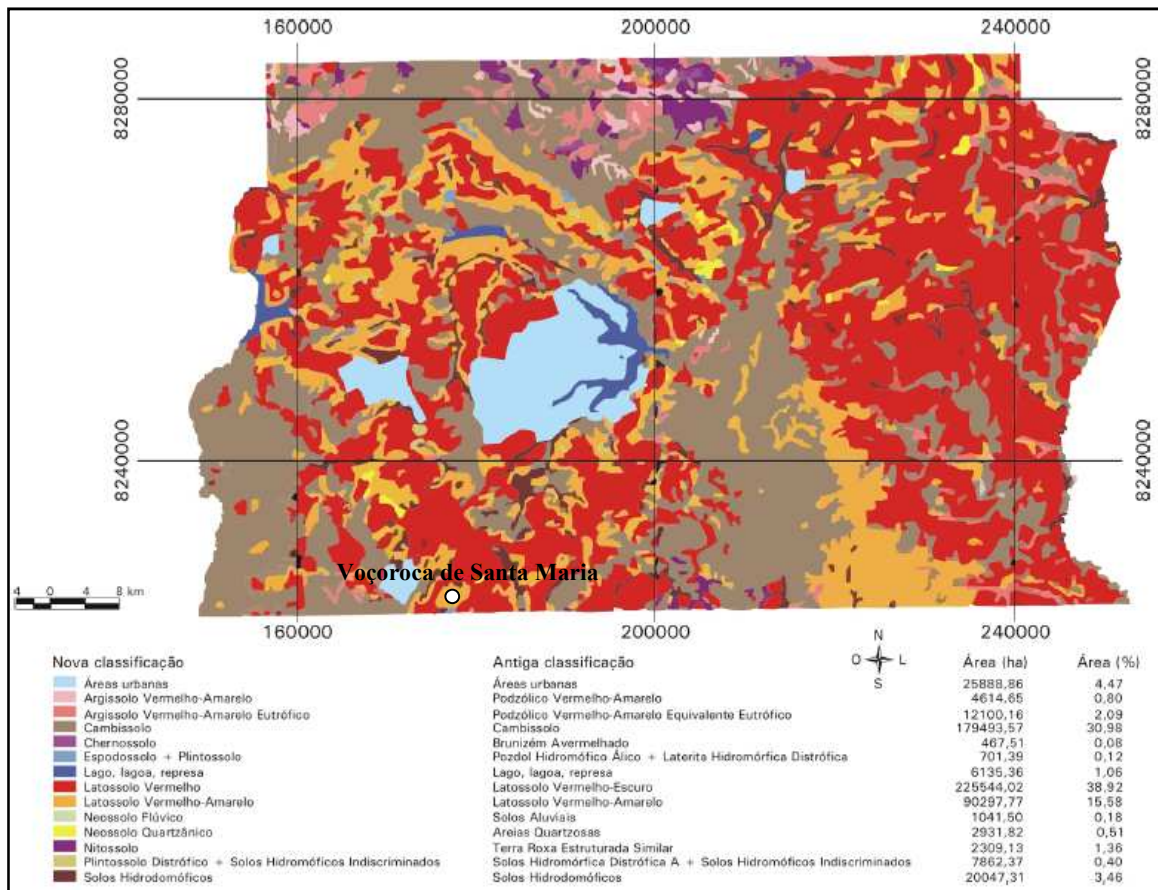


Figura 3.3. Localização da voçoroca de Santa Maria dentro do mapa pedológico do Distrito Federal (segundo EMBRAPA (1978) apud Souza *et al.*, 2004).

De acordo com a proposta de Novaes Pinto (1993) apud Lima (2003), geomorfologicamente a voçoroca da Santa Maria encontra-se dentro da unidade da Chapada da Contagem (Figura 3.4). Esta Chapada é a mais elevada do Distrito Federal com cotas médias acima de 1200m (Figura 3.5).

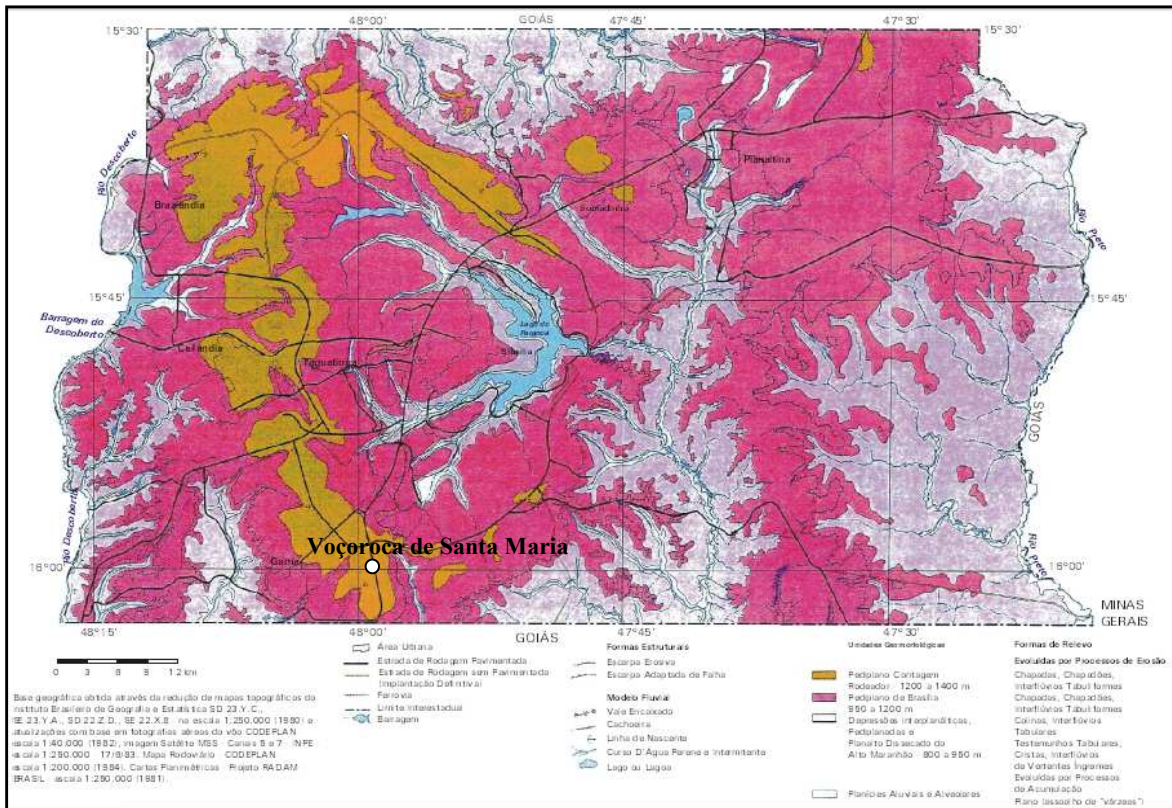


Figura 3.4. Localização da voçoroca de Santa Maria no mapa geomorfológico do Distrito Federal (Segundo CODEPLAN (1984) apud Souza *et al.*, 2004).

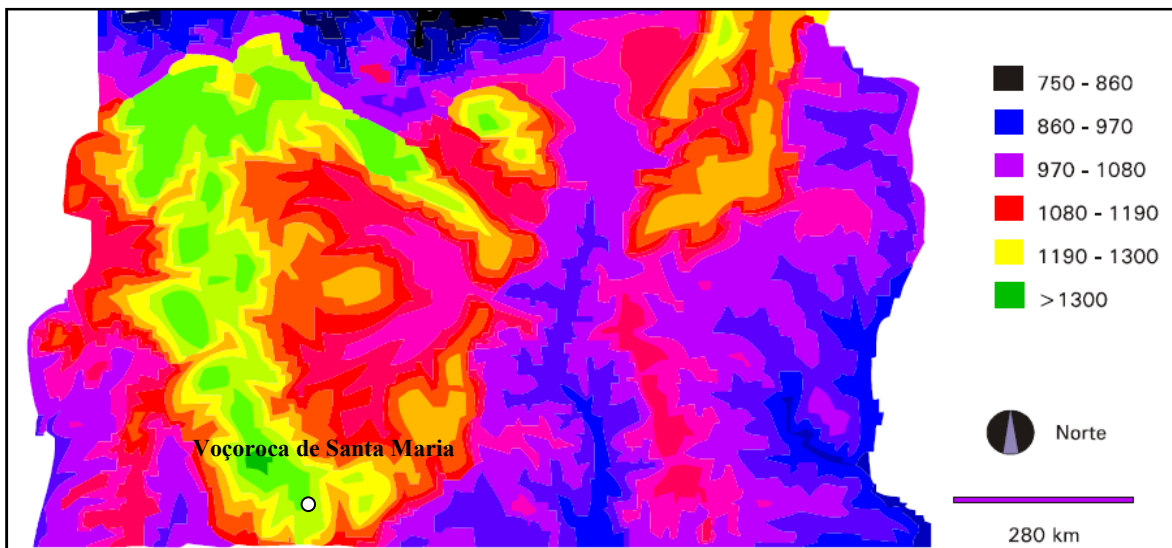


Figura 3.5. Localização da voçoroca de Santa Maria no mapa de modelo numérico altimétrico do Distrito Federal (Souza *et al.*, 2004).

Climatologicamente, segundo CODEPLAN (1984) apud Lima (2003), a voçoroca encontra-se na Chapada da Contagem, que apresenta um clima de tipo “Tropical de

Altitude Cwb' , o qual no mês mais frio apresenta temperatura inferior a 18°C e no mês mais quente superior a 22°C .

Segundo Lima (2003), a região de Santa Maria era utilizada como uma represa das águas da nascente do Ribeirão Santa Maria e das águas pluviais que descem das quadras da cidade satélite de Santa Maria. Aproximadamente no ano 2002, o fluxo de água rompeu o barramento, produzindo a voçoroca de Santa Maria. Esta voçoroca na atualidade apresenta grandes dimensões, com aproximadamente 20m de profundidade e até 30m de largura em alguns trechos e com extensão de no máximo 150m, com pelo menos três braços ativos. As paredes são sub-verticais com inclinações entre 70° a 80° . Sua forma é em “U” e verificam-se ao longo de seu comprimento, surgências de água e fenômenos de *piping*, o que faz que a voçoroca continue em evolução. A pouca cobertura vegetal da zona e a declividade do terreno ($<8,5\%$) contribuem para o avanço da voçoroca (Figura 3.6).



Figura 3.6. Voçoroca de Santa Maria (Imagem a escala real obtida o dia 17 de abril de 2006).

Lima (2003), na sua pesquisa de doutorado, descreve esquematicamente o perfil da voçoroca, o qual se apresenta na Tabela 3.1.

Tabela 3.1. Perfil esquemático da voçoroca de Santa Maria (Obtida de Lima, 2003)

Profundidade (m)	Descrição
0,0 – 0,8m	Solo argilo-arenoso amarelo com uma camada superficial de matéria orgânica.
0,8m – 4,0m	Latossolo Vermelho-escuro pouco roxo, intercalado com um solo de cor cinza esbranquiçado com camada de lateritas na base.
4,0m – 13,0m	Solo saprolítico vermelho
13,0m	Metarritmito arenoso com presença do lençol freático

Cabe ressaltar que na amostragem realizada no mês de abril de 2006 para esta pesquisa, o lençol freático apresentou-se aos 6m de profundidade. Por este motivo, a amostragem só foi possível até tal profundidade. Adicionalmente, até os 6m de profundidade foram identificadas cinco camadas diferentes de material, baseadas nas mudanças de umidade, índices de plasticidade e análise química, realizadas a cada 0,5m. Então, o perfil de trabalho se dividiu em cinco níveis de solo de 0 a 1,5m, de 1,5m a 2,5m, de 2,5m a 3,5m, de 3,5m a 4,5m e de 4,5m a 6,0m.

4 – MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo será apresentada a forma como se desenvolveu a coleta das amostras de campo e todos os procedimentos utilizados durante a execução dos ensaios.

4.1 – COLETA DE AMOSTRAS EM CAMPO

Na voçoroca de Santa Maria foram realizadas coletas de amostras a 20m da margem da voçoroca (Figura 4.1), latitude 16°1'1.90''S – longitude 47°59'48.5''W. Esta amostragem foi realizada três vezes durante a mesma época do ano (17/04/06, 09/04/07, 15/04/08) para manter as condições climáticas o mais similar possível.

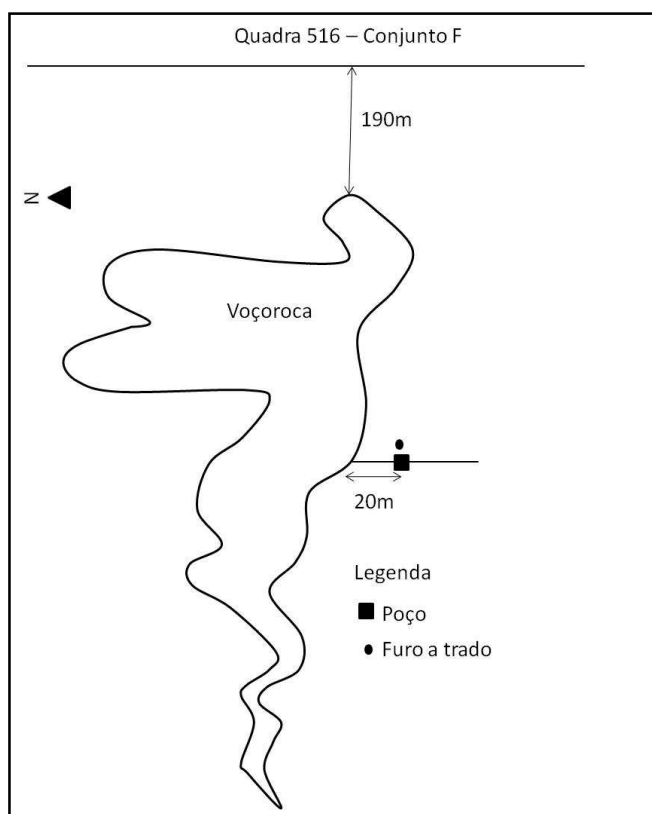


Figura 4.1. Croqui em planta da retirada de amostras da voçoroca de Santa Maria (Sem escala).

Foram coletadas amostras de solo deformadas com ajuda do trado manual a cada 0,5m (Figura 4.2), mas como foi descrito no capítulo 3, as camadas foram divididas em zonas homogêneas de 0 a 1,5m, de 1,5m a 2,5m, de 2,5m a 3,5m, de 3,5m a 4,5m e de 4,5m a

6,0m. Não foi possível um maior avanço pela presença do lençol freático. Estas amostras foram colocadas em sacolas plásticas, levadas para a câmara úmida do laboratório de geotecnia da UnB, até seu emprego na realização dos ensaios de determinação do teor de umidade, peso específico dos grãos, limites de Atterberg, Miniatura Compactada Tropical (MCT) expedita, granulometria, caracterização química, mineralógica e microbiológica.



Figura 4.2. Imagem coleta de amostras com ajuda do trado manual (Imagem obtida o dia 17 de abril de 2006).

Adicionalmente, coletaram-se dois blocos de solo inalterado de 0,3m x 0,3m x 0,3m a cada metro de profundidade (1m, 2m, 3m, 4m e 5m), um ao lado do outro (data: 09/04/07 e 15/04/08). Após serem esculpidos os blocos, pincelaram-se com parafina suas faces, cobriu-se com uma tela do tipo tarlatana e colocou-se novamente parafina para aderir a tela aos blocos. Posteriormente, colocaram-se numa caixa de madeira repetindo o processo de cobrir a fase faltante com parafina e a tela (Figura 4.3). Os blocos foram levados e colocados na câmara úmida do laboratório de geotecnia da UnB.



Figura 4.3. Coleta de blocos (Imagem a escala real obtida de Gomes, 2006)

Um dos blocos em cada profundidade foi utilizado para a execução dos ensaios de caracterização mecânica sem nutriente, como permeabilidade, compressão simples, resistência à tração indireta, resistência ao cisalhamento, sucção total e matricial, adensamento duplo-edométrico, “*Pinhole test*” e degradação. O bloco restante foi usado para a adição do nutriente mais apropriado para a precipitação do carbonato de cálcio, de acordo com as condições descritas no item 4.3 pag. 62, e posteriormente realizar em eles os mesmos ensaios feitos nos solos sem nutriente.

4.2 – CARACTERIZAÇÃO MICROBIOLÓGICA

Todos os trabalhos relacionados com microbiologia foram desenvolvidos no laboratório de Microbiologia da Faculdade de Alimentos e Medicina Veterinária da UnB. Estes trabalhos consistiram em identificar inicialmente as bactérias presentes nos solos e preparar os meios precipitadores.

Para identificar as bactérias do solo, primeiro se deve tomar para cada uma das amostras de solo alterado, pelo menos 20g, procedendo ao isolamento das bactérias nativas presentes no perfil. Para cada camada se colocou 10g deste solo em uma sacola autoclavada, com 90ml de água peptonada, para se fazer uma diluição de 1:10. Desta mistura, foi tomado e diluído 1ml, homogeneizando-se com 9 ml de água tamponada (diluição 1:100). Cada diluição foi incubada em estufas a 25°C durante 24 horas e, posteriormente, distribuídas

em forma de estrias com alça de platina, em placas com ágar nutriente e com ágar sangue (Figura 4.4).

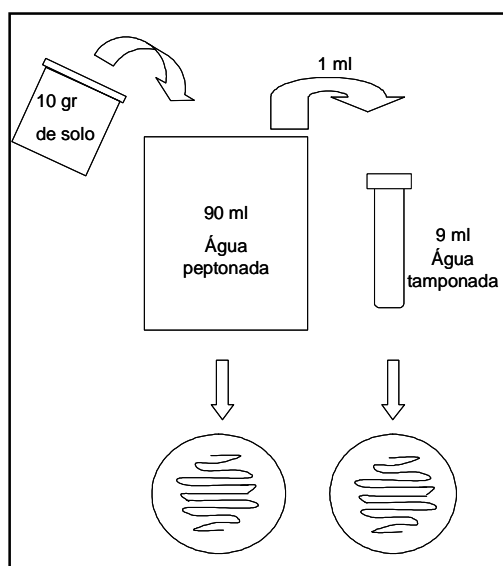


Figura 4.4. Esquema do método de diluição para isolamento das bactérias.

Para cada bactéria diferente, identificada visualmente, foram confeccionadas duas placas que permitiram a análise de microrganismos aeróbios e anaeróbios. As placas para análise de microrganismos aeróbios foram incubadas por 2 dias em estufa a 25°C. Para a análise de microrganismos anaeróbios, utilizou-se a jarra de anaerobiose (Figura 4.5). Este sistema permite obter uma atmosfera adequada para a multiplicação destas bactérias. As bactérias que cresceram dentro da jarra foram logo colocadas em ágar sangue, e incubadas aerobiamente para ver se eram anaeróbias estritas ou facultativas. Estes procedimentos devem ser executados dentro de uma câmara de fluxo para prevenir a contaminação das amostras.



Figura 4.5. Jarra de anaerobiose (Imagem a escala real obtida o dia 26 de novembro de 2009).

A identificação de um isolamento bacteriano pode realizar-se utilizando diferentes combinações de características e critérios na avaliação de similitudes. Os ensaios bioquímicos geralmente determinam a atividade de uma via metabólica (conjunto de reações químicas) a partir de um substrato que se incorpora num meio de cultura e que a bactéria ao crescer transforma ou não. É por isso que na maioria dos casos tem-se que preparar um substrato ou meio seletivo específico para uma determinada característica da bactéria. A definição e metodologia das provas bioquímicas efetuadas nesta pesquisa para a identificação das bactérias foram obtidas em:

www.microinmuno.qb.fcen.uba.ar/SeminarioPruebasBioquimicas.htm (23/05/06),

ww.ucm.es/info/mfar/pdfs/GuiaMicro3.pdf (23/05/06),

www.microbiologia.ufba.br/aulas/provasbioquimicas.doc (03/11/06). E são descritas a continuação.

1. Coloração por GRAM: os microrganismos diferem física e quimicamente entre si, por isso apresentam reações diferentes a um determinado processo de tingimento. Por este método, as bactérias se classificam em Gram positivas e Gram negativas. As células previamente fixadas numa lâmina de microscópio são tingidas com cristal violeta, lavadas com água, tratadas com lugol e, por último, lavadas com álcool. Alguns microrganismos são descolorados (Gram -) e outros não (Gram +). Finalmente, coloca-se safranina, que tornam visíveis as bactérias Gram (-): as bactérias Gram (+) adquirem cor azul-roxa e as Gram (-) cor rosa (Figura 4.6).

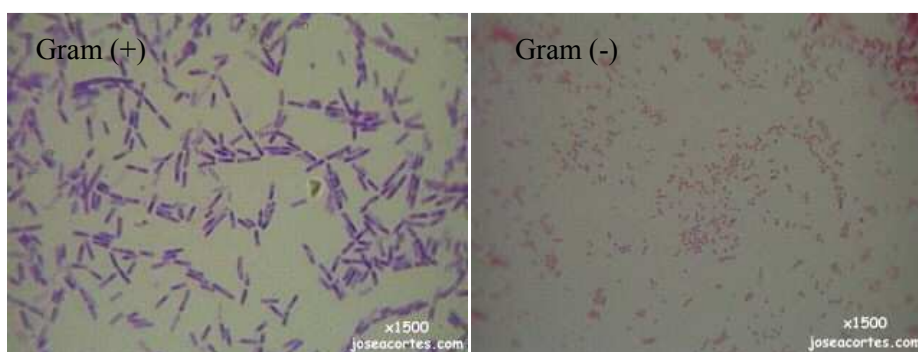


Figura 4.6. Prova coloração por Gram (Imagem obtida de <http://www.joseacortes.com/praticas/tinciongram.htm>, o dia 04/06/09).

2. Gram com KOH 3%: A técnica da coloração de Gram não é infalível, podendo-se fazer o teste do hidróxido de potássio (KOH) para confirmar os resultados. Em uma lâmina de

microscópio adicionam-se duas gotas de uma solução de KOH a 3%. Com o auxílio de uma alça de sementeira coleta-se uma colônia isolada da bactéria a ser testada, e mistura-se com a solução de KOH na lâmina por 30 segundos. Durante a mistura deve-se erguer a alça de sementeira cerca de 1cm a 2cm da superfície da lâmina, observando se há fios de material viscoso pendentes. Se a bactéria for verdadeiramente Gram-negativa, o KOH irá romper sua parede celular e liberar seu DNA, que será observado como fios viscosos. Se a bactéria for Gram-positiva não haverá a formação de fios.

3. Produção de Catalase: existem bactérias que contêm enzimas capazes de atuar sobre a água oxigenada (peróxido de hidrogênio 3 a 5%) desdobrando-la em oxigênio e água. A prova é feita colocando uma gota de solução aquosa de peróxido de hidrogênio a 3-5% numa lâmina e, em seguida, com uma alça de platina, coloca-se uma porção do crescimento bacteriano sobre a gota. A prova é considerada positiva quando há borbulhamento ou efervescência devido à liberação do oxigênio (Figura 4.7).

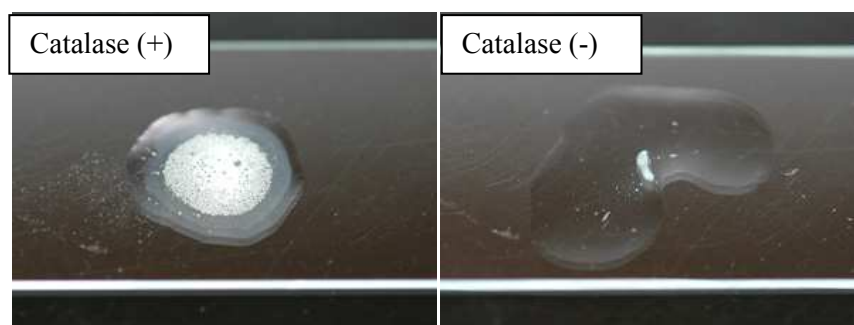


Figura 4.7. Prova de catalase (Imagem obtida de <http://www.hardydiagnostics.com/catalog2/hugo/CatalaseReagent.htm> o dia 04/06/09).

4. Prova de Oxidase: este sistema enzimático está relacionado com os citocromos da cadeia respiratória de alguns microrganismos. A prova consiste em colocar várias colônias do microrganismo, utilizando uma alça de platina, em tiras de papel para teste de oxidase. A prova é considerada positiva quando se desenvolve a cor púrpura em até 1 minuto. Na reação negativa não há desenvolvimento de cor púrpura (Figura 4.8).



Figura 4.8. Prova de oxidase (Imagem obtida de http://depa.pquim.unam.mx/amyd/archivero/3c.PruebasBioquimicas_7308.pdf o dia 04/06/09).

5. Prova em ágar MacConkey: nesta prova a bactéria é estriada no meio seletivo e diferencial MacConkey que contém cristal violeta para inibir o crescimento de cocos Gram (+) e o vermelho neutro como indicador do pH, que outorga propriedades diferenciais. Os *Bacillus* Gram (-) se desenvolvem facilmente; os fermentadores de lactose produzem metabolismo ácido, que diminui o pH do meio próximo à colônia tornando-se vermelho neutro a amarelo/alaranjado (Figura 4.9).



Figura 4.9. Prova positiva em ágar MacConkey (Imagem obtida de <http://antibios.com/moodle/course/view.php?id=10> o dia 04/06/09).

6. Prova TSI (Triplo açúcar ferro): é uma prova que usa um meio de cultura diferencial baseado na capacidade das bactérias de fermentar carboidratos, produzir H₂S e gás. O meio é semeado com agulha na base e estrias na superfície. Após o crescimento da bactéria podem-se observar os seguintes resultados: 1) a bactéria não fermenta qualquer dos açúcares, ficando inalterado o meio com coloração vermelha; 2) fermenta somente a

glicose, de tal sorte que os ácidos formados mudam o pH do meio apenas na base, que se torna amarela e a inclinação vermelha por utilização dos aminoácidos (por descarboxilação), alcalinizando a mesma e neutralizando a pequena quantidade de ácidos, pois a concentração de glicose é baixa (0,1%); 3) fermenta a lactose 1% ou a sacarose 1% mudando o indicador de todo o meio para amarelo, tanto a base como a inclinação permanecem ácidas, pois os álcalis produzidos na inclinação são facilmente neutralizados pela grande quantidade de ácidos produzidos na base; 4) há também a possibilidade da bactéria produzir H₂S. O sulfeto de hidrogênio na presença de sais de ferro forma sulfeto ferroso, originando um precipitado negro insolúvel (Figura 4.10).



Figura 4.10. Prova de TSI (Imagem obtida de www.scribd.com/doc/5203044/Medios-de-Cultivo-y-Pruebas-Bioquimicas o dia 04/06/09).

7. Prova de oxidação/Fermentação: é uma prova que permite determinar o tipo de metabolismo oxidativo ou fermentativo que tem a bactéria sobre um hidrato de carbono. Dois tubos com meio OF são semeados com a bactéria e um deles é selado com óleo estéril. Depois de incubados 24 horas ou mais como a oxidação de carboidratos é um processo estritamente aeróbio, e a fermentação é um processo que não requer oxigênio. Se só o tubo aberto assumir cor amarela, indica a oxidação de carboidratos e, se os dois tubos ficarem amarelos considera-se fermentação de carboidratos ou fermentação e oxidação. A não mudança de cor ou uma coloração azul indicam que a bactéria é não reativa (Figura 4.11).

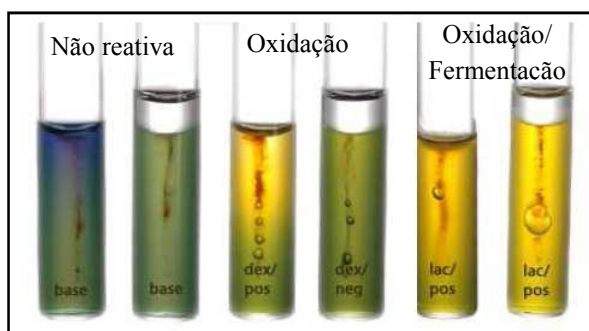


Figura 4.11. Prova de oxidação/Fermentação (Imagem obtida de http://depa.pquim.unam.mx/amyd/archivero/3c.PruebasBioquimicas_7308.pdf o dia 04/06/09).

8. Prova com Indol: prova que mede a capacidade da bactéria de produzir Indol a partir da molécula de triptofano. A prova é realizada inoculando-se a bactéria no meio contendo excesso de triptofano. Após a incubação, colocar 0,5ml do reativo de Ehrlich através da parede interna do tubo. A prova é positiva quando na porção superior, i.e., na interface da cultura com o reagente, desenvolve-se um anel de cor rosa dentro de no máximo 5 minutos. Este resultado é devido ao complexo do Indol com o aldeído, em meio ácido, formando o composto colorido. A prova é negativa com qualquer outra tonalidade de cor (Figura 4.12).

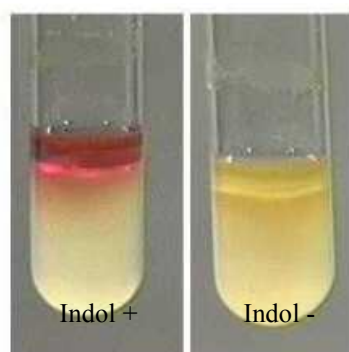


Figura 4.12. Prova com Indol (Imagem obtida de http://depa.pquim.unam.mx/amyd/archivero/3c.PruebasBioquimicas_7308.pdf o dia 04/06/09).

9. Produção de Urease: a urease é uma enzima que degrada a uréia em duas moléculas de amônia e uma de anidrido carbônico. A prova consiste em transferir uma porção do crescimento bacteriano, com uma alça, para o meio contendo uréia, pH neutro e um

indicador de pH, o vermelho fenol. Após o crescimento, a prova é revelada positiva quando a urease degrada a uréia alcalinizando o meio, o qual toma uma coloração rosa. Na prova negativa não há alteração da cor do meio (Figura 4.13).



Figura 4.13. Produção de Urease (Imagem obtida de <http://www.joseacortes.com/microbiologia/pruebasbioq/index.htm> o dia 04/06/09).

10. Fermentação de Manitol: esta prova utiliza um meio seletivo de bactérias Gram (+), pois contém polimixina B, que inibe o crescimento da maioria das bactérias Gram (-). Além disso, trata-se de um meio diferencial, que permite detectar as espécies fermentadoras de manitol. Coloca-se o inóculo da bactéria no meio com caldo de fenol-manitol e cobrindo com óleo mineral estéril. Deve-se incubar no mínimo durante 24 horas a 36°C. Após este período, observa-se a mudança de coloração do meio; quando passar de vermelho para amarelo, indica a fermentação do manitol.

11. Prova de redução de Nitrato: determina a capacidade da bactéria de reduzir o nitrato a nitrito ou gás. Tubos com caldo nitrato são semeados com as bactérias e inoculados por 24 horas a 25°C. Posteriormente, agrega-se diretamente ao cultivo 1ml de solução de dimetilnaftilamina 0,6% e 1ml de solução de ácido sulfanílico ao 0,8%, agita-se bem e espera-se 30 segundos. A prova é considerada positiva quando aparece uma cor rosa ou vermelha, e é considerada negativa quando não é observada mudança na coloração (Figura 4.14).



Figura 4.14. Prova redução de Nitrato (Imagem obtida de http://depa.pquim.unam.mx/amyd/archivero/3c.PruebasBioquimicas_7308.pdf o dia 04/06/09).

12. Produção de descarboxilase e de desidrolase de aminoácidos: muitas espécies de bactérias possuem enzimas capazes de descarboxilar ou desidrolisar aminoácidos específicos como arginina, lisina e ornitina em um determinado meio de prova, com o qual liberam aminas de reação alcalina e CO_2 . A prova consiste em inocular a bactéria em três tubos contendo caldo de arginina, lisina e ornitina. Adicionalmente, deve ser semeado também um tubo de meio base que servirá como controle negativo. A seguir, cobre-se os tubos com 1ml de óleo mineral esterilizado, e incuba-se a 36°C por no máximo 4 dias. Examinar os tubos todos os dias. Durante o período de incubação, caso a cor dos meios se torne amarela significa que ocorreu fermentação da glicose. No caso da ornitina e da lisina, indica que ocorreu a descarboxilação de cada uma e para o caso da arginina, indica que ocorreu sua hidrólise. O meio retorna a cor púrpura devido à produção de aminas primárias e dióxido de carbono. Se o tubo de controle, sem aminoácido, virar para amarelo e assim permanecer, a prova é considerada positiva (Figura 4.15).



Figura 4.15. Prova positiva de descarboxilasis e de deshidrolasis de aminoácidos (Imagem obtida de http://depa.pquim.unam.mx/amyd/archivero/3c.PruebasBioquimicas_7308.pdf o dia 04/06/09).

13. Prova de hidrólise da gelatina: determina a produção da enzima de gelatinase, a qual produz a hidrólise da gelatina. A prova é considerada positiva se o meio com a bactéria semeada não endurece depois de 5 minutos na geladeira, e é considerada negativa se o meio endurece (Figura 4.16).

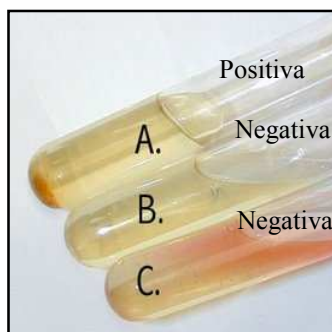


Figura 4.16. Prova de hidrólise da gelatina (Imagem obtida de <http://microbiologiabrasil.blogspot.com/2009/01/prova-vermelho-de-metila-mr.html> o dia 04/06/09).

14. Prova do Vermelho de Metila (VM): esta prova é efetuada para determinar a capacidade do microrganismo de oxidar a glicose com produção e estabilização de altas concentrações de produtos finais ácidos. Neste teste, são colocadas gotas de vermelho de metila no meio; considera-se negativo para oxidar glicose se o meio fica amarelo e considera-se positivo se ficar vermelho (Figura 4.17).

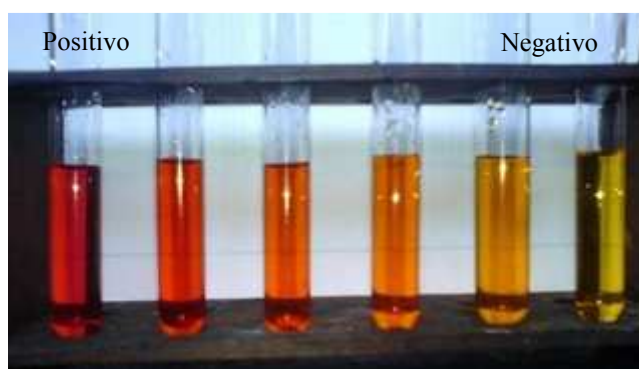


Figura 4.17. Prova do Vermelho de Metila (Imagem obtida de <http://microbiologiabrasil.blogspot.com/2009/01/prova-vermelho-de-metila-mr.html> o dia 04/06/09).

15. Prova do Voges-Proskauer (VP): esta prova detecta a produção de acetil-metilcarbinol, o qual se transforma a diacetilo em presença de KOH e O₂ atmosférico. O diacetilo é convertido posteriormente em um complexo vermelho em presença de α - naftol e creatina. A prova é considerada positiva quando, ao colocar gotas de α - naftol seguido de repouso por 24 horas, o meio fica verde e é considerada negativa se ficar vermelho.

16. Utilização do citrato: esta prova tem como objetivo determinar a capacidade de um microrganismo de utilizar citrato de sódio como única fonte de carbono para o metabolismo e crescimento. A prova é feita semeando-se a bactéria no meio sólido inclinado de citrato de *Simmons*. Se a bactéria utiliza o citrato como fonte do carbono, também utiliza os sais de amônio como fonte de nitrogênio para produção de amoníaco, o que origina uma alcalinização do meio. Isto se manifesta pela mudança do indicador de pH azul de bromotimol, de verde a azul intenso e, ainda, observa-se crescimento na superfície. Na prova negativa, o meio não se altera, pois não há crescimento microbiano (Figura 4.18).

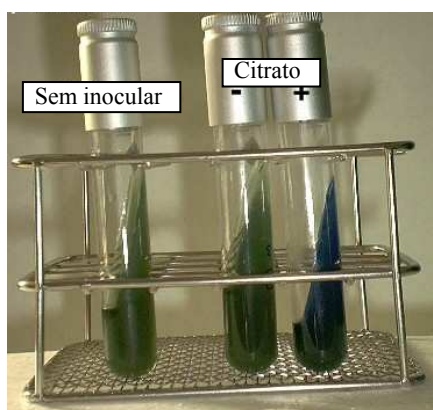


Figura 4.18. Utilização do citrato (Imagem obtida de <http://www.joseacortes.com/microbiologia/pruebasbioq/index.htm> o dia 04/06/09).

17. Prova de motilidade: a prova da motilidade indica indiretamente a presença de flagelos. Não é uma prova bioquímica e sim fisiológica, que auxilia na identificação das bactérias. A prova é efetuada inoculando-se em linha reta, através da técnica da punctura (com agulha), 2/3 de um meio semi-sólido. A prova indica motilidade quando os microrganismos crescem deslocando-se com relação à linha de inoculação, turvando o meio. A prova é negativa quando os microrganismos ficam restritos ao local da inoculação sem turvar o meio (Figura 4.19).

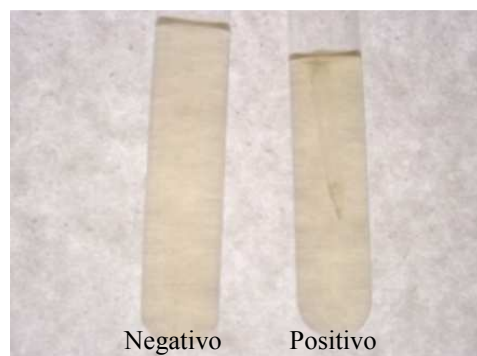


Figura 4.19. Prova de motilidade (Imagem obtida de <http://www.scribd.com/doc/5203044/Medios-de-Cultivo-y-Pruebas-Bioquimicas> o dia 04/06/09).

Em alguns casos foram feitas também provas de fermentação de lactose, sacarose, glicose, maltose, arabinose, trealose e esculina.

Após realizados estes testes são usados os diagramas de fluxo e as tabelas do livro de Baron *et al.* (1994) e Quinn *et al.* (1994) para a identificação do gênero de cada umas das bactérias.

Estas bactérias são guardadas num meio de conservação denominado “*Skim Milk*” e levadas à geladeira para mantê-las vivas por largos períodos. Quando as bactérias são requeridas para algum teste devem ser repicadas em ágar sangue e incubadas durante 24 h a 25°C para seu crescimento.

4.3 – IDENTIFICAÇÃO DO MELHOR NUTRIENTE PARA INDUZIR PRECIPITAÇÃO DE CARBONATO DE CÁLCIO

Para identificar qual seria o melhor nutriente para induzir a precipitação de carbonato de cálcio foram preparados vários meios, de acordo com a bibliografia pesquisada e relacionada com o tema.

Um dois meios usados, foi o meio B4, proposto por Tiano *et al.* (1999) e Baskar *et al.* (2006), que contém 2,5g de acetato de cálcio, 4g de extrato de levedura, 5g de glicose e 12g de ágar. O acetato de cálcio, o extrato de levedura e o ágar, são misturados e autoclavados, já a glicose é filtrada para evitar sua caramelização e adicionada aos outros

compostos depois de autoclavados. Finalmente, confere-se o pH, que deve ser aproximadamente 8, para produzir maior precipitação, de acordo com a literatura.

O outro meio testado foi o proposto por Stocks-Ficher *et al.* (1999), que se compõe de 3g de ágar nutriente, 20g de uréia, 10g de NH_4Cl (Cloreto de amônio), 2,12g de NaHCO_3 (Bicarbonato de sódio) e 5,6g de CaCl_2 (Cloreto de cálcio) e 12g de ágar, para 1 litro de água destilada. Neste só se autoclava o ágar nutriente, enquanto os outros compostos são filtrados e misturados. Finalmente, igualmente ao que se aplica no meio B4, o pH deve ser de aproximadamente 8.

Como na maioria dos casos, o pH fica abaixo de 8, deve-se adicionar hidróxido de sódio (NaOH) para aumentá-lo.

Cada um destes meios foi colocado em placas de petri e após 24 horas foram repicadas as bactérias identificadas dentro da câmara de fluxo e incubadas na estufa a 25°C , observando-as durante 15 dias (Figura 4.20). Posteriormente, analisou-se a presença de precipitados de carbonato de cálcio.



Figura 4.20. a) Placas de petri com o nutriente B4 e com o nutriente com uréia, b) incubação das bactérias.

Como nas placas com o nutriente B4 não se observaram precipitados, experimentou-se com este mesmo meio, porém com as proporções propostas por Lee (2003), que contém mais quantidade de acetato de cálcio. Os componentes deste meio são: 15g de acetato de

cálcio, 4g de extrato de levedura, 5g de glicose e 12g de ágar, para 1 litro de água destilada. Neste caso, os resultados foram melhores (Figura 4.21).

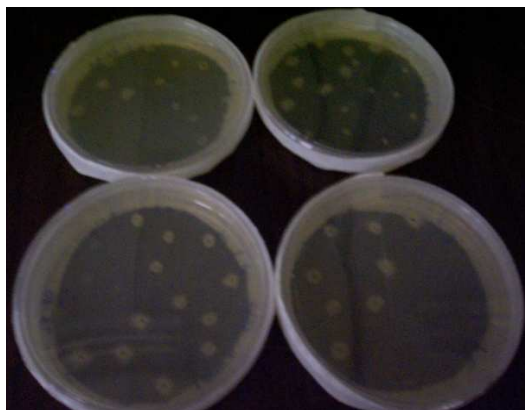


Figura 4.21. Placas com nutriente B4 com bactérias repicadas após 15 dias.

Posteriormente, as placas com os dois meios foram analisadas para a identificação dos minerais precipitados e a seleção do melhor meio precipitador, no microscópio petrográfico da Faculdade de Geologia da UnB. Este microscópio tem os dispositivos ópticos de qualquer microscópio (fonte de iluminação, objetivos e oculares) que servem para aumentar o tamanho da imagem. Adicionalmente, utiliza luz polarizada e permite obter imagens digitais com uma câmara fotográfica acoplada a ele.

Estas observações foram conferidas no microscópio eletrônico de varredura (MEV) do Laboratório de Mecânica das Rochas da Divisão de Geotecnia de FURNAS (LABS.C - DCT.C), da marca Leica, modelo S440i – 1995, de alto vácuo, com EDS da Oxford, o qual permite uma maior aproximação, em função da possibilidade fornecida pelo microscópio, além da melhor observação e análise da superfície de amostras espessas através de imagens tridimensionais. Associada à alta resolução que pode ser atingida, atualmente da ordem de 30Å, e à grande profundidade de foco, da ordem de 300 vezes melhor que a do microscópio ótico, adicionalmente realiza uma análise química pontual o areal da amostra. As amostras analisadas ao microscópio eletrônico de varredura necessitam de uma preparação prévia adequada, por serem não-condutoras de elétrons. Para permitir a condutibilidade elétrica, as amostras receberam metalização com uma camada de ouro como metal condutor e foram aterradas em um porta-amostra de alumínio, com tinta de prata (material condutor) formando assim um circuito fechado de energia (informação fornecida por FURNAS).

Ao determinar o meio que melhor induz a precipitação de carbonato de cálcio com as bactérias, adicionou-se o mesmo aos blocos inalterados de solo.

Os blocos são colocados dentro de um recipiente, para que na hora da adição do nutriente eles não desmanchem. No topo dos blocos foram feitos buracos de aproximadamente 0,4cm de diâmetro e 2cm de profundidade, espaçados 10cm entre si. Introduzem-se nos furos o nutriente com a ajuda de uma seringa como se apresenta na Figura 4.22 (No campo seriam feitos furos no solo e se jogaria o nutriente neles). Decidiu-se preencher com o nutriente o 60% dos vazios de cada solo, esta quantidade de nutriente a adicionar foi selecionada aleatoriamente. Posteriormente, os blocos foram colocados dentro da “câmara úmida” do Laboratório de Geotecnia da UnB, mantendo a temperatura e umidade relativa da câmara, próximas às condições médias do local selecionado, que neste caso corresponde à voçoroca de “Santa Maria”. De acordo com registros do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), a temperatura média em Santa Maria é de aproximadamente 25°C e a umidade relativa do ar de 60%.



Figura 4.22. Adição do meio B4 nos blocos de solo do perfil da voçoroca de Santa Maria.

De acordo com o reportado na literatura, e confirmado com as placas de petri, para ter uma maior precipitação de carbonato de cálcio são necessários aproximadamente 15 dias. É por isso, que os blocos são deixados dentro da câmara por esse tempo, para posteriormente realizar os mesmos ensaios de caracterização física, química, mineralógica e mecânica que são executados nos solos sem a adição do nutriente.

4.4 – CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO PERFIL

Para a caracterização física dos solos do perfil da voçoroca de Santa Maria, são realizados basicamente os ensaios de determinação da umidade, peso específico dos grãos, limites de Atterberg, Miniatura Compactada Tropical (MCT) expedita e granulometria. Na determinação da curva granulométrica do solo, foi feito o peneiramento para o material grosso e para o material fino; foram realizados ensaios de determinação da granulometria por sedimentação, sem defloculante e com defloculante, e por meio do granulômetro a laser. O último ensaio foi feito de quatro formas: sem ultrassom e sem defloculante, com ultrassom e sem defloculante, sem ultrassom e com defloculante e finalmente com ultrassom e com defloculante. A partir das amostras indeformadas determinou-se o índice de vazios e a saturação. Estes ensaios foram realizados no Laboratório de Geotecnia da UnB, de acordo com as metodologias propostas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

É importante ressaltar, que como a finalidade é analisar a melhoria que os solos possam ter com a adição do nutriente, os ensaios devem ser realizados nos solos naturais (sem adição do nutriente) e com a adição do nutriente.

4.4.1 – Determinação do teor de umidade

A umidade natural das amostras de solo, utilizando o método da estufa, foi determinada com base na Norma Brasileira NBR 6457/86, assim que as amostras foram retiradas de campo e levadas ao laboratório (Figura 4.23).



Figura 4.23. Amostra de solo secada na estufa para determinação do teor de umidade (Imagem obtida de http://ingenieracivil.blogspot.com/2008/08/exploracion-muestreo-en-el-campo-y_19.html o dia 07/06/09).

4.4.2 - Peso específico dos grãos

Na determinação do peso específico usou-se a Norma Brasileira NBR 6508/84. Este valor permitirá determinar a fração fina e o índice de vazios das amostras indeformadas, entre outros (Figura 4.24).



Figura 4.24. Equipamento para determinação do peso específico dos grãos (Imagem obtida de http://ingenieracivil.blogspot.com/2008_07_01_archive.html o dia 07/06/09).

4.4.3 – Granulometria

4.4.3.1 – Determinação da granulometria por sedimentação

A análise granulométrica conjunta (peneiramento e sedimentação), com uso de solução defloculante de hexametáfosfato de sódio foi realizada a partir da Norma Brasileira NBR 7181/84. Segundo Lima (2003), para verificar a estabilidade de micro-agregações são realizados, além dos ensaios com defloculante, os ensaios sem defloculante, baseados no ensaio de dispersão SCS (ensaio sedimentométrico comparativo) normalizado pela ABNT na NBR 13602/96, e assim ter a avaliação da dispersibilidade dos solos argilosos pela comparação entre as porcentagens de partículas com diâmetro menor que 0,002mm (tamanho argila), dos ensaios de sedimentação com defloculante e sem defloculante (Figura 4.25).

As amostras em estado natural e com 15 dias com nutriente foram colocadas a secar previamente ao ar, para realizar a análise granulométrica, descrita anteriormente. Já, com as amostras em estado úmido, realizou-se o ensaio granulométrico para as amostras em estado natural (sem nutriente), com 1 dia de nutriente e com 15 dias de nutriente. Este tipo de análise foi feita, visando identificar se as mudanças foram pelo efeito químico imediato (1 dia de nutriente), ou pela precipitação de cristais (15 dias de nutriente) a adicionar o nutriente.

A metodologia adotada no caso das amostras úmidas foi obter 70g do material úmido e colocá-lo em água destilada durante 24 horas. Da mesma forma, que se faz com defloculante, colocar 70g do material com 125ml de defloculante. Posteriormente, peneirar a suspensão na peneira nº10, e o material retido se deve secar na estufa a $110 \pm 5^\circ\text{C}$, para realizar a análise granulométrica. No material que passa a peneira nº10, executar o ensaio de sedimentação na forma tradicional conforme a Norma Brasileira NBR 7181/84.



Figura 4.25. Ensaio de granulometria (Imagem obtida de Aulas Geotecnia I-Universidade de Brasília, Camapum de Carvalho, 2005).

4.4.3.2 – Determinação da granulometria pelo granulômetro laser

Para a realização dos ensaios no granulômetro a laser do Laboratório de Geotecnia da UnB, foi utilizado o modelo MASTERIZER S STANDARD BENCH, produzido pela Malvern Instruments Ltda., fabricado na Inglaterra. As amostras de solo sem nutriente e com 15 dias de nutriente foram secadas ao ar e passadas na peneira N°40. Do material que

passou pela peneira nº40, tomou-se 1,5g. Para o caso de não usar defloculante, o solo foi colocado no dispersor durante 15 minutos e, posteriormente, colocado no granulômetro. Já, com defloculante os 1,5g são misturados com 125ml de defloculante durante 24 horas, dispersados por 15 minutos e logo colocados no granulômetro (Figura 4.26).

Estes ensaios no granulômetro foram feitos de quatro formas, sabendo que o granulômetro conta internamente com um sistema de ultrassom: sem ultrassom e sem defloculante, com ultrassom e sem defloculante, sem ultrassom e com defloculante e finalmente com ultrassom e com defloculante. O ultrassom causa degradação física do solo e o defloculante causa degradação química.



Figura 4.26. Ensaio de granulometria no granulômetro laser da UnB (Imagem obtida de Aulas Geotecnia I-Universidade de Brasília, Camapum de Carvalho, 2005).

4.4.4 - Limites de Atterberg

A determinação do limite de liquidez (w_L) foi realizada pela Norma Brasileira NBR 6459/84, e o limite de plasticidade (w_p) pela Norma Brasileira NBR 7180/84. A diferença entre estes dois limites oferece o índice de plasticidade dos solos (I_p). Estes resultados permitem a classificação dos solos finos pelo sistema SUCS (Sistema Unificado de Classificação de Solos).

Os ensaios para a determinação dos limites de Atterberg (limite de liquidez e limite de plasticidade) (Figura 4.27) foram realizados para os solos secados previamente ao ar em estado natural e com 15 dias de adição do nutriente. Adicionalmente, visando analisar as mudanças dos limites pela ação química, foram analisadas as amostras úmidas em estado natural, com 1 dia de nutriente e com 15 dias de nutriente. Neste caso, foram retiradas as partículas mais grossas para realizar os ensaios.



a)

b)

Figura 4.27. a) Ensaio para determinar o limite de liquidez, b) Ensaio para determinar o limite de plasticidade.

4.4.5 - Ensaio Miniatura Compactada Tropical (MCT) expedita

Nogami & Villibor (1995) propuseram um sistema de classificação mais apropriado para os solos tropicais que o sistema SUCS que foi implementado para solos de clima temperado. Este sistema MCT expedita, também denominado o “ensaio expedito das pastilhas”, separa os solos em dois grupos, um de comportamento laterítico e o outro não laterítico.

O ensaio consiste em tomar o solo que passa pela peneira n°40, adicionar água, o que forma uma pasta. O material obtido é deixado penetrar 1mm pela queda livre de um penetrômetro de ponta plana, de 1,3mm de diâmetro e 10g de peso. Posteriormente, com esta pasta são preenchidos no mínimo três anéis de PVC de aproximadamente 20mm de diâmetro interno e 5mm de altura. Adicionalmente, são moldadas bolhas de solo de aproximadamente 10g de peso para o cálculo do teor de umidade. As pastilhas e bolhas de solo são secadas ao ar pelo menos durante 6 horas (Figura 4.28).



Figura 4.28. Secagem ao ar de pastilhas e bolinhas de solo para o ensaio MCT expedita (Imagem obtida de Lima, 2003).

Após secar ao ar as pastilhas, mede-se o diâmetro de elas e se determina sua contração (ct), calculada como a diferença entre o diâmetro inicial e o diâmetro final. Posteriormente, as pastilhas são colocadas sobre um papel filtro, que se encontra sobre uma pedra porosa, que por sua vez está em contato com água. As pastilhas absorvem a água pela capilaridade, e após 2 horas, medem-se quantos milímetros em profundidade entra o penetrômetro na pastilha (Figura 4.29). Adicionalmente, com o valor da contração (ct) se determina a constante c' como:

Para a contração (ct) entre 0,1 e 0,5 mm, $c'=(\log_{10} ct +1)/0,904$

Para a contração (ct) > 0,6 mm, $c'=(\log_{10} ct +0,7)/0,5$



Figura 4.29. Penetração das pastilhas com o penetrômetro.

Com a constante c' e a penetração em cada pastilha são classificados os solos como se descreve na Tabela 4.1:

Tabela 4.1. Classificação MCT expedita (Nogami & Villibor, 1995).

DETERMINAÇÃO DO GRUPO MCT		
c'	Penetração (mm)	Grupo MCT
< 0,5	< 3,0	LA
	3,1 a 3,9	NA
	≥ 4,0	NA/NS'
0,6 a 0,9	< 2,0	LA-LA'
	2,1 a 3,9	NA'-NA
	≥ 4,0	NS'-NA'
1,0 a 1,3	< 2,0	LA'
	2,1 a 3,9	NA'
	≥ 4,0	NS'
1,4 a 1,7	< 2,0	LA'-LG'
	2,1 a 3,9	NA'/NG'-NS'
	≥ 4,0	NS'-NG'
≥ 1,8	< 2,0	LG'
	2,1 a 3,9	NA'
	≥ 4,0	NG'
- Significa equivalente / Significa que tem maior peso a primeira classificação		

Onde segundo Nogami & Villibor (1995):

- LG': Argilas e argilas arenosas de comportamento laterítico,
- LA': Solos tipicamente arenosos de comportamento laterítico,
- LA: Areias com poucos finos e de comportamento laterítico,
- NG': Solos saprolíticos argilosos, de comportamento não laterítico, pobres em quartzo e ricos em anfibólos, piroxênos e feldspatos cálcicos,
- NS': Solos saprolíticos silto-arenosos peculiares, de comportamento não laterítico, de constituição predominantemente feldspática-micácea-quartzosa,
- NA': Misturas de areias quartzosas (ou de minerais de propriedades similares) com finos passando na peneira de 0.075mm, de comportamento não laterítico,
- NA: Areias, siltes e misturas de areias e siltes, nos quais os grãos são constituídos essencialmente de quartzo e/ou mica, de comportamento não laterítico. Praticamente, não possuem finos argilosos coesivos e siltes caoliníticos.

4.5 - CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DO PERFIL

Estes ensaios consistiram em medidas de pH em água e em solução de KCl, na relação 10:25 (solo:água/solução), e na determinação dos teores de cálcio (Ca), sódio (Na), potássio (K), magnésio (Mg), H + Al (acidez total), fósforo (P), matéria orgânica (MO), Carbono orgânico (C), nitrogênio (N), fósforo (P), e enxofre (S), assim como da Capacidade de Troca Catiônica (CTC), Saturação de Bases e Saturação de Alumínio. Esses ensaios foram realizados de acordo com as normas da EMBRAPA (1997), pela empresa SOLOQUÍMICA, sendo que todos os solos foram previamente secos ao ar e passados na peneira N°10, denominado na agronomia de TFSA (Terra Fina Seca ao Ar).

Os valores do pH em água e em KCl permitem o cálculo do $\Delta\text{pH}=\text{pH}_{\text{KCL}}-\text{pH}_{\text{água}}$, que de acordo com Kiehl (1979) apud Lima (2003), quando este é negativo indica predominância de argilas silicatadas, em quanto um ΔpH positivo está relacionado com predomínio de óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio.

Esta caracterização foi realizada nos solos sem nutriente e com nutriente para efeitos comparativos.

4.6 - CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA DO PERFIL

A caracterização mineralógica ou identificação dos minerais presentes nas camadas do perfil da voçoroca de Santa Maria foi realizada por difratometria de raios X, e complementada com a análise química semiquantitativa obtidas por EDS em microscópio eletrônico de varredura.

As análises de raios X foram desenvolvidas no Laboratório de difração de raios X do Laboratório de Mecânica das Rochas da Divisão de Geotecnia de FURNAS (LABS.C - DCT.C). O difratômetro utilizado é da marca Siemens, modelo D5000 (Figura 4.30).

De acordo com informação fornecida por FURNAS: “As amostras foram analisadas sob voltagem 40KV e amperagem de 40mA, em sistema $\theta/2\theta$, com velocidade de varredura de 0,05°/seg, de 2° a 70° 2θ . A fonte de energia é um filamento de tungstênio (catodo) e o

tubo de raios X é de cobre (anodo), cujos comprimentos de onda (λ) são: $K\alpha$ 1,5418Å e $K\beta_1$ 1,3922Å”.



Figura 4.30. Difratorômetro de raios X do Laboratório de Difração de Raios X do Laboratório de Mecânica das Rochas da Divisão de Geotecnia de FURNAS.

As interpretações foram realizadas num computador, acoplado ao difratômetro, utilizando o software EVA, versão 5 de 1997, com banco de dados de 1998, contendo aproximadamente 117 mil fichas JCPDS, entre minerais, cimento e material cerâmico e outros (informação fornecida por FURNAS).

Os solos foram secados naturalmente e submetidos à moagem prévia, de modo a obter 100% passante na peneira 325mesh – 0,043mm. O objetivo é obter material representativo de granulação bem fina.

Concluída esta etapa, parte do material é analisada no difratômetro de raios X pelo método do pó não-orientado (análise integral ou total). Em alguns casos, não é possível, só a partir desta técnica a identificação de todos os minerais, requerendo aplicar à separação, por sedimentação em coluna, da fração argila destas amostras, seguidamente se faz uma montagem em vidro de 3 lâminas orientadas para cada amostra, ou seja, apenas com deslizamento de uma lâmina sobre a que contém a “lama” para orientação (esfregaço).

Nestas lâminas se realiza:

- Uma análise natural: apenas com secagem ao ar.

- Uma análise glicolada: após saturação da lâmina contendo a fração argila com etilenoglicol em dissecador, colocado sobre uma chapa aquecida a 50°C por 12 horas, visando garantir a completa saturação da atmosfera interna e assim possibilitar a identificação dos argilominerais expansivos, caso existam.
- Uma análise calcinada: tratamento dado à “fração argila” de permanecer em mufla a 550°C, por 3 horas. Esta análise serve para indicar a presença de minerais que sofrem retração e/ou colapso de sua estrutura nestas condições.

Deve-se ressaltar que em condições usuais de trabalho, o limite de detecção do método de difração de raios X, é geralmente de 5%, ou seja, constituintes que ocorram na amostra abaixo deste limite, provavelmente não serão detectados.

A partir da análise química que oferece o microscópio eletrônico de varredura, é possível conferir se os elementos encontrados correspondem aos elementos presentes nos minerais identificados por difração de raios X.

4.7 - CARACTERIZAÇÃO DA ESTRUTURA DO PERFIL

Nos solos tropicais não é possível pensar de maneira individual na partícula de solo, devido aos agrupamentos que apresentam os grãos, que se reflete no comportamento físico e mecânico do solo. É por isto que, analisar as variações que possa sofrer a estrutura natural do perfil com a adição do nutriente, pode permitir, eventualmente, explicação sobre o comportamento do solo ante a biomineralização.

A caracterização estrutural do solo se realizou a partir das imagens obtidas por meio de uma lupa eletrônica de luz natural de alta resolução, marca “ProScope HR” da Avantgarde, pertencente ao Programa de Pós-graduação em Geotecnia da UnB. Esta lupa permite imagens com aumentos de 50 vezes, 100 vezes, 200 vezes e 400 vezes.

Estas observações foram conferidas no microscópio eletrônico de varredura (MEV) do Laboratório de Mecânica das Rochas da Divisão de Geotecnia de FURNAS (LABS.C - DCT.C) (Figura 4.31a). As características do MEV foram descritas no item 4.3 pag. 61. Na preparação da amostra de solo para a análise, é secado um torrão do solo e aterrado a um

porta-amostra de alumínio, com tinta de prata formando assim um circuito fechado de energia e recebem metalização com uma camada de ouro (Figura 4.31b). Adicionalmente, como já se mencionou, este microscópio permite a análise química pontual o em uma área da amostra.



Figura 4.31. a) Microscópio eletrônico de varredura, b) Metalização de amostra para ser analisada no microscópio eletrônico de varredura (Imagem fornecida por FURNAS).

4.8 - CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DO PERFIL.

O comportamento mecânico dos solos é um aspecto muito importante na definição da melhoria dos solos com a adição do nutriente. Para sua determinação foram realizados ensaios de resistência à compressão simples, resistência à tração indireta, resistência ao cisalhamento direto, sucção total e matricial, adensamento duplo-edométrico e permeabilidade, assim como também, ensaios que permitem estimar a susceptibilidade à erosão como o ensaio de “*Pinhole test*” e de desagregação.

Igualmente ao que foi visto nas outras caracterizações, estes ensaios foram realizados para os solos sem nutriente e com a adição do nutriente para efeitos comparativos.

4.8.1 - Resistência à Compressão simples

Os ensaios de resistência à compressão simples foram executados de acordo com a Norma ABNT-NBR12770, a uma velocidade de 0,04572mm/min (Figura 4.32). Para cada camada

do perfil da voçoroca de Santa Maria (sem nutriente e com nutriente) realizaram-se no mínimo três ensaios, e se determinou ao final a umidade de cada corpo.



Figura 4.32. Ensaio de resistência à compressão simples.

4.8.2 - Resistência à tração indireta

O ensaio de tração indireta ou ensaio brasileiro, como seu nome o indica, permite determinar a resistência à tração do material (σ_t), aplicando uma carga de compressão ao longo de seu eixo como se apresenta na Figura 4.33.



Figura 4.33. Ensaio de resistência à tração indireta.

A ruptura é produzida por tração, teoricamente uniforme, acentuada na região central do corpo carregado e onde segundo Carneiro & Barcellos (1953), tem-se:

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi LD}$$

Com:

D = Diâmetro da amostra,

L = Espessura da amostra,

P = Carga aplicada.

O ensaio de tração indireta se realiza seguindo a metodologia estabelecida na norma DNER-ME138. Os corpos de prova usados são os mesmos confeccionados para o ensaio de sucção, por tal motivo apresentam diferentes umidades. Posteriormente à pesagem dos papéis filtro, cada corpo de prova é submetido ao ensaio de tração. Ao final do ensaio com a metade do corpo se determina a umidade, e com a outra metade o índice de vazios, a partir do método da balança hidrostática (ABNT-NBR10838).

A velocidade de execução de cada ensaio foi de 0,04572mm/min, igual ao aplicado em relação ao ensaio de compressão simples e ao ensaio de cisalhamento direto.

4.8.3 - Sucção total e sucção matricial

As curvas características solo-água na geotecnia são fundamentais na modelagem dos processos em solos não saturados, uma vez que o comportamento mecânico dos solos é afetado fundamentalmente pela sucção em função da variação da umidade (Lima, 2005).

A sucção total apresenta duas componentes, a sucção matricial e a sucção osmótica. A sucção matricial está relacionada com a matriz de solo, quer dizer com o tipo de partícula e o arranjo estrutural. A sucção osmótica está relacionada com a quantidade de sais presentes na água existente nos vazios do solo.

A técnica usada foi a do papel filtro com trajetória mista, ou seja, a partir da umidade natural, umedece-se e secam-se os corpos de prova necessários para uma boa definição da curva característica. Para a execução do ensaio foi seguida a norma americana ASTM

D5298, embora se tenham feito algumas variações propostas por Marinho (1995), como é o caso de não secar o papel filtro antes de começar o ensaio.

Para a realização do ensaio são confeccionados corpos de prova cilíndricos de diâmetro igual a 5cm e espessura de 2cm. Em cada corpo se ajusta a umidade adicionando água destilada, para uma boa definição da curva característica de retenção de água. Posteriormente, são colocados os papéis filtros como mostrado na Figura 4.34. Tal disposição se dá com o interesse de determinar para um mesmo corpo a sucção total e matricial. Diferenças entre as duas sucções podem mostrar mudanças no aspecto químico das amostras com a adição do nutriente.

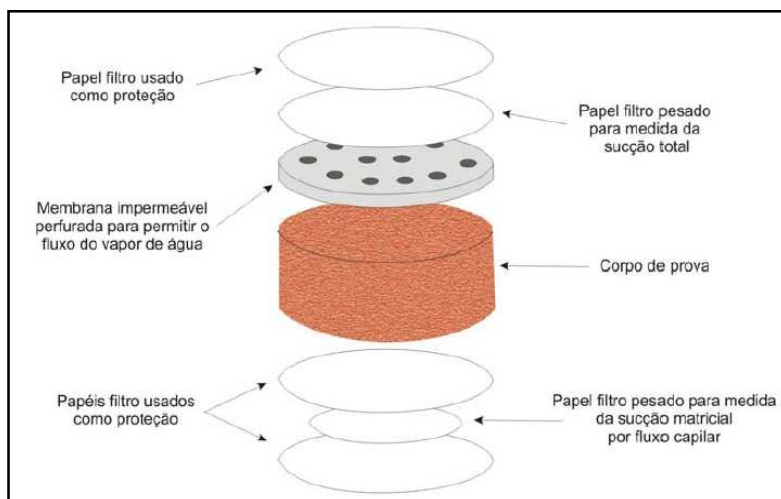


Figura 4.34. Disposição dos papéis filtros e da membrana impermeável na amostra para a medida da sucção total e matricial (Imagem obtida de Da Silva, 2006).

Finalmente, os corpos de prova são enrolados num plástico tipo PVC e em papel alumínio e guardados durante 15 dias em caixas de isopor para garantir a estabilização das umidades amostra e o papel filtro. Transcorridos os 15 dias, são pesados estes papéis filtro em uma balança analítica com quatro dígitos de precisão e secados na estufa a 107°C, no mínimo durante três horas, para serem novamente pesados. Estes corpos são posteriormente falhados por tração indireta e é determinada a sua umidade e índice de vazios a partir do método da balança hidrostática (Figura 4.35).

Segundo Marinho (1995), este método está baseado no equilíbrio entre o papel filtro e a umidade do solo. A relação entre a sucção e a umidade (w) do papel filtro pode ser obtida pela curva de calibração que se baseia nas seguintes equações:

Para umidades de papel filtro $> 47\%$, a sucção em (kPa) = $10^{(6.05-2.48*\log w)}$

Para umidades de papel filtro $\leq 47\%$, a sucção em (kPa) = $10^{(4.84-0.0622*w)}$



Figura 4.35. Ensaio de sucção total e matricial.

4.8.4 - Resistência ao cisalhamento direto natural e saturado

Com o ensaio de cisalhamento direto se pretende obter a tensão de cisalhamento do solo no plano em que a ruptura estiver ocorrendo. Nesta pesquisa foram realizados ensaios tipo CD (consolidados drenados), seguindo a norma americana ASTM D3080, em condição natural e inundada, em corpos de prova de 6cm de diâmetro e 2cm de altura, permitindo uma consolidação de aproximadamente 1 hora (tempo necessário para a estabilização das deformações verticais), para em seguida, aplicar o cisalhamento a uma velocidade de 0,04572mm/min. Quando o ensaio se faz na condição inundada, os corpos de prova, depois de serem consolidados com a carga durante 1 hora, são inundados com água destilada por 24 horas para prosseguir com o cisalhamento.

Os ensaios são realizados para cada condição, em três ou quatro corpos de prova. Em cada um é aplicada uma tensão normal e é verificada a tensão cisalhante que produz a ruptura. A

partir destes valores se obtém a envolvente de ruptura, que fornece os parâmetros de coesão (c) e do ângulo de atrito (ϕ) dos solos.



Figura 4.36. Ensaio de resistência ao cisalhamento direto.

4.8.5 - Adensamento duplo edométrico

A metodologia empregada para a execução dos ensaios de adensamento ou compressão confinada foi a descrita na norma ABNT-MB3336. Para determinar o potencial de colapso dos solos, os ensaios foram realizados do tipo duplo edométricos, segundo a proposta de Jennings e Knight (1975) apud Maia (2005). A diferença entre as curvas de compressão natural e inundada quantifica a deformação por colapso que ocorrerá para qualquer nível de tensão.

Para cada camada de solo, sem nutriente e com nutriente foram moldados dois corpos de prova de 7,2cm de diâmetro e 2,4cm de altura, um para o ensaio natural e o outro para o ensaio saturado. Estes corpos foram testados na célula de adensamento desenvolvida na Universidade de Manchester, Inglaterra, pelo professor Peter Walter Rowe (Rowe & Barden, 1966, apud Da Silva, 2006), (Figura 4.37). Nesta célula, a amostra ensaiada é carregada hidraulicamente pela pressão de água atuando num diafragma flexível de borracha, a pressão de ar é transmitida por um compressor (Figura 4.38). O ensaio nesta célula oferece, segundo Da Silva (2006), entre algumas vantagens, a possibilidade da aplicação de grandes pressões e a medida de permeabilidades. Adicionalmente, a amostra é menos suscetível a impacto e não perde umidade durante a execução do ensaio.

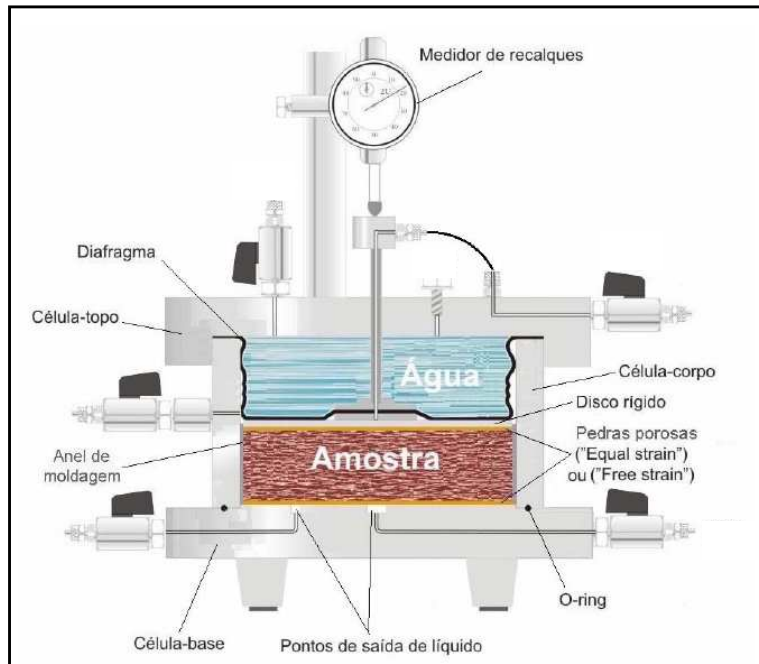


Figura 4.37. Corte transversal esquemático da célula “Rowe” (Imagem obtida de Da Silva, 2006).

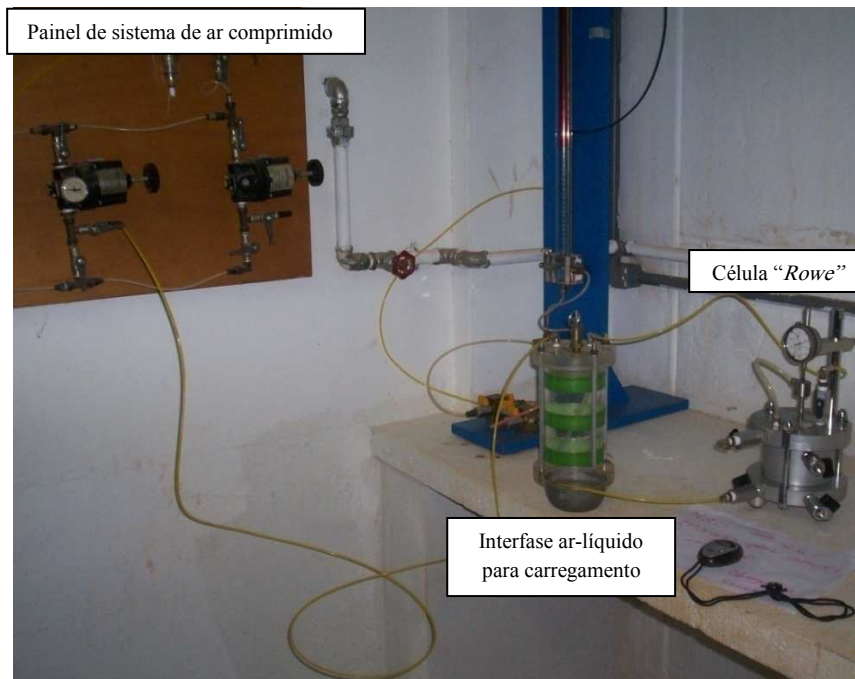


Figura 4.38. Ensaio de adensamento na célula “Rowe”.

O procedimento do ensaio consiste em moldar a amostra em seus respectivos anéis, pesando-a e tomando suas respectivas dimensões. Posteriormente, posiciona-se um disco de papel filtro e uma pedra porosa nas duas caras. Estes dois acessórios devem cair por dentro dos anéis. Este sistema é introduzido na célula-corpo (Figura 4.37), e na face

exposta da amostra se coloca um disco rígido para finalmente fechar o sistema com a célula-topo (Figura 4.37). Posteriormente, procede-se ao preenchimento do diafragma com água aerada, o qual se faz com a própria água da interfase ar-líquido (Figura 4.37). A mesma é usada para os carregamentos feitos no ensaio. Após isso, instala-se o extensômetro para medir os recalques. Aplica-se então, uma carga de 1kPa durante 30 minutos tomando suas respectivas leituras de recalque.

No caso do ensaio em condição saturada, empregando recipientes com água destilada conectados por umas mangueiras das duas válvulas inferiores da célula, retira-se o ar da pedra porosa inferior (isto se faz dando uma pequena diferença de altura entre os recipientes), e posteriormente satura-se o corpo colocando ao mesmo nível de altura os recipientes. É importante ter em conta que as tensões geradas no ensaio com o carregamento devem ser maiores que a tensão que produz a altura dos recipientes, isto para não romper a estrutura do solo. O solo é deixado saturando por 24 horas para finalmente começar o ensaio (Figura 4.39).



Figura 4.39. Ensaio adensamento na célula “Rowe” em condição inundada.

Os carregamentos usados em ambas as condições foram de 12,5kPa, 25kPa, 50kPa, 100kPa, 200kPa e 400kPa. Cada carga se manteve durante 24 horas e posteriormente se precedeu à descarga. Ao final, a amostra é extraída e pesada, assim como é determinada sua umidade final.

4.8.6 - Permeabilidade

Graves problemas na engenharia estão relacionados com a presença de água nos solos, por isso a importância do conhecimento da permeabilidade.

A permeabilidade foi obtida por meio do ensaio de cabeça constante (ABNT-NBR13292) ou cabeça variável (ABNT-NBR14545) (Figura 4.40). Ao início e ao final de cada ensaio foi determinada a umidade das amostras para verificar a saturação dos corpos.



Figura 4.40. Montagem ensaio de permeabilidade.

4.8.7 - “*Pinhole test*” ou furo de agulha

O ensaio do “*Pinhole test*” foi realizado conforme a norma brasileira ABNT-NBR14114. Onde percola água por um furo de 1mm de diâmetro feito no corpo de prova de solo cilíndrico, colocando várias cargas hidráulicas (Figura 4.41).



Figura 4.41. Ensaio de “*Pinhole test*”.

Segundo Lima (2003), a concepção do ensaio é avaliar de forma direta e qualitativa a dispersibilidade de solos argilosos, considerando como solos dispersivos as argilas muito erodíveis, que sofrem erosão por dispersão ou defloculação.

No ensaio, o corpo de prova é submetido, inicialmente, a uma carga hidráulica de 50mm, até a saturação do mesmo, sendo aumentada progressivamente para 180mm, 380mm e 1000mm. A cada aumento, observa-se o volume de água coletado num período de tempo, para calcular a vazão e verificar adicionalmente a turbidez. Posteriormente, diminui-se a carga hidráulica, até chegar às condições iniciais. Finalmente é observado o diâmetro final do furo.

Santos (1997) apud Camapum de Carvalho *et al.* (2006) propõe analisar os resultados do ensaio de *Pinhole* a partir da figura de vazão com gradiente hidráulico. Quando se obtém uma curva com comportamento quase linear, com ligeira inflexão para abaixo, o solo é considerado como não erodível. O solo é considerado erodível, quando a curva apresenta uma inflexão bem marcada para acima. Este ponto de inflexão se dá a partir do momento em que a erosão começa a ocorrer. A esse efeito se soma o fato da curva de descarga apresentar-se acima da curva de carga (Figura 4.42).

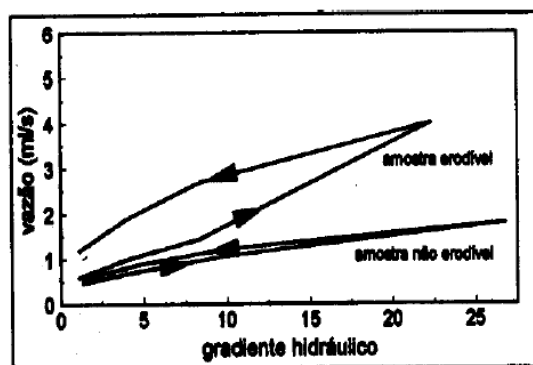


Figura 4.42. Resultados ensaio do “*Pinhole test*” (Santos & Camapum de Carvalho, 1998 apud Camapum de Carvalho *et al.*, 2006).

4.8.8 - Desagregação

O ensaio de desagregação, também denominado de “*Slaking test*” foi idealizado, segundo Lima (2003), pela engenheira Anna Margarida Fonseca. Este ensaio tem como objetivo verificar a estabilidade de uma amostra de solo indeformada quando imersa em água destilada, independente da dispersão do material. O resultado é puramente qualitativo, indicando que solos altamente erodíveis desagregam totalmente em água. Estados intermediários de erodibilidade e baixos não são verificáveis de forma direta.

Segundo Conrado *et al.* (2006), o ensaio de desagregação pode ser feito de duas formas: com inundação total e com inundação parcial do corpo de prova. Quando se faz a inundação total, a água penetra no solo, submetendo a amostra à redução de volume com consequente surgimento de pressão positiva. Se a pressão na fase ar (que é contínua) ultrapassa a coesão do solo, ocorre a ruptura estrutural do corpo de prova. Se na inundação total a fase ar é descontínua, esse mecanismo não ocorre e a variação de sucção é geralmente pequena, tendendo a não afetar a estabilidade estrutural do corpo de prova. Outros mecanismos como a dissolução de sais e o fenômeno dispersivo podem ocorrer em função da presença do fluido, os quais poderão originar a instabilidade estrutural do corpo de prova. Quando se tem a imersão progressiva dos corpos, o fenômeno de compressão da fase ar, mesmo que inicialmente contínua, tende a não ocorrer, pois, à medida que ocorre a ascensão capilar, o ar é expulso do solo. Além disto, tem-se a influência da eliminação da sucção na estabilidade estrutural do solo.

Neste ensaio duas amostras de solo indeformadas cúbicas de 60cmx60cmx60 são colocadas em bandejas por separado. Uma das amostras é submetida à imersão total, permanecendo dentro da água por um tempo de 24 horas. Enquanto, na segunda bandeja, a amostra é submetida à imersão parcial.

As amostras são colocadas primeiramente sobre uma pedra porosa com o nível d'água na base do corpo de prova por um período de tempo de 30 minutos. Em seguida, o nível d'água é aumentado progressivamente para 1/3 da altura do corpo de prova e para 2/3 da altura das amostras, mantendo-se, para cada uma destas fases, um intervalo de 15 minutos. O estágio no qual a amostra encontra-se imersa totalmente é mantido por 24 horas (Figura 4.43).



Figura 4.43. Ensaio de desagregação.

Durante o ensaio, deve-se anotar as observações quanto à desagregação do solo, se total, em pedaços, ou se a amostra permanece intacta.

Holmgren & Flanagan (1977) apud Conrado *et al.* (2006), que realizaram uma série de ensaios de desagregação em amostras de solo remoldadas e formularam um sistema de classificação das amostras em relação aos tipos de reação à inundação. Segundo estes autores, as amostras podem ser classificadas nas seguintes categorias:

- 1) Sem resposta: neste caso, as amostras mantêm sua forma e tamanho originais;

- 2) Abatimento (*slumping*): a amostra se desintegra, formando uma pilha de material desestruturado. Os mecanismos primários que causam a desintegração são a hidratação e desaeração, que atuam gerando pressões positivas que desagregam o solo;
- 3) Fraturamento: a amostra se quebra em fragmentos mantendo a forma original das faces externas. O principal mecanismo atribuído a este processo é a expansão osmótica;
- 4) Dispersão: a amostra se dissolve formando uma “nuvem” coloidal. Os autores afirmam que o processo de dispersão ocorre quando as pressões de expansão são grandes o suficiente para causar a separação entre partículas individuais.

5 - APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados e as análises referentes aos diferentes ensaios realizados nos solos do perfil da voçoroca de Santa Maria. O estudo foi iniciado fazendo-se a caracterização microbiológica e a definição do melhor nutriente precipitador de carbonato de cálcio. Posteriormente, procedeu-se às caracterizações física, química, mineralógica e mecânica do perfil de solo.

5.1 - CARACTERIZAÇÃO MICROBIOLÓGICA DO PERFIL

Depois de 3 dias, que foram acrescentadas as diluições 1:10 e 1:100 de solo nas placas de ágar nutriente e ágar sangue, observou-se diferentes tipos de bactérias, que foram isoladas e incubadas individualmente em placas de ágar sangue durante 24h a 25°C (Figura 5.1).

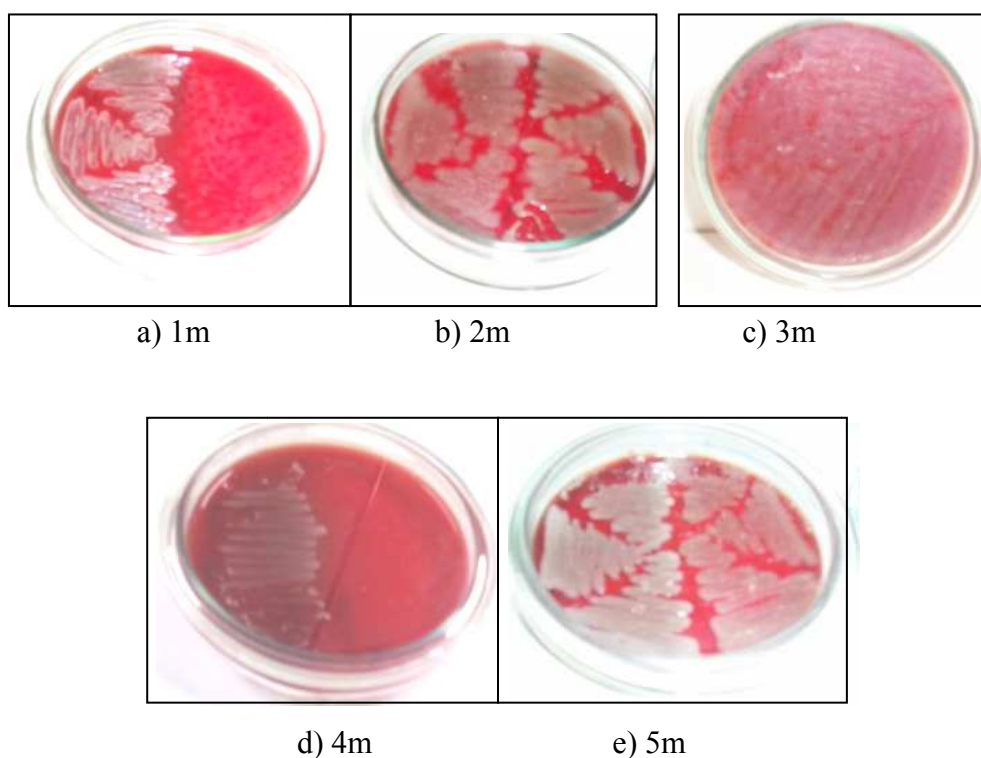
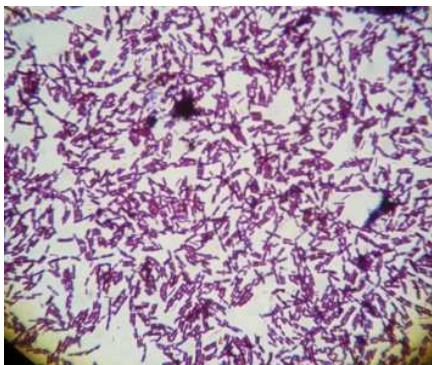
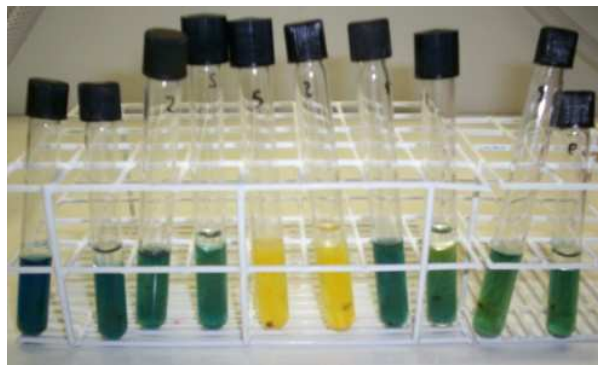


Figura 5.1. Isolados bacterianos em ágar sangue para as diferentes profundidades do perfil de solo da voçoroca de Santa Maria.

Para cada uma das bactérias isoladas, foram realizadas, de acordo com o indicado no item 4.2, as análises bioquímicas como ilustrado na Figura 5.2. Os resultados destas análises são apresentados nas Tabelas 5.1 a 5.5.



a) Coloração por GRAM



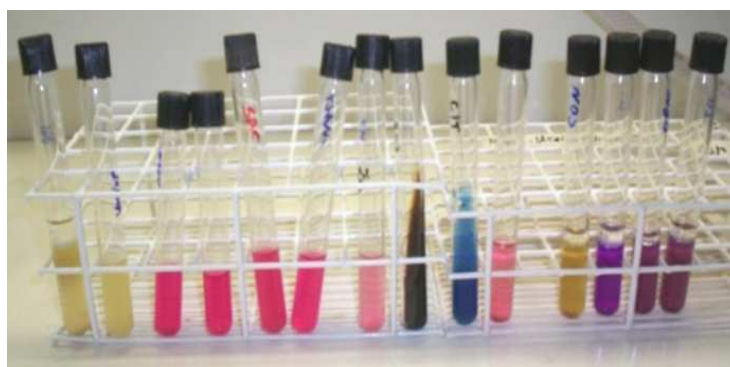
b) Ágar O/F



c) TSI



d) Teste de Uréia



e) Outras análises bioquímicas descritas no item 4.2.

Figura 5.2. Análises bioquímicas a 5m de profundidade do perfil de solo da voçoroca de Santa Maria.

Tabela 5.1. Resultados das análises bioquímicas para cada bactéria isolada oriunda do solo a 1m de profundidade do perfil da voçoroca de Santa Maria.

		1m de profundidade						
Teste	Bactéria	Bactéria						
		1	2	3	4	5	6	7
Cor GRAM		CB ¹	CB	CB	CB	B ²	B	B
Gram KOH3%		-	-	-	-	+	+	+
Oxidase		-	+	-	+			
Catalase		+	+	+	+	+	+	+
O/F		F ⁷	F	N.R. ⁸	F	N.R.		F
MacConkey		+	+	-	-	+	+	-
TSI		-	-	-	-	-	-	-
Indol		-	-					
Uréia		pouca	pouca	+	-	+	+	+
Glicose		-	-	-	-			
Sacarose		-	-	-	-			
Lactose		-	-	-	-			
Maltose		-	-	-	+			
Manitol		-	-	-	+/-			
Arabinose		-	-		-			
Trealose		-	-	-				
Esculina		-	-		-			
Lisina		-	-	-	-			
Arginina		-	-	-	-			
Ornitina		-	-	-	-			
Gelatina		+	+	+	+			
Nitrato		+	-	-	-			
VM/VP		-	-/+	-/+	-			
Citrato								
Motilidade		+	-	-	+			

Tabela 5.2. Resultados das análises bioquímicas para cada bactéria isolada oriunda do solo a 2m de profundidade do perfil da voçoroca de Santa Maria.

2m de profundidade									
Teste	Bactéria	Bactéria							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Cor GRAM		B	CB	CB	B	CB	B	B	B
Gram KOH3%		-	-	-	-	+	+	+	+
Oxidase		-	-	+	+	-	+	+	+
Catalase		+	+	+	+	-	+	+	+
O/F		O ⁶	F	F	N.R.	N.R.			
MacConkey		+	+	+	+				
TSI		-	G ³	-	L ⁴ , S ⁵	-	-	G	G
Indol		-	-	-					
Uréia		-	pouca	-	-	+	pouca	+	+
Glicose		-							
Sacarose			+						
Lactose		-	+/-						
Maltose			+	-					
Manitol			+	-					
Arabinose			-						
Trealose			+	-					
Esculina			+	-					
Lisina		-	+	-					
Arginina		-	+	-					
Ornitina		-	+	-					
Gelatina		+		+					
Nitrato		+			-				
VM/VP			-/+						
Citrato			+		-				
Motilidade		+		+					

Tabela 5.3. Resultados das análises bioquímicas para cada bactéria isolada oriunda do solo a 3m de profundidade do perfil da voçoroca de Santa Maria.

3m de profundidade											
Teste	Bactéria	Bactéria									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Cor GRAM		B	B	B	B	B	B	B	CB	B	B
Gram KOH3%		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Oxidase		+	+	+	+	+	+	+	+	+	-
Catalase		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
O/F									F		
TSI		G	G	-	-	G	-	-	-	G	G,L,S
Uréia		-	+	+/-	+/-	-	-	+/-	+	+/-	-
Glicose									-		
Sacarose									-		
Maltose									-		
Manitol									-		
Esculina									-		
Motilidade									+		

Tabela 5.4. Resultados das análises bioquímicas para cada bactéria isolada oriunda do solo a 4m de profundidade do perfil da voçoroca de Santa Maria.

4m de profundidade														
Teste	Bactéria	Bactéria												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Cor GRAM		CB	CB	B	B	CB	B	B	B	B	B	B	B	B
Gram KOH3%		+	+	-	+	+	+	-	+	+	+	+	+	+
Oxidase		-	-	-		-		+	-				-	-
Catalase		+	+	+		+		+	+				+	+
O/F		F	F	F		NR		F						
MacConkey				+		-		+						
TSI		G, L, S	-	G, L, S	G	G, L, S	-	G, L, S	G	-	G	G	G	G
Indol				-				-						
Uréia		+	+	-	+	+	-	-	-	-	-	+	-	+
Maltose								+						
Manitol								+						
Arabinose								+						
Trealose								+						
Esculina								+						
Lisina								-						
Arginina								+						
Ornitina								-						
VM/VP								+/-						
Citrato								-						

Tabela 5.5. Resultados das análises bioquímicas para cada bactéria isolada oriunda do solo a 5m de profundidade do perfil da voçoroca de Santa Maria.

5m de profundidade					
Teste	Bactéria				
	1	2	3	4	5
Cor GRAM	B	B	CB	B	B
Gram KOH3%	+	+	-	+	+
Oxidase			-	-	
Catalase			+	+	
O/F			F	O	
TSI	G, L, S	G, L, S	-	-	G, L, S
Uréia	+	-	+	+	+
Maltose			-		
Manitol			+		
Arabinose			-		
Trealose			-		
Esculina			-		
Lisina			-		

¹CB = *Cocos Bacillus*

²B = *Bacillus*

³G = Gelatina

⁴L = Lactose

⁵S = Sacarose

⁶O = Oxida

⁷F = Fermenta

⁸NR = Não reativa

A partir destas análises foi possível identificar diferentes tipos de bactérias conforme ilustrado na Tabela 5.6.

Tabela 5.6. Classificação das bactérias presentes no perfil de solo da voçoroca de Santa Maria.

	1m		2m		3m		4m		5m
#	Tipo de bactéria	#	Tipo de bactéria	#	Tipo de bactéria	#	Tipo de bactéria	#	Tipo de bactéria
1	<i>Peusodomonas</i> spp.	1	<i>Pseudomona</i> spp	1	<i>Bacillus</i> spp.	1	<i>Staphylococcus</i> spp.	1	<i>Bacillus</i> spp.
2	<i>Pasteurella</i> spp.	2	<i>Actinobacillus</i> spp.	2	<i>Bacillus</i> spp.	2	<i>Staphylococcus</i> spp.	2	<i>Bacillus</i> spp.
3	<i>Francisella tularensis</i>	3	<i>Pasteurella</i> spp	3	<i>Bacillus</i> spp.	3	<i>Enterobacter cloacae</i>	3	<i>Actinobacillus</i> s.pp.
4	<i>Pasteurella</i> spp.	4	<i>Alcaligenes</i> spp	4	<i>Bacillus</i> spp.	4	<i>Bacillus</i> spp.	4	<i>Bacillus</i> spp.
5	<i>Bacillus</i> spp.	5	<i>Rhodococcus equi</i>	5	<i>Bacillus</i> spp.	5	<i>Rhodococcus</i> spp.	5	<i>Bacillus</i> spp.
6	<i>Bacillus</i> spp.	6	<i>Bacillus</i> spp.	6	<i>Bacillus</i> spp.	6	<i>Bacillus</i> spp.		
7	<i>Bacillus</i> spp.	7	<i>Bacillus</i> spp.	7	<i>Bacillus</i> spp.	7	<i>Pasteurella</i> spp.		
		8	<i>Bacillus</i> spp.	8	<i>Corynebacterium</i> spp	8	<i>Bacillus</i> spp.		
				9	<i>Bacillus</i> spp.	9	<i>Bacillus</i> spp.		
				10	<i>Bacillus</i> spp.	10	<i>Bacillus</i> spp.		
						11	<i>Bacillus</i> spp.		
						12	<i>Bacillus</i> spp.		
						13	<i>Bacillus</i> spp.		

Na Tabela 5.6, pode-se observar um total de 43 diferentes tipos de isolados bacterianos, sendo *Bacillus* spp. a bactéria mais comum. Estes *Bacillus*, além de ser facultativos, são de diferentes tipos, mas a identificação do seu gênero dependeria de uma análise mais profunda, que não constituiu o foco principal desta pesquisa.

A partir da análise microbiológica, percebeu-se que a quantidade de bactérias encontradas aumentou com a profundidade. Isto, pode estar associado ao aumento do pH em água com a profundidade (item 5.4), onde segundo Brandy (1979), pH próximos a 8 são geralmente mais convenientes para a maioria das bactérias.

Adicionalmente, como foi mencionado por Cardoso *et al.* (1992), a maior ou menor quantidade de certos minerais, exemplo caulinita ou gibbsita contribuem para a maior

presença de bactérias Gram-positivas ou Gram-negativas. Isto se deve à maior adesão das bactérias a um destes minerais. No contexto desta pesquisa, comparando os quantitativos de caulinita e gibbsita estimados no item 5.5, pág. 124 com a presença de bactérias da Tabela 5.6, verifica-se que esta hipótese aqui se confirma.

No caso do último nível (5m), a quantidade de bactérias identificadas diminuiu, devido, à redução do pH em água e da menor quantidade de caulinita associada as bactérias Gram-positiva nesta profundidade. Outro elemento que poderia estar eventualmente afetando a presença das bactérias em maiores profundidades seria a oscilação sazonal do nível do lençol freático que influencia no suprimento de oxigênio para as bactérias.

5.2 – IDENTIFICAÇÃO DO MELHOR NUTRIENTE PARA INDUZIR A PRECIPITAÇÃO DO CARBONATO DE CÁLCIO NOS SOLOS DO PERFIL

Como foi descrito no item 4.3, testou-se dois tipos de nutrientes, o B4 e o meio com uréia. Cada uma das bactérias classificadas foram repicadas em placas com os dois meios e incubadas durante 15 dias a 25°C. Após este período, foram registradas imagens das placas numa lupa eletrônica de alta resolução, com luz natural, que indicaram precipitação por parte das bactérias nos dois meios conforme ilustra a Figura 5.3.

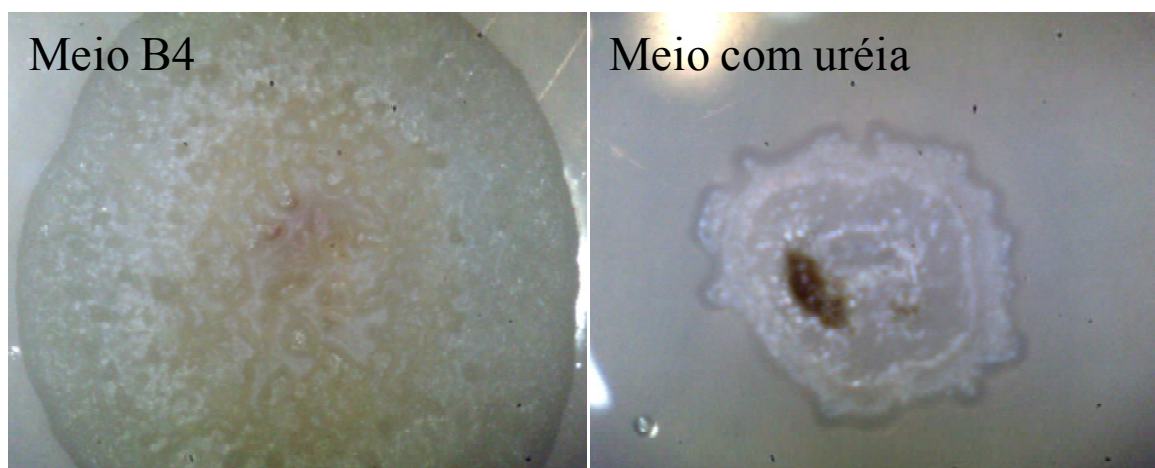


Figura 5.3. Imagens em lupa eletrônica de alta resolução dos precipitados bacterianos nos meios B4 e com uréia para a camada de solo a 4m de profundidade com uma bactéria *Bacillus* spp.. Aumento 100 vezes.

Para uma análise mais detalhada observou-se as placas de petri (Figura 5.4) no microscópio petrográfico e no microscópio eletrônico de varredura, possibilitando assim, uma melhor definição de qual seria o meio precipitador de carbonato de cálcio mais adequado ao perfil de solo analisado.

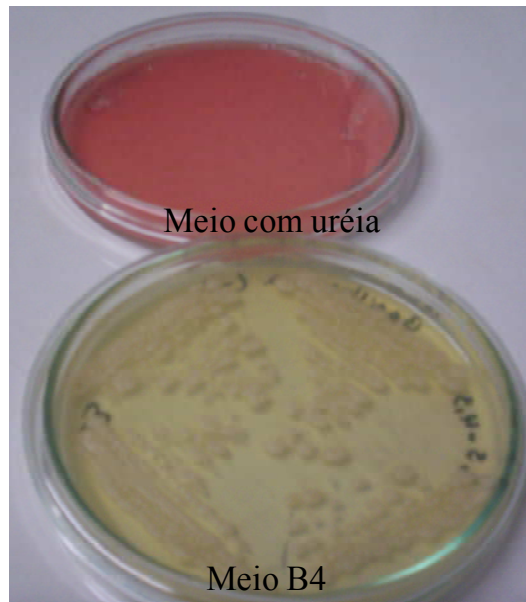


Figura 5.4. Placas de petri com os dois meios testados (B4 e com uréia) para a camada de solo a 4m de profundidade com uma bactéria *Bacillus* spp..

Colocando diretamente a placa de petri no microscópio petrográfico, observou-se, de maneira geral, que o meio B4 formou espécies mais estruturadas, que davam idéia, pelas cores de interferência que se obtinham ao usar nicóis cruzados, da presença de cristais de calcita com tamanhos variando desde 0,01mm até 1mm. Com o meio contendo uréia as estruturas não foram tão bem definidas. Na Figura 5.5, pode-se observar para um *Bacillus* spp. oriundo da camada de solo correspondente a 3m de profundidade, o comportamento ao usar o meio B4 e o meio com uréia.

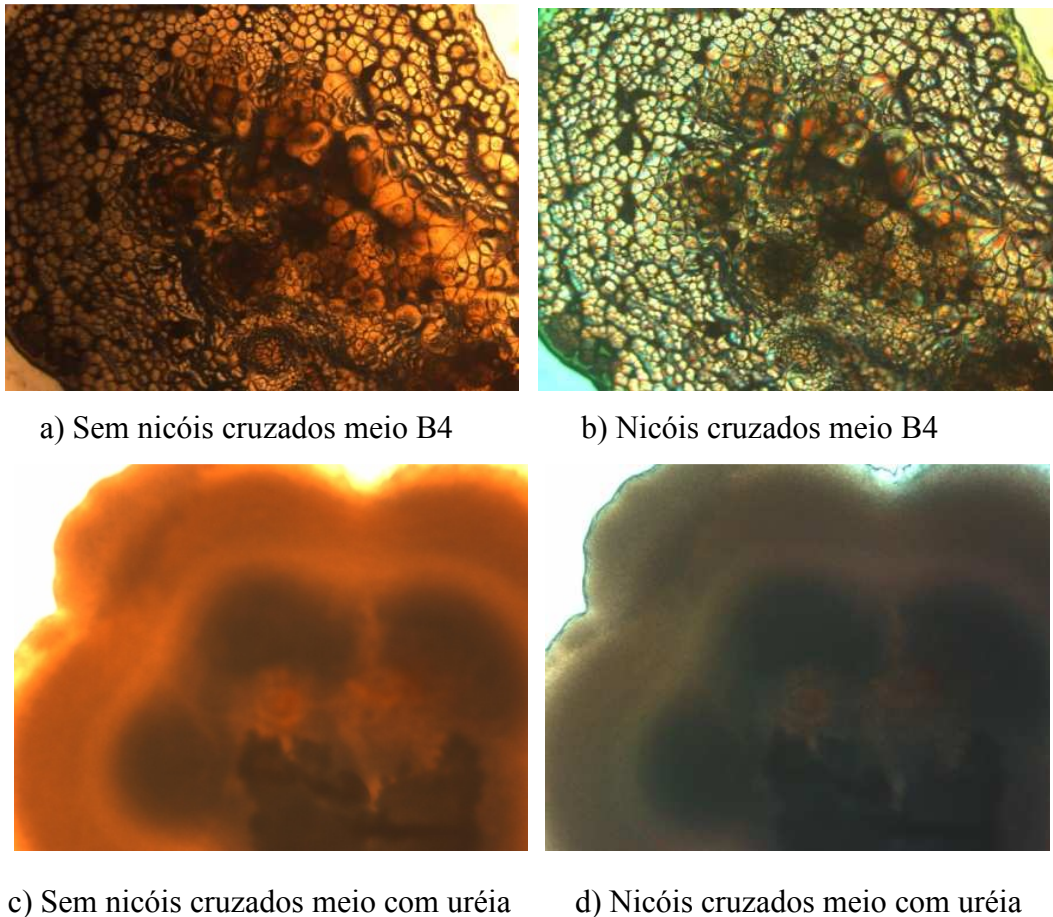
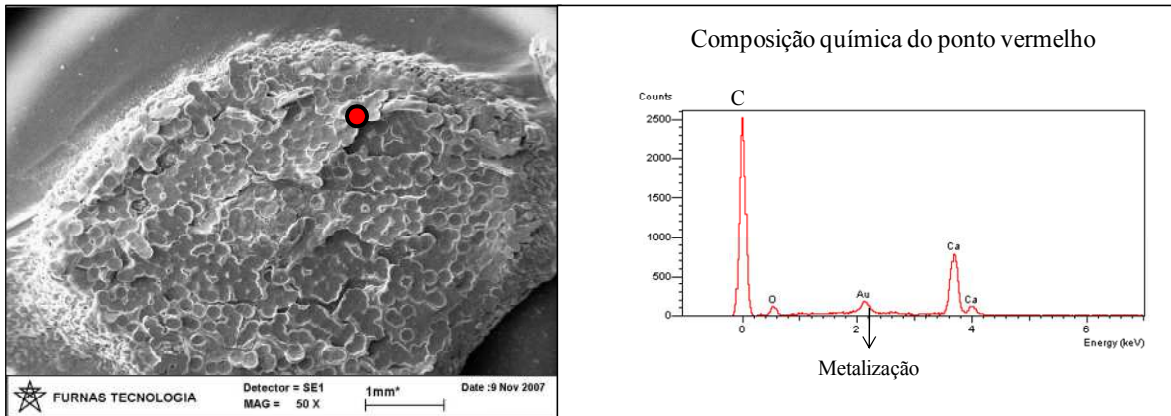


Figura 5.5. Precipitados bacterianos nos meios B4 e com uréia para a bactéria *Bacillus* spp. oriunda da camada de solo a 3m de profundidade. Imagem no microscópio petrográfico com aumento de 4 vezes.

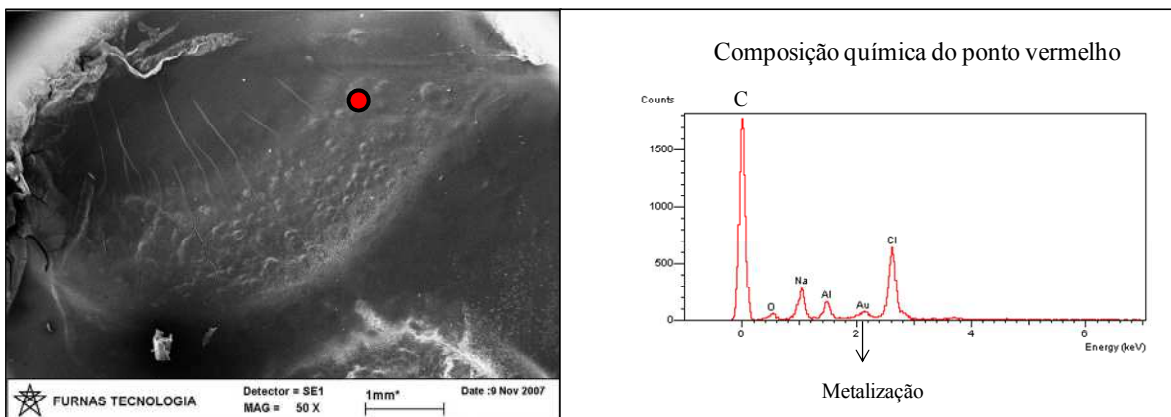
Para conferir a análise realizada no microscópio petrográfico, os precipitados bacterianos foram cortados e colados em porta-amostras (Figura 5.6) e, em seguida, metalizados com ouro (de aqui o pico de ouro na composição química) e observados no microscópio eletrônico de varredura, onde foi constatada presença de cálcio com o meio B4 e não no meio com uréia. A Figura 5.7 ilustra este fato, para um *Bacillus* spp. oriundo da profundidade 3m. É importante ressaltar que, na maioria dos casos, quando se tinham *Bacillus* se gerou maior precipitação de cálcio com o meio B4, o que permite confirmar o descrito na revisão bibliográfica com relação a que bactérias tipo *Bacillus* são ótimas para o processo de biomineralização. Todos estes resultados confirmam que o nutriente B4 induz maior precipitação de minerais nos solos do perfil da voçoroca de Santa Maria que o meio com uréia.



Figura 5.6. Precipitados bacterianos no porta-amostras para análise no microscópio eletrônico de varredura.



a) Precipitado bacteriano no meio B4



b) Precipitado bacteriano no meio com uréia

Figura 5.7. Precipitados bacterianos nos meios B4 e com uréia a 3m de profundidade com uma bactéria *Bacillus* spp. no microscópio eletrônico de varredura.

5.3 - CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO SOLO

Os resultados dos ensaios de caracterização física para as cinco camadas do perfil de solo natural da voçoroca de Santa Maria são apresentados, conjuntamente com os obtidos para o solo tratado com o nutriente B4, permitindo assim avaliar a influência que tem a adição do meio nestas propriedades.

5.3.1 – Peso específico dos grãos, índice de vazios, grau de saturação e teor de umidade

Na Figura 5.8 são apresentados os índices físicos naturais, peso específico dos grãos, índice de vazios, grau de saturação e teor de umidade. Destaca-se que apesar dos resultados relativos ao grau de saturação e ao teor de umidade já serem esperados pelo procedimento adotado, registrá-los é importante devido a sua influência no comportamento mecânico.

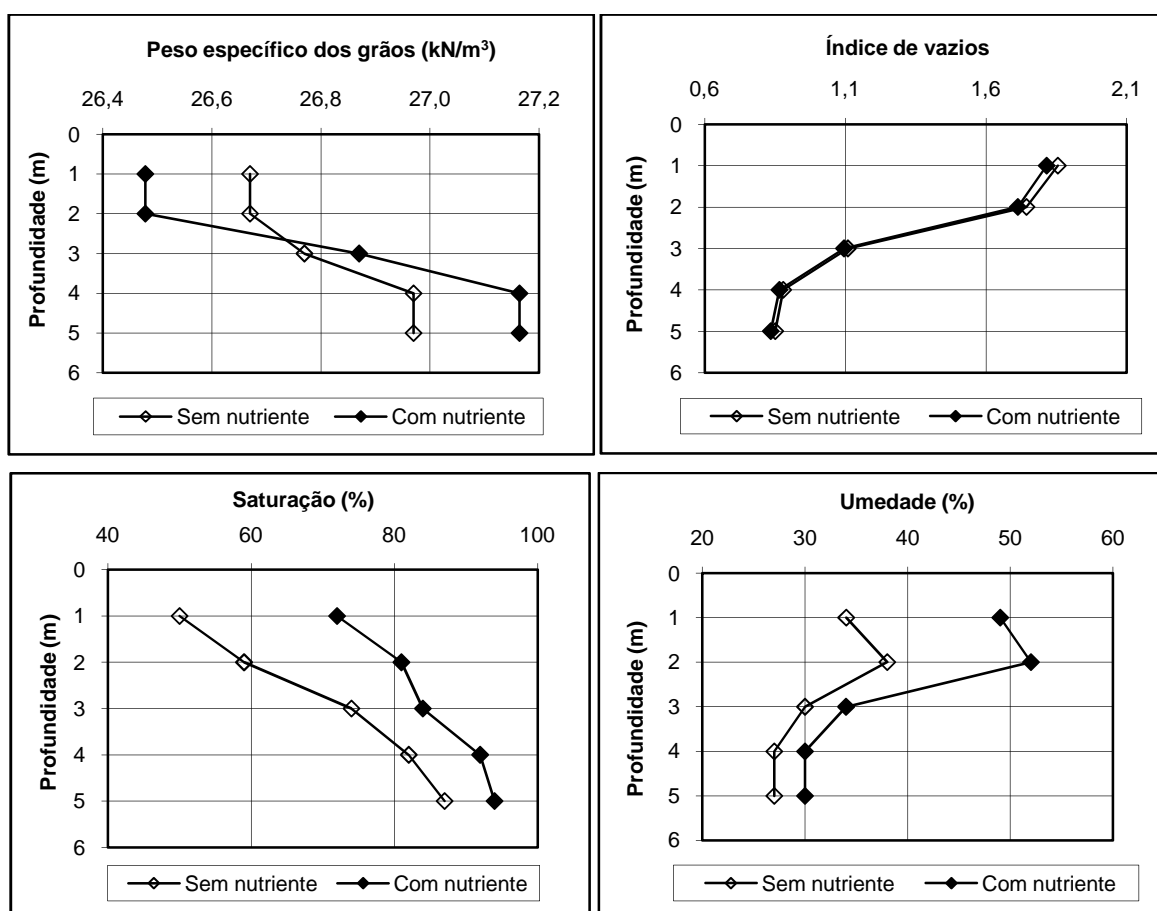


Figura 5.8. Variação em profundidade dos índices físicos do perfil de solo da voçoroca de Santa Maria sem adição e com a adição do nutriente B4.

Com relação ao índice de vazios, este sofreu uma pequena diminuição ao adicionar o nutriente, ficando mais marcada nos níveis superiores (1m e 2m). Tal comportamento possivelmente se deu em razão de ser o índice de vazios inicial maior nessas profundidades, fazendo com que ocorresse um maior enriquecimento em carbonato de cálcio. De modo geral, as reduções nos índices de vazios foram pequenas porque, como se verá na análise da estrutura, os precipitados ocorreram com pouca intensidade ou formaram fibras muito finas.

A tendência da curva de umidade com a profundidade pode ter relação com a quantidade de caulinita presente no solo (Figura 5.39, pág. 124). Nos níveis a 1m e 2m onde se tem menor quantidade de caulinita a umidade foi maior e onde maior quantidade de caulinita se tinha (3m, 4m e 5m) a umidade foi menor.

No caso do peso específico dos sólidos, este tem uma tendência inversa com relação à presença de cálcio no solo. Onde mais aumentou o cálcio, que foi também nas camadas de 1m e 2m, o peso específico diminuiu, e onde o cálcio diminuiu, o peso específico aumentou, esta constatação encontra-se registrada na Figura 5.26 do item 5.4 pág. 116 referente à análise química. Cabe destacar que além do fato das variações do peso específico dos solos serem muito pequenos, situando-os dentro da repetibilidade do ensaio, tem-se ainda a possibilidade do nível diferenciado de hidratação do carbonato formado estar interferindo no valor obtido. A Figura 5.9 ilustra o aumento do peso específico aparente seco com a adição de nutriente, cabendo lembrar que a quantidade de nutriente adicionado ao solo está diretamente relacionada ao teor de umidade a ele acrescido.

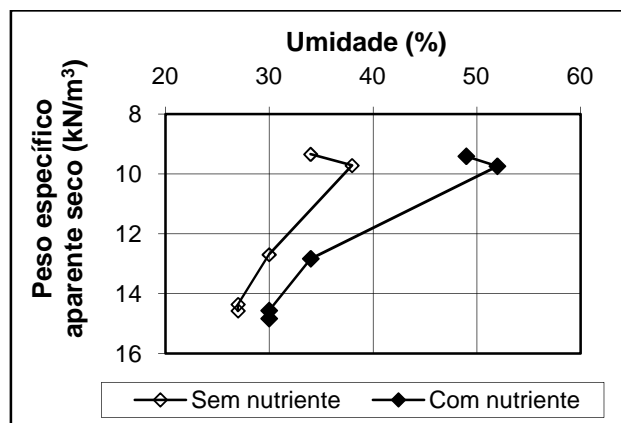


Figura 5.9. Umidade – peso específico aparente seco dos sólidos para o perfil de solo da voçoroca de Santa Maria.

5.3.2 – Granulometria

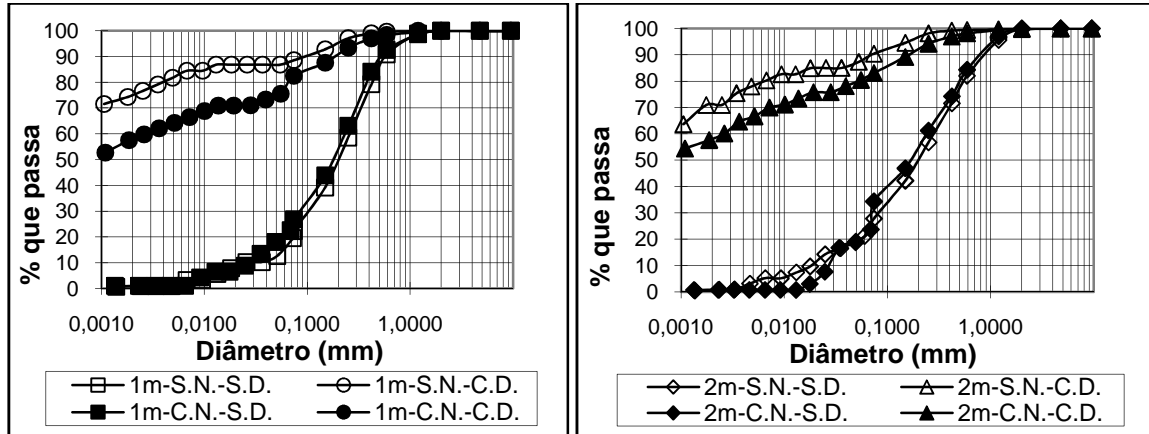
5.3.2.1 – Determinação da granulometria por sedimentação

Na Figura 5.10 se observa que nas amostras ensaiadas sem o uso de defloculante, as camadas, independentemente de tratamento, apresentaram curvas granulométricas semelhantes. No entanto, quando é usado o defloculante, nas amostras sem nutriente as curvas dos solos oriundos das camadas localizadas a 1m e 2m de profundidade apresentaram textura mais fina, indicando o avanço do intemperismo com a aproximação à superfície. No caso das amostras com nutriente e com defloculante, este efeito da intemperização ainda é observado.

Pela pouca variação das curvas sem defloculante com e sem o nutriente, o efeito do nutriente foi analisado considerando-se as curvas com defloculante. Nelas se observa que os solos com nutriente, apresentaram textura mais grossa que o solo sem nutriente. Isto poderia em parte se explicar pela maior estabilidade conferida ao solo pelo nutriente. Nesse sentido ter-se-iam duas possibilidades, uma simples alteração química do meio imposta pelo nutriente e a outra onde os precipitados estariam conferindo aos agregadores presentes no solo maior estabilidade. Segundo Santos (1975), a primeira hipótese é explicada pelo fato de que, quando é usado o defloculante a superfície do argilomineral fica com uma carga negativa adsorvida (íons OH^-) passando as partículas de argila a funcionar como condensadores elétricos carregados propiciando assim uma repulsão entre elas. Segundo o mesmo autor, ao adicionar carga positiva no meio, como é o caso do cálcio presente no nutriente ora analisado, o potencial eletrocinético dos argilominerais diminui e por consequência reduz a repulsão entre as partículas, possibilitando sua aglomeração por floculação. No caso estudado, o enriquecimento do meio em cálcio prevalece à adição do defloculante, logo o que ocorre é a impossibilidade da sua ação. Essa constatação é particularmente importante em áreas nas quais existe o risco de infiltração de fluidos poluentes, como é o caso do esgoto e chorume, pois nesses casos o precipitado de carbonato de cálcio gerado contribuiria para evitar eventuais processos de erosão interna.

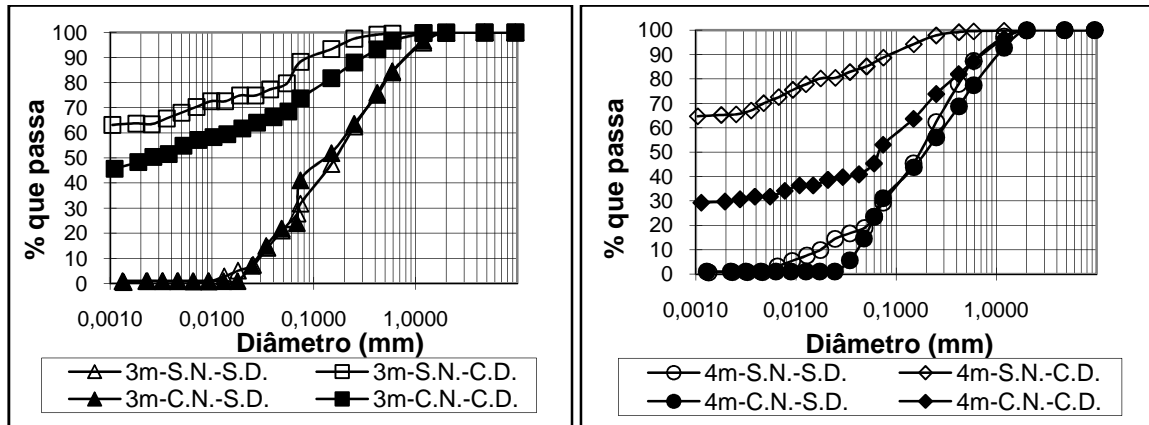
O efeito estabilizador do tratamento se evidencia mais forte para as profundidades maiores de 3m, indicando ao ter estas profundidades índices de vazios menores, a boa ação do

tratamento em poros pequenos, ou uma relação com a quantidade de minerais de caulinita, os quais causam maior adesão das bactérias Gram-positivas, que podem estar induzindo maior precipitação de carbonatos de cálcio e, por conseguinte maior estabilização.



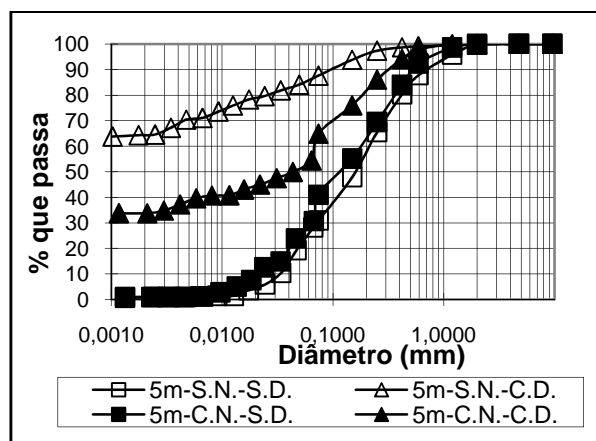
a) 1m de profundidade

b) 2m de profundidade



c) 3m de profundidade

d) 4m de profundidade



e) 5m de profundidade

Figura 5.10. Curvas granulométricas por sedimentação sem nutriente (S.N), com nutriente (C.N.), sem defloculante (S.D.), com defloculante (C.D.) para o perfil de solo da voçoroca de Santa Maria.

A preservação dos agregados com a adição do nutriente, mesmo usando o defloculante, é ilustrada nas imagens da Figura 5.11 adquiridas com uma lupa eletrônica de alta resolução. Estas imagens referem-se aos solos retidos na peneira n°200 após o ensaio de sedimentação.

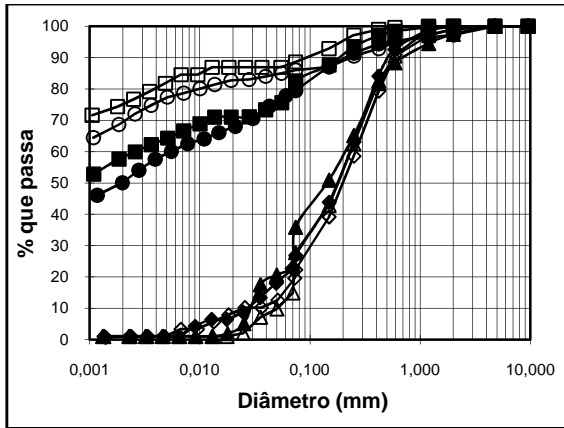


a) Amostras sem nutriente

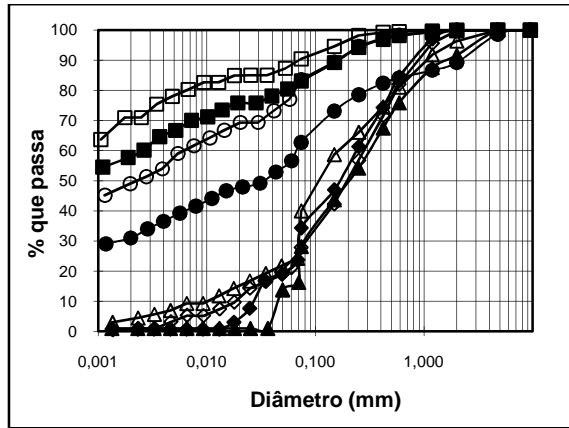
b) Amostras com nutriente

Figura 5.11. Imagens lupa eletrônica com luz natural das partículas produto da sedimentação na amostra a 5m de profundidade sem nutriente e com nutriente, perfil da voçoroca de Santa Maria, a partir do microscópio de alta resolução, aumento: 100 vezes.

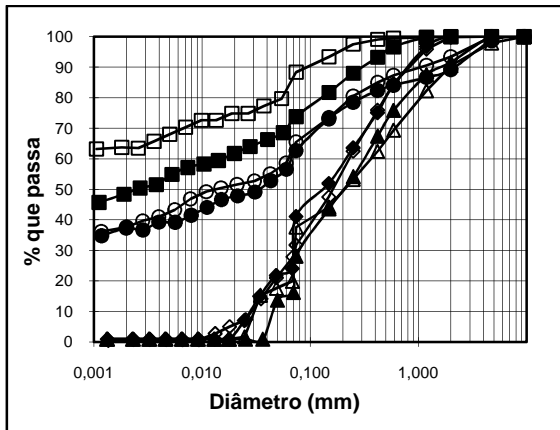
Para estudar o efeito que pode ter a secagem das amostras na textura, foram realizados ensaios de sedimentação sobre os solos com e sem tratamento a partir dos estados úmido e seco ao ar (Figura 5.12). Nesta Figura se pode observar para todas as profundidades que nas amostras sem nutriente e com nutriente, a secagem provoca a quebra das agregações presentes no solo. De modo semelhante ao comportamento verificado na Figura 5.10, as curvas sem nutriente deflocularam mais que aquelas com nutriente, ilustrando assim o efeito estabilizador do tratamento.



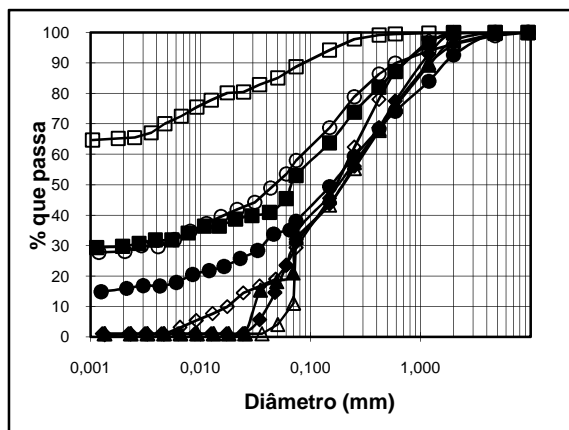
a) 1m de profundidade



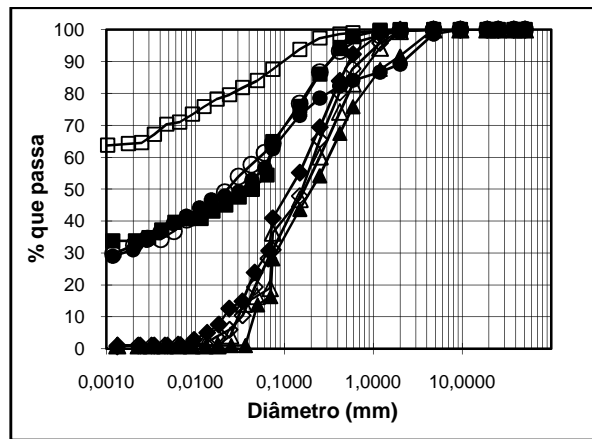
b) 2m de profundidade



c) 3m de profundidade



d) 4m de profundidade



e) 5m de profundidade

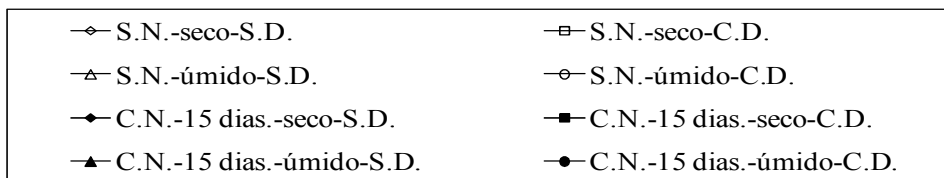
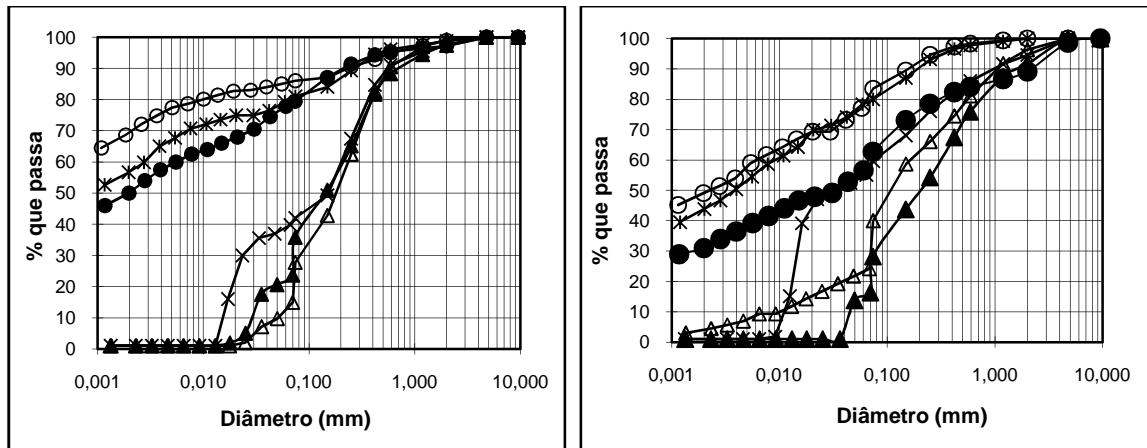


Figura 5.12. Granulometria por sedimentação, amostras secas ao ar e úmidas, sem (S.N.) e com nutriente (C.N.), sem (S.D.) e com defloculante (C.D.), para o perfil de solo da voçoroca de Santa Maria.

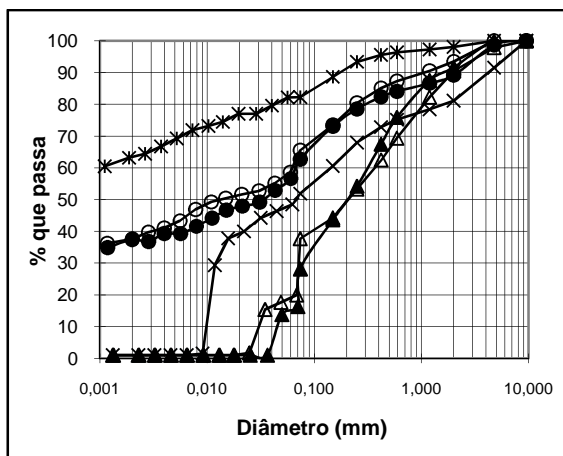
Tendo em vista que os resultados até aqui analisados foram obtidos, quando do uso do nutriente, para amostras ensaiadas 15 dias depois de efetuado o tratamento, realizou-se adicionalmente, de modo a verificar se a influência na estabilidade dos agregados era puramente química, os mesmos ensaios, considerando, porém, apenas 1 dia de cura com nutriente. Para evitar a influência da secagem na estabilidade estrutural foram consideradas nessa fase do estudo apenas as amostras inicialmente úmidas.

Nesse caso, quando comparadas as curvas granulométricas obtidas sem nutriente com aquelas obtidas com nutriente levando em consideração o período de 24 horas e 15 dias de cura, percebe-se que a simples adição do nutriente contribui para a desagregação do solo. Tal efeito desagregador é mais marcante para as profundidades de 3m, 4m e 5m, para as quais, o nutriente não só não contribuiu para a preservação dos agregados como também desagregou aqueles que o defloculante isoladamente não conseguiu fazê-lo (Figura 5.13). O efeito químico desagregador do nutriente antes da cura se deve provavelmente ao maior pH (8 a 8,5) presente no primeiro dia, em relação ao pH das amostras do solo natural (5,5 e 6,1) e do solo com 15 dias de tratamento (7,1 e 8,0). Conclui-se, portanto, que efetivamente o tratamento após a cura de 15 dias contribui para a maior estabilidade do agregado.

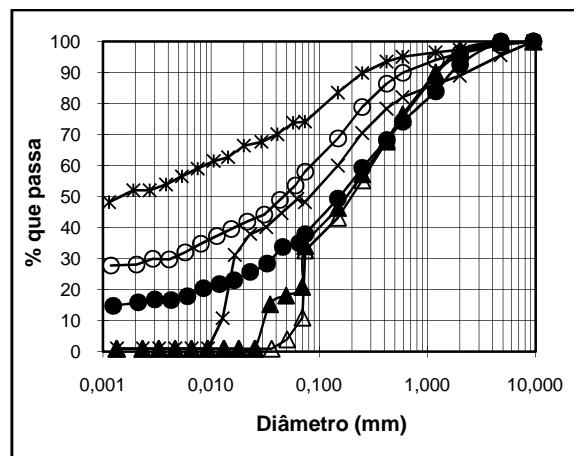


a) 1m de profundidade

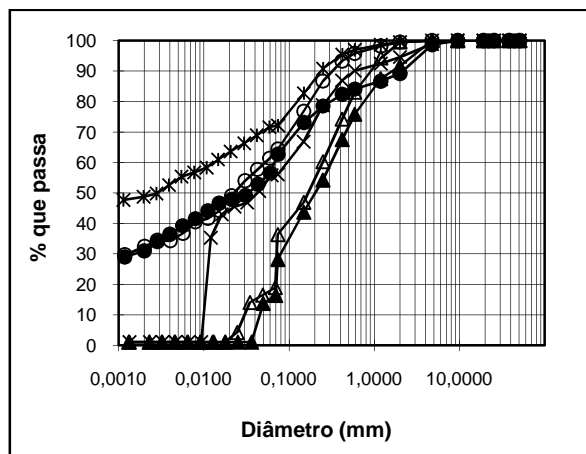
b) 2m de profundidade



c) 3m de profundidade



d) 4m de profundidade



e) 5m de profundidade

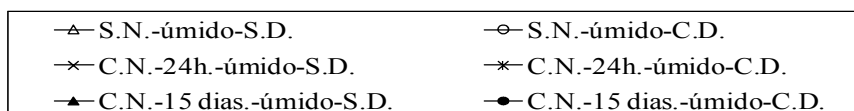


Figura 5.13. Granulometria por sedimentação, amostras úmidas, sem nutriente (S.N.), com 24horas de nutriente e com 15 dias com nutriente (C.N.), sem (S.D.) e com defloculante (C.D.), para o perfil de solo da voçoroca de Santa Maria.

5.3.2.2 – Determinação da granulometria pelo granulômetro laser

As Figuras 5.14 e 5.15 apresentam os resultados obtidos no granulômetro a laser.

Analisando as curvas sem nutriente da Figura 5.14, pode-se observar que sem defloculante e sem ultrassom as curvas das camadas a 3m, 4m e 5m apresentaram textura mais fina que aquelas das camadas situadas a 1m e 2m. Porém, quando foi feito o ensaio apenas com ultrassom, as camadas a 1m e 2m apresentaram maior quantidade de partículas tamanho argila, indicando sua maior sensibilidade ao efeito mecânico do ultrassom. Quando, além do ultrassom, foi acrescentado o defloculante, as curvas para as camadas de 1m e 2m de profundidade apresentaram maior desagregação, indicando como descrito anteriormente o avanço do intemperismo com a aproximação da superfície do terreno. Esse conjunto de resultados ilustra que a estabilidade estrutural dos agregados é sensível a agentes químicos e mecânicos, reforçando assim o efeito desagregador imposto por esforços mecânicos tais como aqueles oriundos do tratamento térmico.

Para o caso do solo tratado por 15 dias (Figura 5.15), foi observado comportamento semelhante ao verificado para as amostras sem tratamento, porém com menor intensidade.

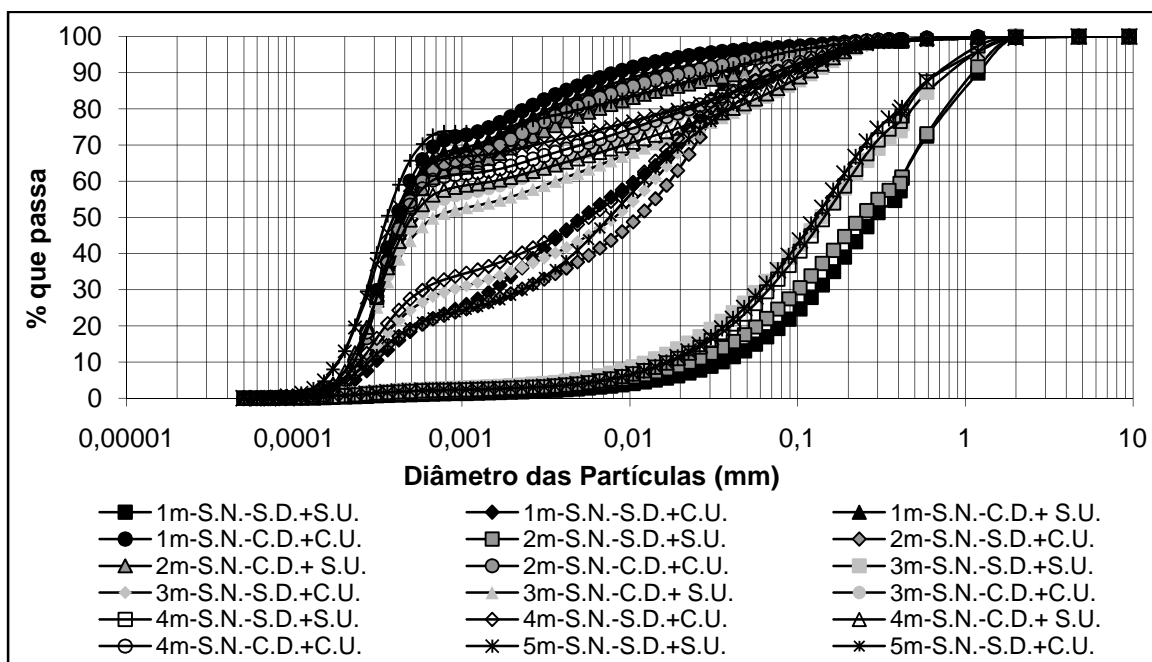


Figura 5.14. Granulometria a laser sem (S.U.) e com ultrassom (C.U.), sem (S.D.) e com defloculante (C.D.) para as amostras do perfil de solo da voçoroca da Santa Maria sem nutriente (S.N.).

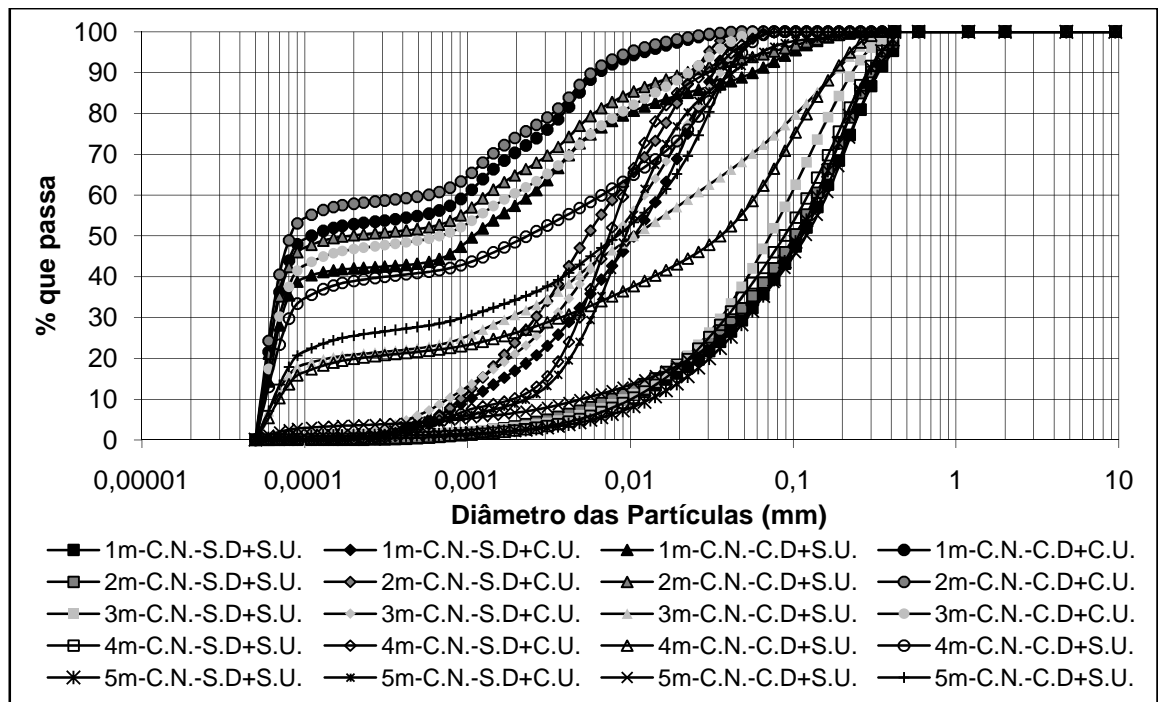
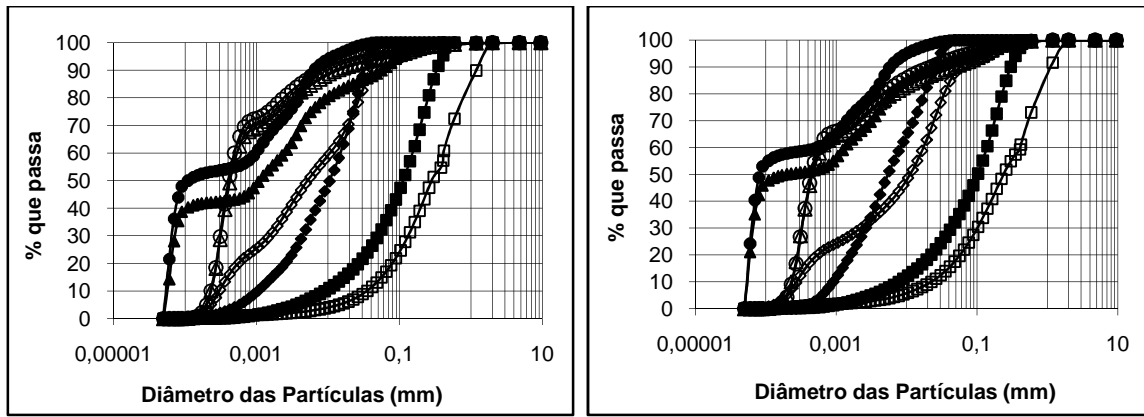


Figura 5.15. Granulometria a laser sem (S.U.) e com ultrassom (C.U.), sem (S.D.) e com defloculante (C.D.) para as amostras do perfil de solo da voçoroca da Santa Maria com nutriente (C.N.).

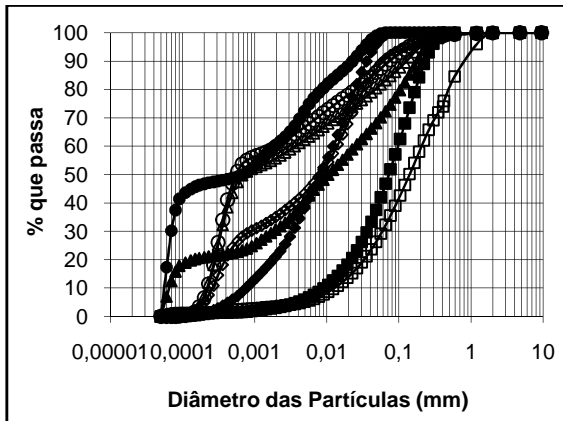
Observando-se as curvas obtidas com e sem nutrientes superpostas por profundidade na Figura 5.16, verifica-se para todas as camadas que quando se trabalhou sem defloculante e sem ultrassom (S.D.+S.U.), as amostras com nutriente apresentaram maior desagregação refletindo assim certo efeito químico do nutriente sobre a estabilidade dos agregados. Tal efeito diminui com o aumento da profundidade das amostras, que pode ser, como foi discutido, pela boa ação do tratamento em poros pequenos ou a maior presença de caulinita a maior profundidade.

Como já visto, o defloculante por meio de cargas de superfície gera a repulsão entre as partículas separando-as. No entanto, em muitos solos tropicais, tal mecanismo é insuficiente para destruir todos os agregados. Porém, ao utilizar o ultrassom, muitos dos agregados estáveis na presença do defloculante são destruídos pela energia mecânica imposta, daí a soma dos dois efeitos nesses casos gerar um solo de textura mais fina. Cabe destacar, que em casos, como da adição do nutriente, ao se neutralizar o efeito do defloculante o ultrassom por sua vez não surtirá o efeito na desagregação total. Conclui-se assim que o tratamento ao propiciar a precipitação do carbonato de cálcio contribui à estabilização estrutural do solo.

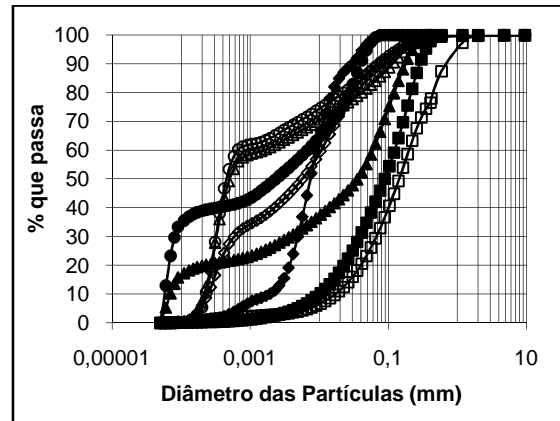


a) 1m de profundidade

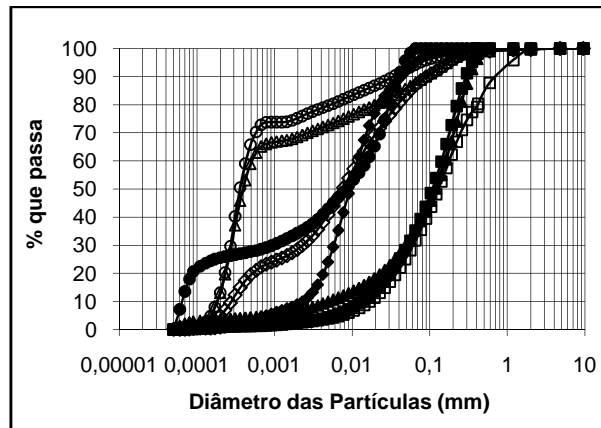
b) 2m de profundidade



c) 3m de profundidade



d) 4m de profundidade



e) 5m de profundidade

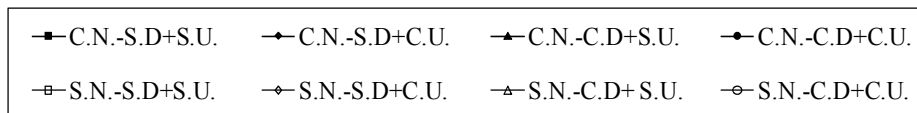


Figura 5.16. Curvas granulométricas pelo granulômetro laser sem defloculante (S.D), com defloculante (C.D), sem ultrassom (S.U), com ultrassom (C.U), para o perfil de solo da voçoroca de Santa Maria sem nutriente (S.N) e com nutriente (C.N).

Para avaliar a estabilidade das micro-concreções que se encontram presentes no perfil do solo da voçoroca, foram usadas as expressões apresentadas em Araki (1997) relativas aos agregados totais (A.T.) e ao teor de agregação (T.A.). Nos cálculos foram utilizados os percentuais de argila obtidos dos ensaios de granulometria com e sem defloculante.

$$A.T. = \% \text{ tamanho argila com defloculante} - \% \text{ tamanho argila sem defloculante}$$

$$T.A. = \frac{\% \text{ tamanho argila com defloculante} - \% \text{ tamanho argila sem defloculante}}{\% \text{ tamanho argila com defloculante}}$$

A Figura 5.17 ilustra que quando foi usado o nutriente, os valores de A.T foram menores, indicando assim uma maior estabilidade das micro-concreções. Os valores de T.A. permitem analisar qual percentual de argila encontra-se agregado. Neste sentido, a Figura 5.18 permite verificar que o nível de agregação é praticamente o mesmo ao longo do perfil, pois os valores de T.A. variaram muito pouco (96,6 e 98,7).

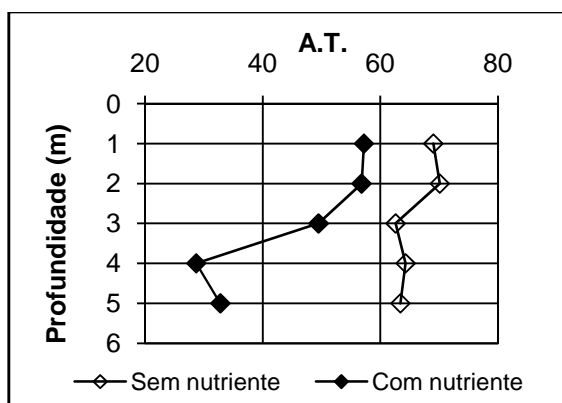


Figura 5.17. Variação dos agregados totais no perfil de solo da voçoroca de Santa Maria.

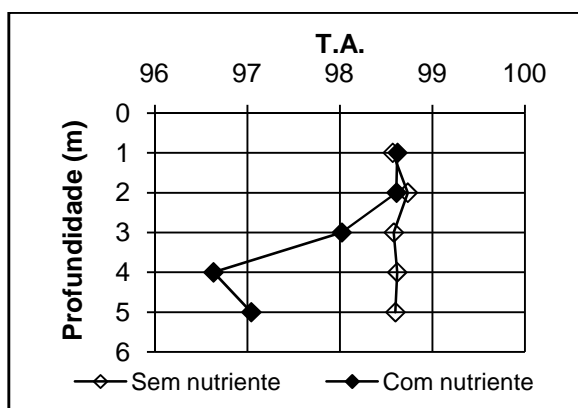


Figura 5.18. Variação do teor de agregação no perfil de solo da voçoroca de Santa Maria.

Para confirmar a estabilização dos agregados presentes no perfil de solo pela precipitação do carbonato de cálcio, analisou-se o índice A.T. para as amostras no estado úmido. Na análise destes resultados quanto menor o A.T. maior a estabilidade dos agregados. A Figura 5.19 ilustra que os agregados submetidos a 15 dias de cura foram os mais estáveis, enquanto aqueles submetidos à cura de 1 dia foram os menos estáveis. Tem-se assim, que a precipitação ocorrida em 15 dias estaria estabilizando o solo, enquanto a ação química imediata do nutriente contribuiria para sua desestabilização.

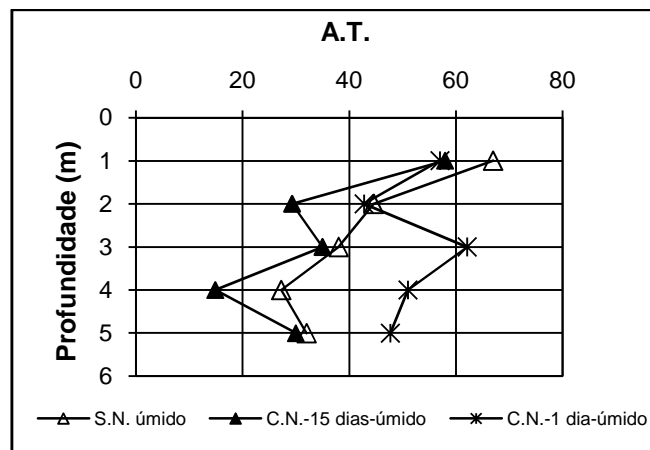
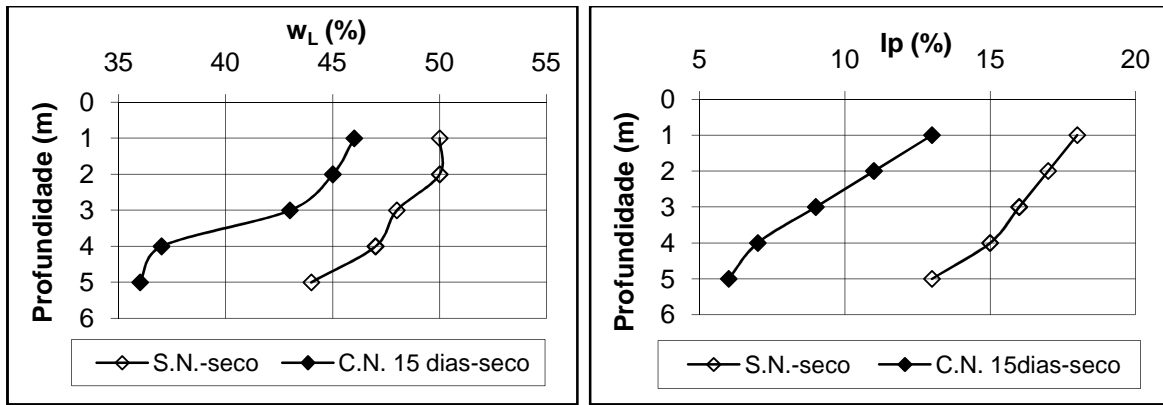


Figura 5.19. Agregados totais (A.T.) amostras úmidas, sem nutriente, com 24 horas de nutriente e com 15 dias com nutriente, para o perfil de solo da voçoroca de Santa Maria.

5.3.3 - Limites de Atterberg

Com relação aos limites de Atterberg, as Figuras 5.20a e 5.20b, apresentam respectivamente, em função da profundidade, as variações dos valores do limite de liquidez (w_L) e Índice de plasticidade (I_p) para as amostras secas ao ar. A partir destas Figuras, observa-se, tal como indicado por Santos (1975), que, a plasticidade de uma argila, em geral, pode diminuir pelo aumento do número de cátions, como o do cálcio. Adicionalmente, o tratamento contribui para manter a agregação do solo, tornando-o mais granular o que geralmente favorece a diminuição da plasticidade.

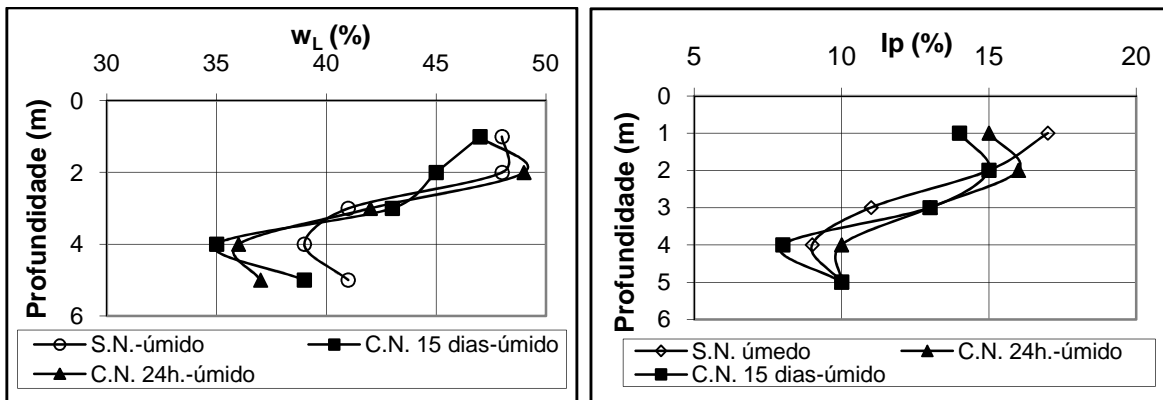


a) Limite de liquidez

b) Índice de plasticidade

Figura 5.20. Variação do w_L e I_p com a profundidade para o perfil de solo da voçoroca de Santa Maria.

Para analisar se esta diminuição se deve ao efeito químico imediato ou à precipitação de carbonatos, foram realizados os limites para as amostras em estado úmido, sem nutriente, com nutriente 24 horas e com nutriente 15 dias (Figura 5.21).



a) Limite de liquidez

b) Índice de plasticidade

Figura 5.21. Variação do w_L e I_p com a profundidade em estado úmido para o perfil de solo da voçoroca de Santa Maria.

Nesta Figura se observa que além de pequena não é clara a influência do nutriente sobre a plasticidade do solo quando este é analisado a partir do estado úmido.

Devido a pouca variação da plasticidade no estado úmido, torna-se difícil, à primeira vista, confirmar a presença de carbonato de cálcio. Porém, ao serem analisados os resultados desta pesquisa comparativamente aos obtidos por Camapum de Carvalho (1985) (Figura

5.22), no que diz respeito à relação existente entre o limite de liquidez e o índice de plasticidade para solos com diferentes teores de carbonato de cálcio, verifica-se que o aumento do teor de carbonato de cálcio nos solos estudados por aquele autor gera o deslocamento dos pontos para uma posição inferior no gráfico. A mesma constatação pode ser visualizada quanto aos resultados oriundos desta pesquisa e ilustrados na mesma figura.

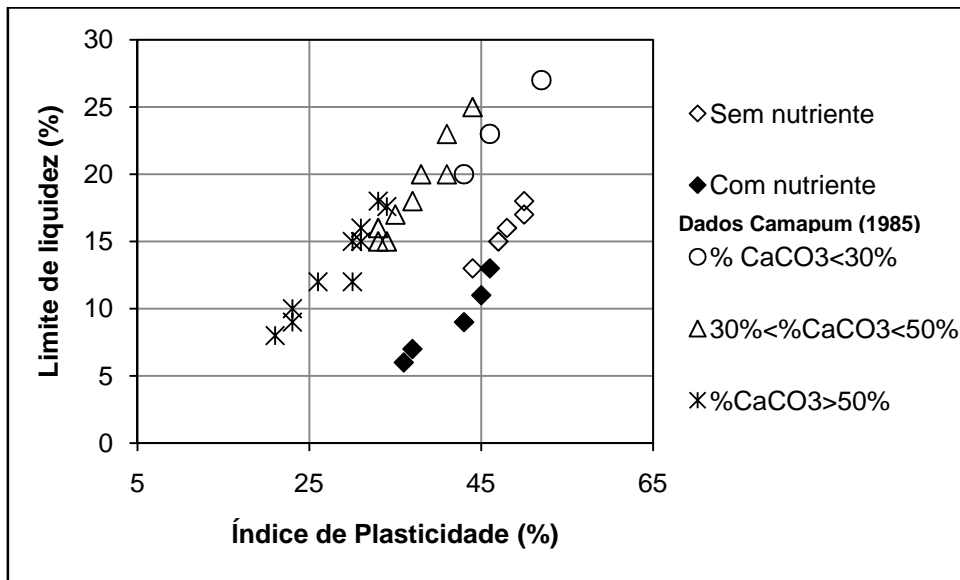


Figura 5.22. Análise comparativa entre os resultados desta pesquisa e os obtidos por Camapum de Carvalho (1985) quanto à influência do carbonato de cálcio na plasticidade.

Com relação à atividade dos solos (sem nutriente e com nutriente), obtida pelo método de Skempton ($\text{Atividade\%} = I_p \times 100\% / \text{\%partículas tamanho argila}$), a Figura 5.23 ilustra como ao carbonato de cálcio diminuir a plasticidade (Figura 5.20) do solo tratado, sua atividade fica menor que sem tratamento. Este comportamento corrobora os resultados obtidos na análise granulométrica.

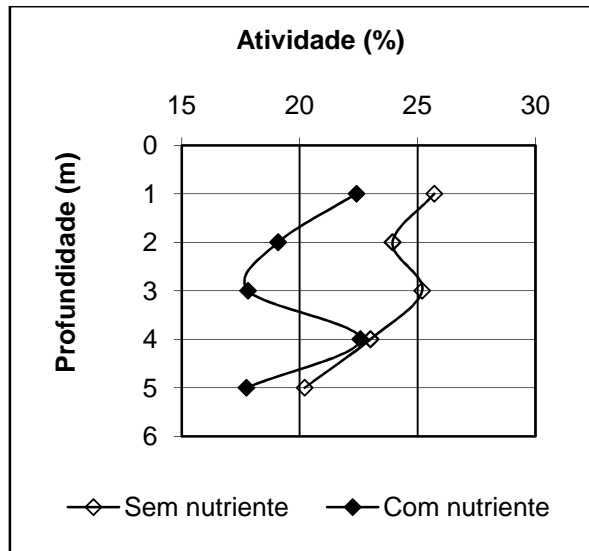


Figura 5.23. Atividade, segundo Skempton, nos solos do perfil de solo da voçoroca de Santa Maria.

Ao analisar o coeficiente de atividade, segundo a proposta da EMBRAPA (1999) ($\text{Atividade\%} = \text{Capacidade de Troca Catiônica} \times 100\% / \text{\%partículas tamanho argila}$) (Figura 5.24) este aumentou para o solo tratado, devido a que o tratamento gera um aumento na capacidade de troca catiônica como se verá no item 5.4, Figura 5.26, página 116.

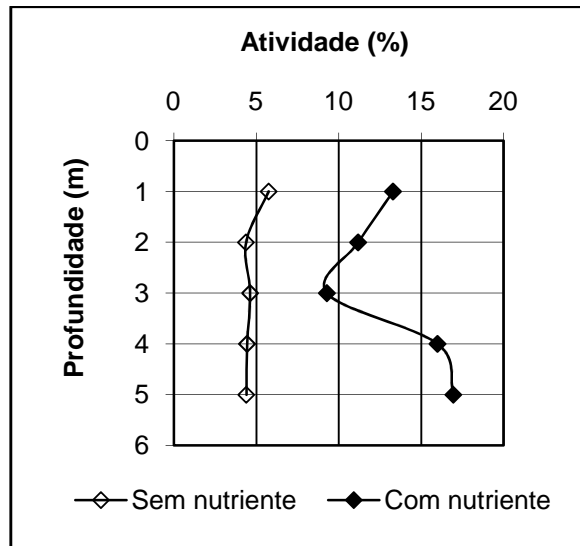


Figura 5.24. Atividade, segundo a EMBRAPA (1999), nos solos do perfil de solo da voçoroca de Santa Maria.

5.3.4 - Classificação dos solos

Com relação à classificação dos solos do perfil, só nas duas camadas superiores (1m e 2m), foi observada uma mudança ao adicionar o nutriente, tanto pela classificação S.U.C.S (Sistema Unificado de Classificação de Solos) como pela classificação MCT (Miniatura Compactada Tropical) expedita (Tabela 5.7). Uma análise mais detalhada das mudanças de classificação geradas nessas camadas mais superficiais aponta para a coerência entre os dois métodos, ou seja, o tratamento, ao conferir estabilidade aos agregados, conduz sua classificação no sistema MCT à fronteira da areia. Na classificação S.U.C.S ao reduzir a plasticidade, conforme ilustrado na Figura 5.22, conduz o solo a ser classificado como de baixa plasticidade. A não alteração das classificações nas demais camadas não significa necessariamente a não influência do tratamento no comportamento do solo, mas se a pouca sensibilidade dos métodos para avaliar os níveis de alteração sofridos.

Tabela 5.7. Classificação pelo SUCS e pelo MCT expedita para cada camada de solo do perfil da voçoroca de Santa Maria.

Profundidade (m)	Grupo MCT Sem nutriente	Grupo MCT Com nutriente	Grupo S.U.C.S. Sem nutriente	Grupo S.U.C.S. Com nutriente
1	LG'	LA'-LG'	MH	ML
2	LG'	LA'-LG'	MH	ML
3	LA'-LG'	LA'-LG'	ML	ML
4	LA'-LG'	LA'-LG'	ML	ML
5	LA'-LG'	LA'-LG'	ML	ML

LG': Argilas e argilas arenosas de comportamento laterítico,
LA': Solos tipicamente arenosos de comportamento laterítico,
MH: Silte de alta plasticidade,
ML: Silte de baixa plasticidade.

Do ensaio de classificação MCT expedita, foram analisadas as contrações das pastilhas sem a adição e com a adição do nutriente. As relações entre a contração e os teores de argila, de finos, de agregados totais (A.T.) e de agregação (T.A.) apresentaram tendências semelhantes, sendo a relação com finos a melhor delas (Figura 5.25). Verifica-se nesta figura que a adição do nutriente conduziu a diminuição da retração pela estabilização do solo. Tal aspecto pode do ponto de vista geotécnico ser considerado como positivo, pois além de minimizar o risco de trincas de retração termina contribuindo para a estabilidade do maciço.

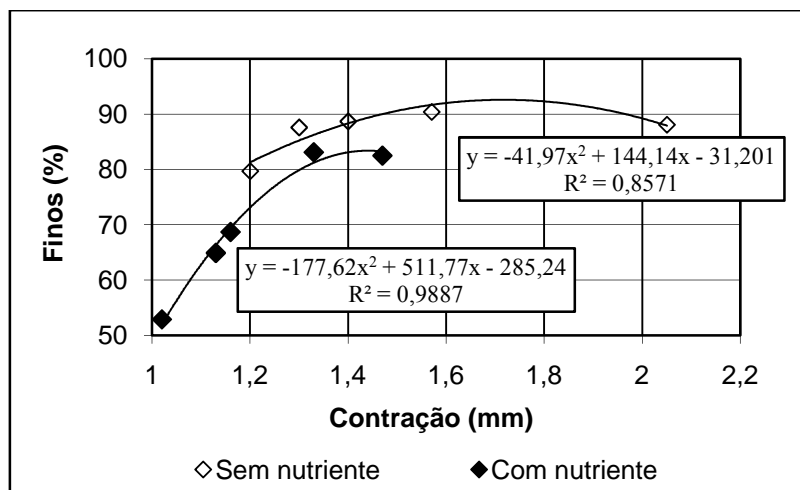


Figura 5.25. Contração pelo método MCT expedita com a porcentagem de finos dos solos do perfil da voçoroca de Santa Maria.

5.4 - CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DO PERFIL

Na Tabela 5.8 são apresentados os resultados da análise química de cada uma das camadas do perfil de solo da voçoroca de Santa Maria. Os resultados foram obtidos antes e após o tratamento com nutriente.

Tabela 5.8. Resultados da análise química das camadas do perfil de solo da voçoroca da Santa Maria com (C.N.) e sem nutriente (S.N.).

Propriedade	1m S.N.	1m C.N.	2m S.N.	2m C.N.	3m S.N.	3m C.N.	4m S.N.	4m C.N.	5m S.N.	5m C.N.
pH (água)	5,6	7,8	5,8	8,0	5,9	7,3	6,1	7,1	5,9	8,1
pH (KCL)	5,8	7,4	6,3	7,7	6,1	7,0	5,9	6,9	5,7	7,6
ΔpH	0,2	-0,4	0,5	-0,3	0,2	-0,3	-0,2	-0,2	-0,2	-0,5
Unidades (cmol/dm³ = mE/100ml)										
Cálcio + Magnésio	0,6	5,2	0,4	4,1	0,3	2,6	0,3	2,8	0,3	3,9
Cálcio	0,3	4,7	0,2	3,5	0,1	2,0	0,2	2,2	0,2	3,4
Magnésio	0,3	0,5	0,1	0,6	0,1	0,6	0,1	0,6	0,1	0,5
Potássio	0,1	0,2	0,0	0,3	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2
Sódio	0,0	0,1	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,1
Valor S	0,6	5,5	0,4	4,5	0,4	2,7	0,4	3,0	0,3	4,2
Alumínio	0,1	0,0	0,1	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Acidez Total	3,4	2,2	2,7	1,9	2,5	2,0	2,5	1,8	2,5	1,5
Valor C.T.C	4,0	7,7	3,1	6,4	2,9	4,7	2,9	4,8	2,8	5,7
Unidades (%)										
Saturação de alumínio	14,0	0,0	20,0	0,0	19,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Saturação de bases	16,0	71,5	13,0	70,5	15,0	57,4	14,0	62,1	12,0	73,8
Unidades (g/kg)										
Carbono orgânico	12,7	11,0	7,9	8,4	3,0	4,3	2,9	2,3	3,0	2,2
Matéria orgânica	21,8	18,9	13,6	14,4	5,2	7,4	5,0	4,0	5,2	3,8
Unidades (mg/dm³)										
Fósforo	8,5	1,0	1,5	0,5	1,0	1,0	0,5	0,5	1	8,5

Na Figura 5.26a, observa-se que ao adicionar o nutriente às amostras, o pH passou de levemente ácido para levemente básico, considerando como básicos os solos com pH em água maior que 7. O pH básico é o desejado para gerar o ambiente propício para as bactérias precipitar o carbonato de cálcio. Por consequência, o aumento do pH com a adição do nutriente proporciona a diminuição da acidez (Figura 5.26c).

No caso das amostras sem nutriente verifica-se a tendência do pH aumentar com a profundidade, enquanto a acidez, a Capacidade de Troca Catiônica (C.T.C) e o Δ pH tendem a diminuir (Figura 5.26a,b,c,d). É importante observar que o Δ pH passa de valores positivos nas camadas mais superficiais para valores negativos a partir de 4m. Isto reflete o maior grau de intemperização do solo superficial.

Para as amostras com nutriente, merece destaque o fato de que nos três primeiros metros correspondentes a valores de Δ pH positivos, os teores de cálcio e a C.T.C diminuem com a profundidade, porém, no momento em que ele se torna negativo esses parâmetros começam a aumentar (Figura 5.26e). Adicionalmente, a geração do carbonato de cálcio depende da existência do carbono e do cálcio daí a importância da relação que se observa entre o teor de carbono orgânico e o teor de cálcio. Até 3m de profundidade ocorre redução nas quantidades de cálcio e carbono, sendo maior a taxa de redução do carbono que do cálcio. Depois de 3m continua havendo redução do carbono, mas o cálcio aumenta e fica em quantidades maiores que o carbono. Isto significa que nem todo o cálcio forma calcita nestas profundidades, parte do cálcio deve estar disponível e associado aos minerais ou formando complexos químicos. Além disso, nos primeiros 3m sobra carbono, significando que pode haver maior adição de cálcio, pois a relação destes elementos na calcita é de 1:1.

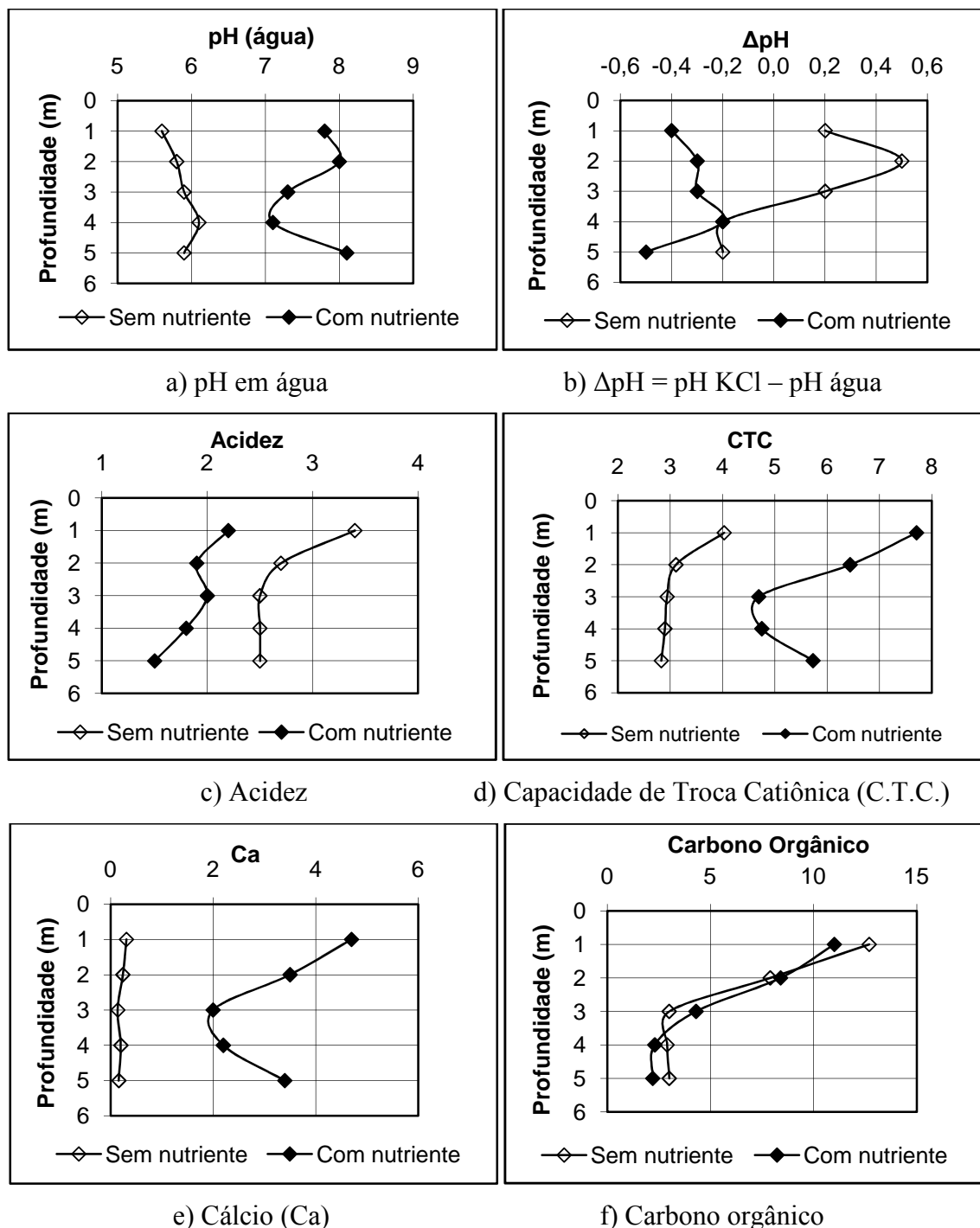


Figura 5.26. Propriedades químicas para os solos do perfil da voçoroca de Santa Maria.

Na análise do comportamento do perfil de solo natural diante da adição do nutriente verifica-se ao relacionar as condições iniciais do solo com o teor de cálcio, que este aumenta com a diminuição do pH e com o aumento da acidez, da C.T.C e do teor de carbono (Figura 5.27a,b,c,d). A Figura 5.27 ilustra, portanto, que existe uma relação das propriedades químicas iniciais do solo e a quantidade de precipitado formado.

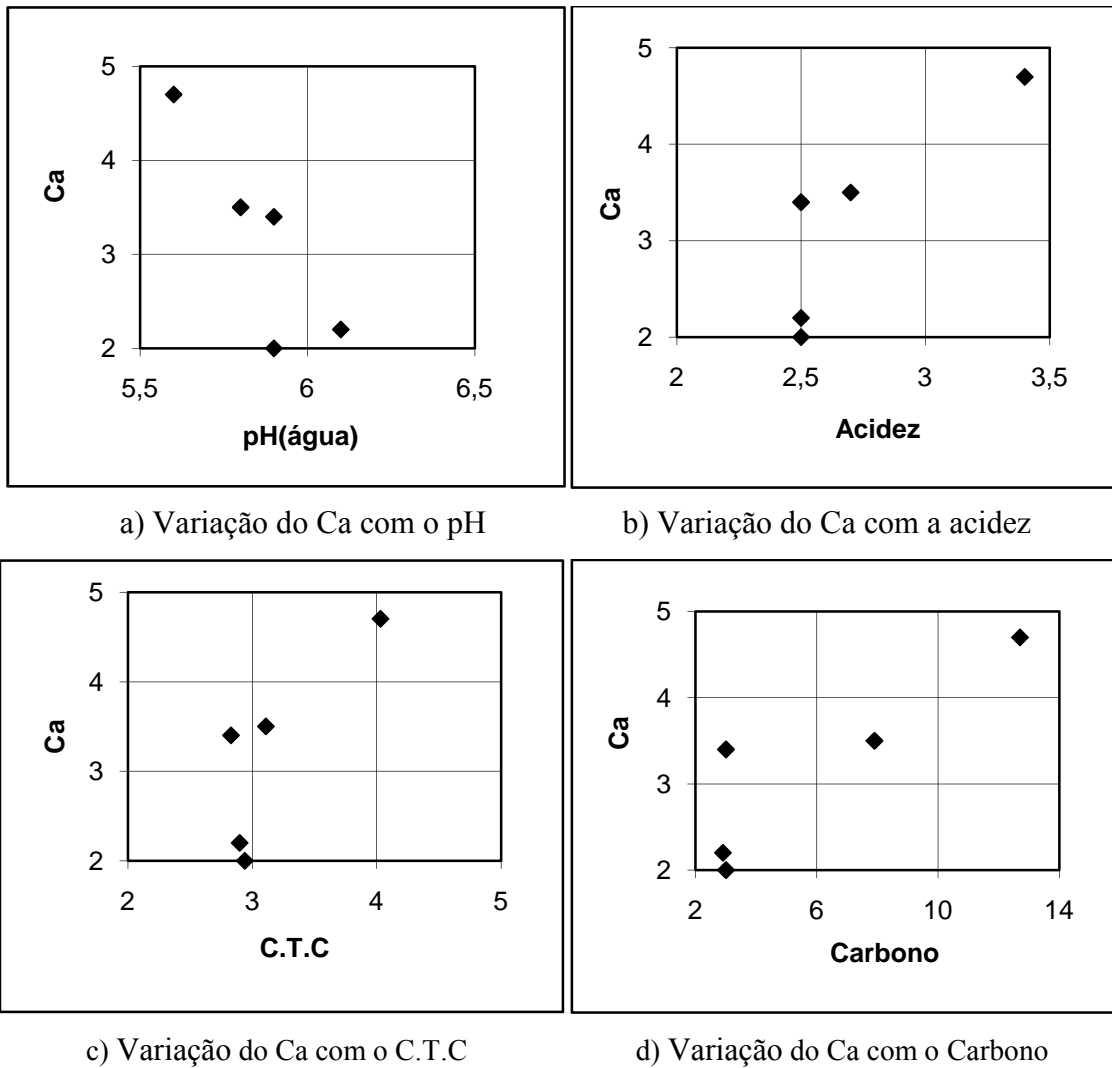


Figura 5.27. Variações do teor de cálcio com algumas propriedades químicas no perfil de solo da voçoroca de Santa Maria.

Na Figura 5.28 se ilustra a relação existente entre a acidez e o índice de plasticidade considerando-se o conjunto das amostras, ou seja, as naturais e as tratadas. Nesta figura se observa um comportamento que chama a atenção, onde o I_p tende a aumentar com a acidez no perfil de solo estudado. Isto se deve possivelmente, a que quando se tem acidez maior se requiere de maior quantidade de água para neutralizar o solo, ficando uma capa maior de água envolvendo a partícula, incrementando assim o I_p .

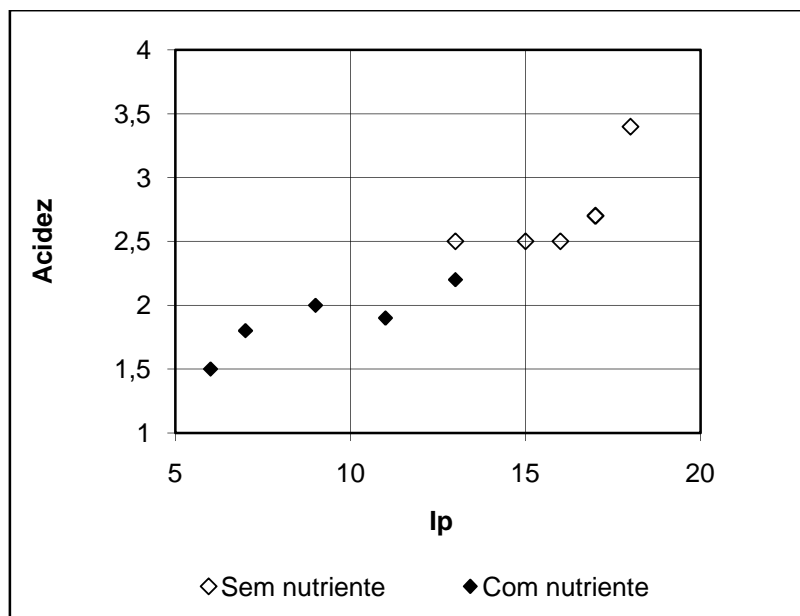


Figura 5.28. Variações do índice de plasticidade com a acidez do perfil de solo da voçoroca de Santa Maria.

No Anexo 1 são apresentadas algumas correlações estatísticas entre as propriedades químicas e físicas do perfil da voçoroca de Santa Maria sem adição do nutriente e com a adição do nutriente, usando a ferramenta de “Análise de dados – correlações” do “Excel”. Os valores obtidos são interpretados como o fator de correlação, sendo que um valor positivo indica correlação direta entre os elementos e um valor negativo correlação inversa. Adicionalmente, quanto mais próximo de +1,0 ou de -1,0 a correlação é melhor. Normalmente correlações acima de 0,85 são consideradas como boas.

5.5 - CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA DO PERFIL

Nas Figuras 5.29 a 5.38 são apresentados os difratogramas de raios X (análise integral ou total) para cada uma das camadas do perfil de solo da voçoroca de Santa Maria, no estado natural e depois de tratado com o nutriente. Para algumas das amostras foi necessária a realização, além da análise integral, da análise da fração argila no estado natural, glicolada e calcinada, de modo a identificar todos os minerais presentes nas amostras. No Anexo 2, são apresentados estes difratogramas adicionais.

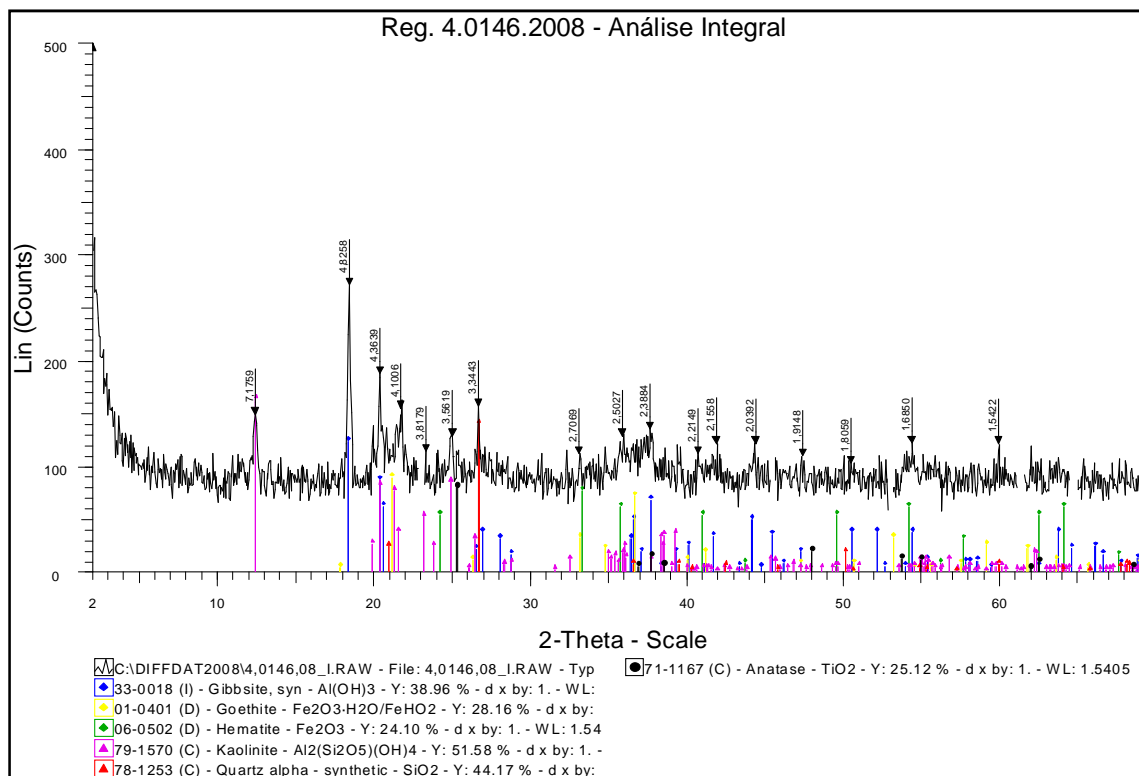


Figura 5.29. Difratoograma de raios X para a amostra coletada a 1m de profundidade no perfil de solo de Santa Maria na amostra natural.

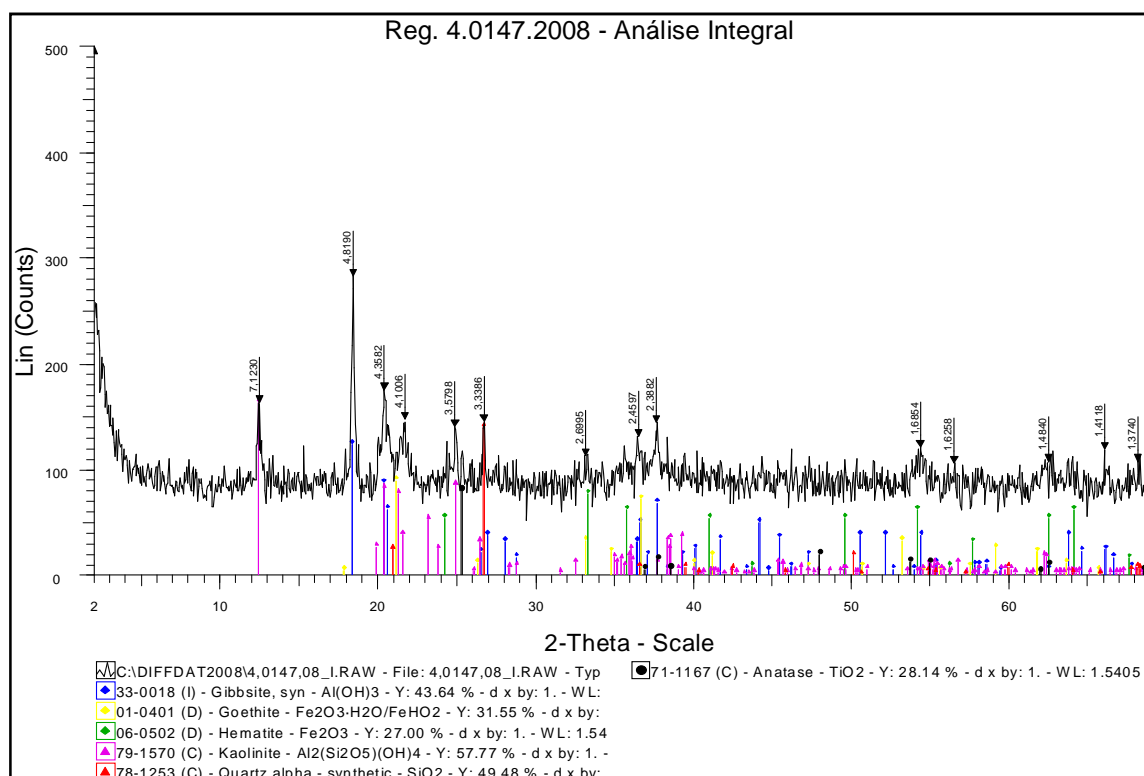


Figura 5.30. Difratoograma de raios X para a amostra coletada a 2m de profundidade no perfil de solo de Santa Maria na amostra natural.

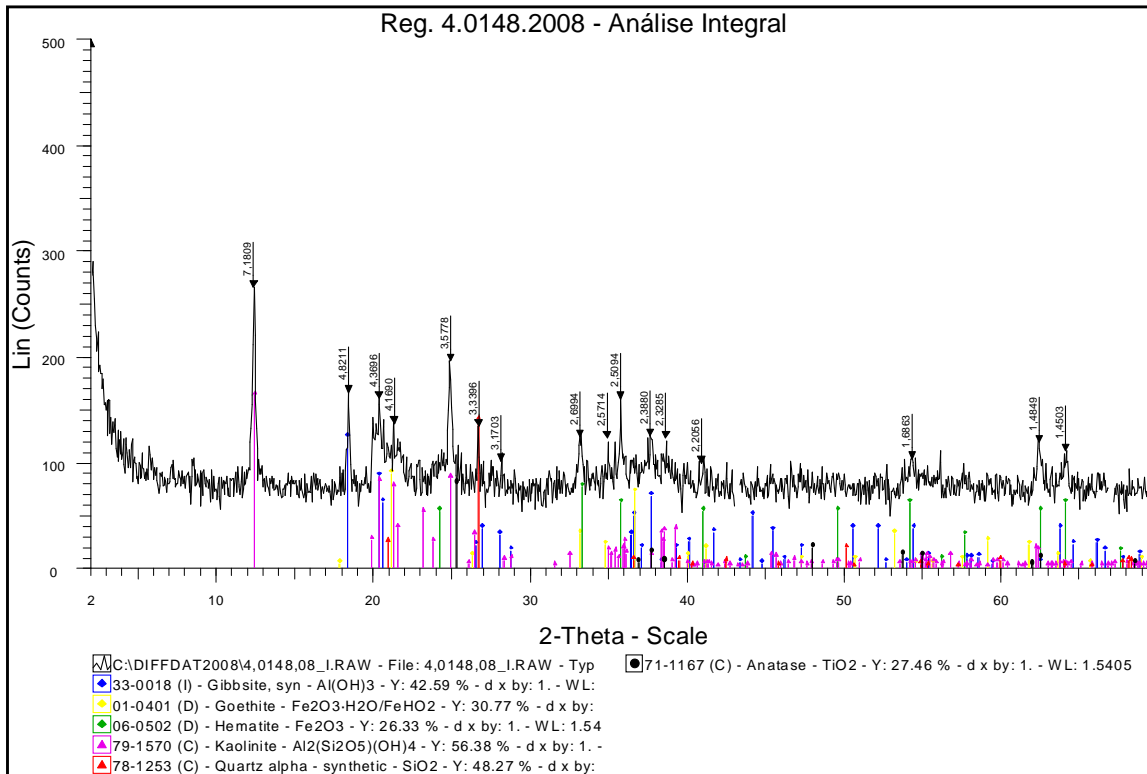


Figura 5.31. Difratoograma de raios X para a amostra coletada a 3m de profundidade no perfil de solo de Santa Maria na amostra natural.

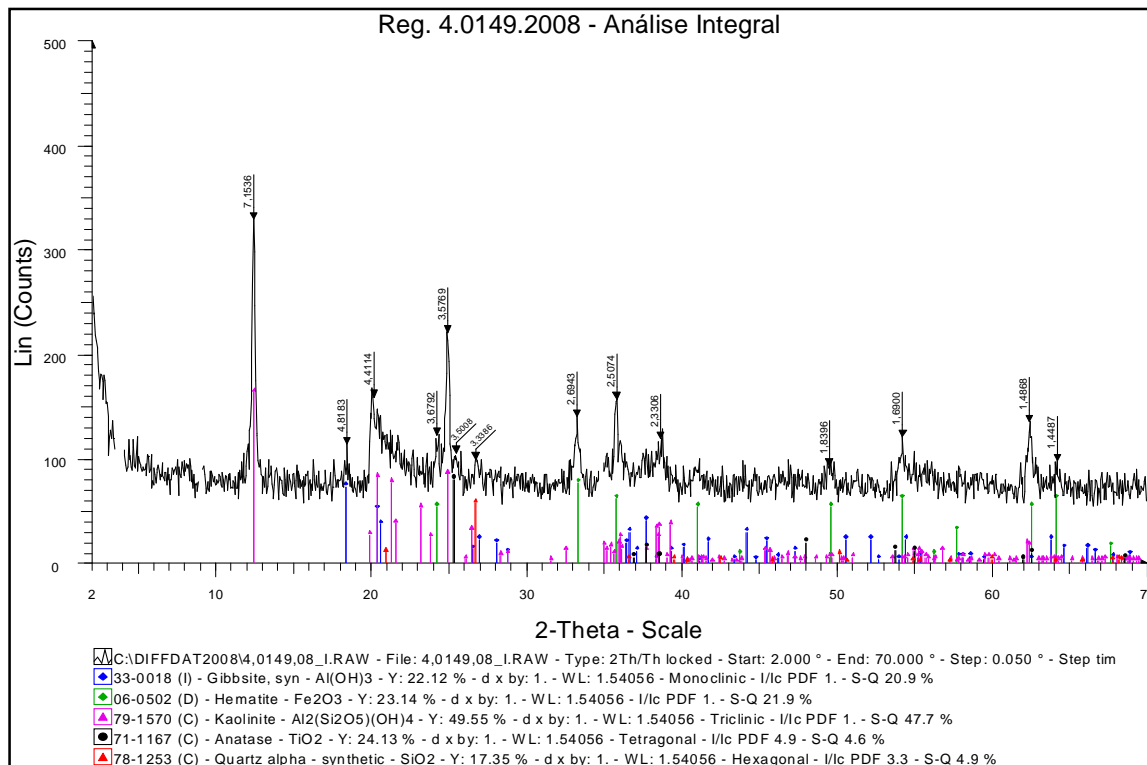


Figura 5.32. Difratoograma de raios X para a amostra coletada a 4m de profundidade no perfil de solo de Santa Maria na amostra natural.

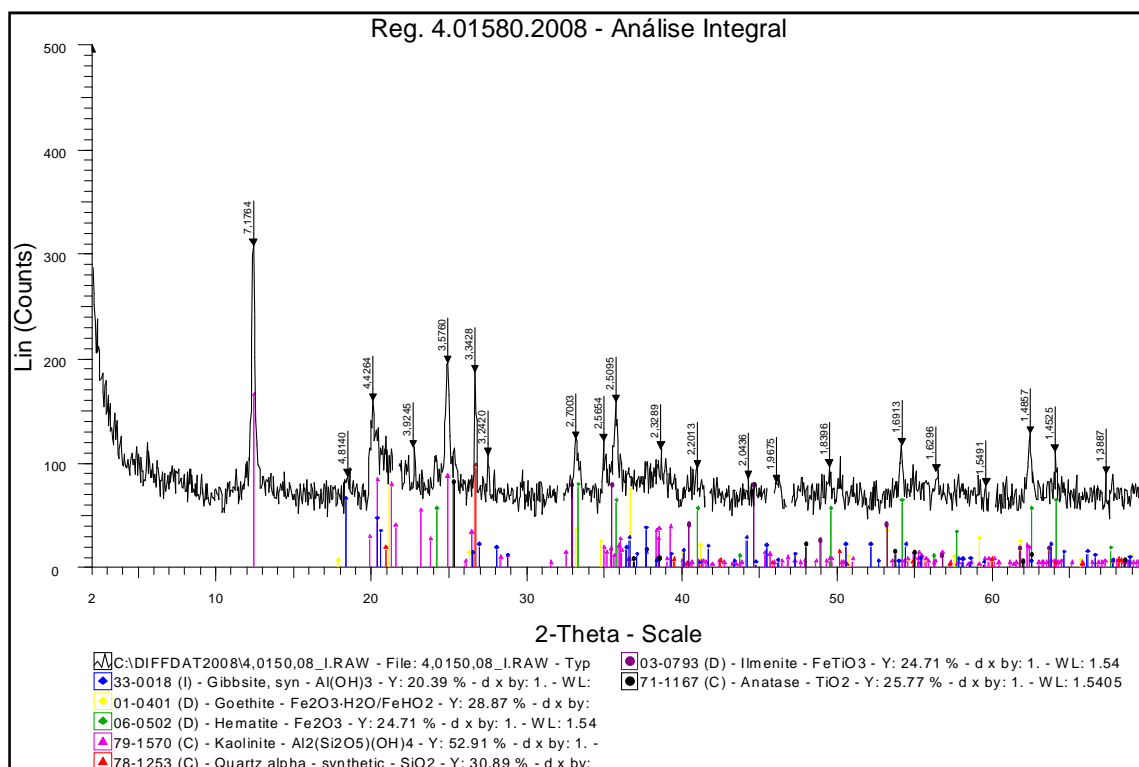


Figura 5.33. Difratoograma de raios X para a amostra coletada a 5m de profundidade no perfil de solo de Santa Maria na amostra natural.

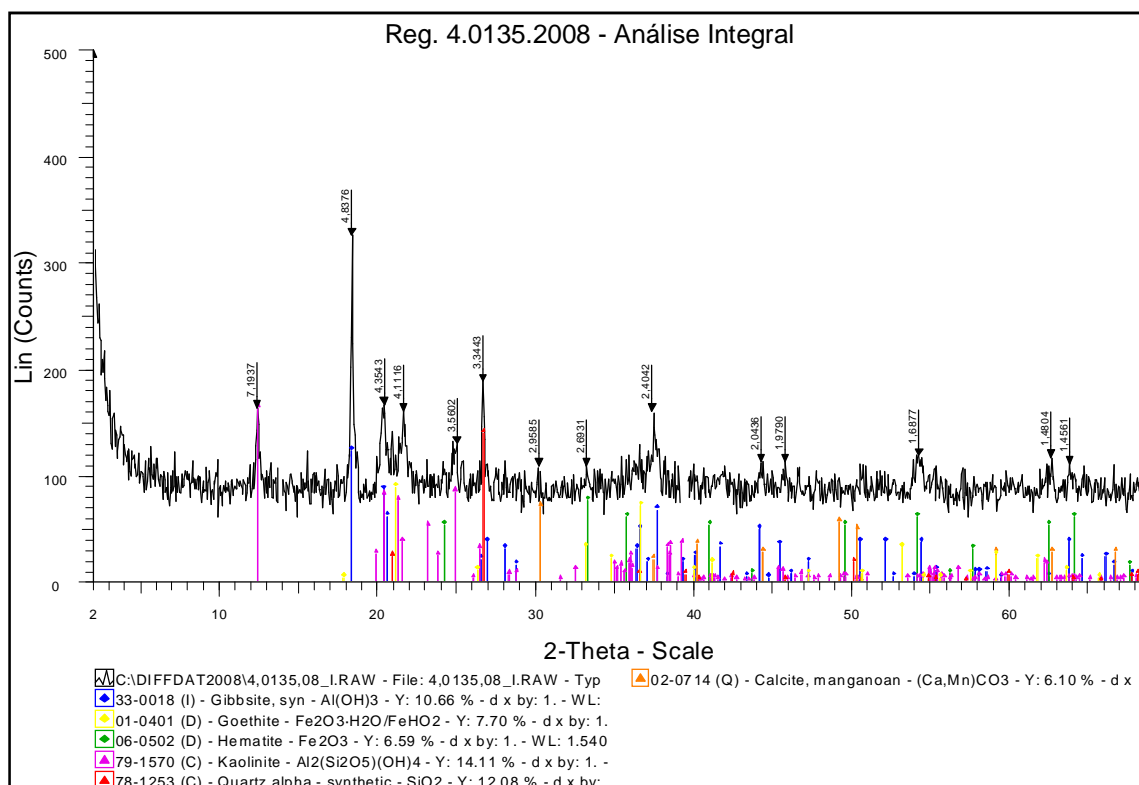


Figura 5.34. Difratoograma de raios X para a amostra coletada a 1m de profundidade no perfil de solo de Santa Maria e tratada com nutriente.

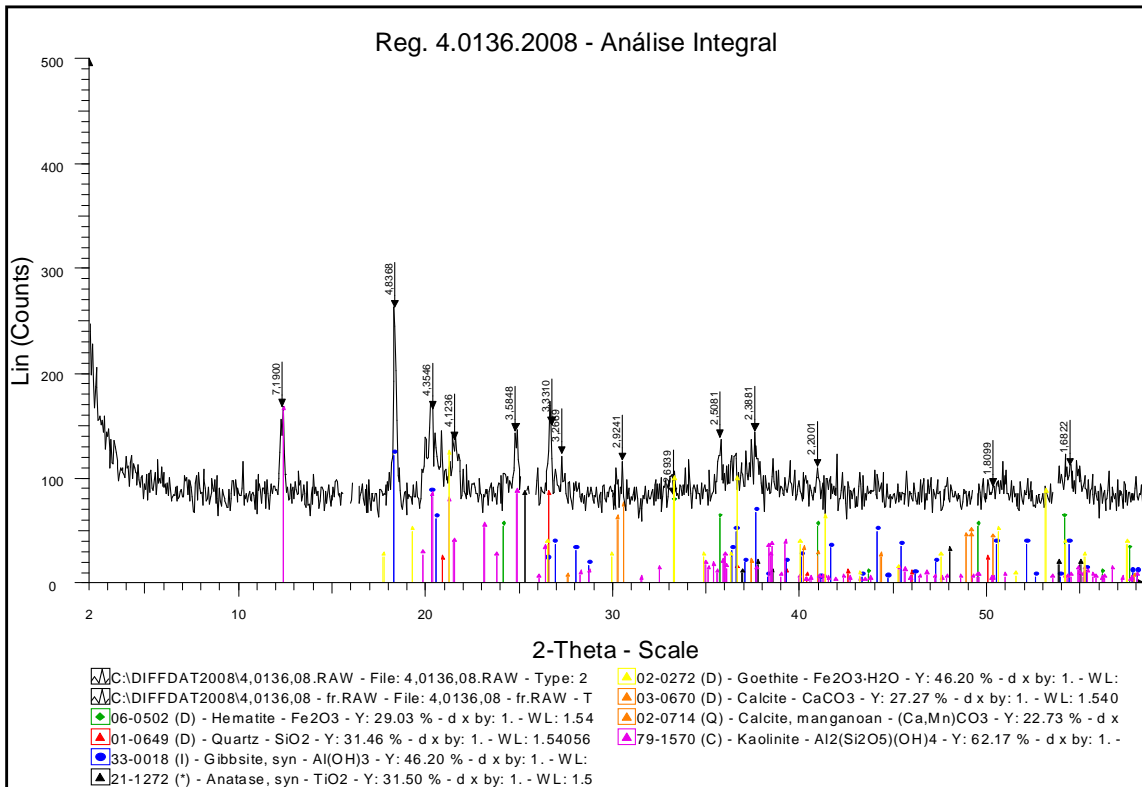


Figura 5.35. Difratoograma de raios X para a amostra coletada a 2m de profundidade no perfil de solo de Santa Maria e tratada com nutriente.

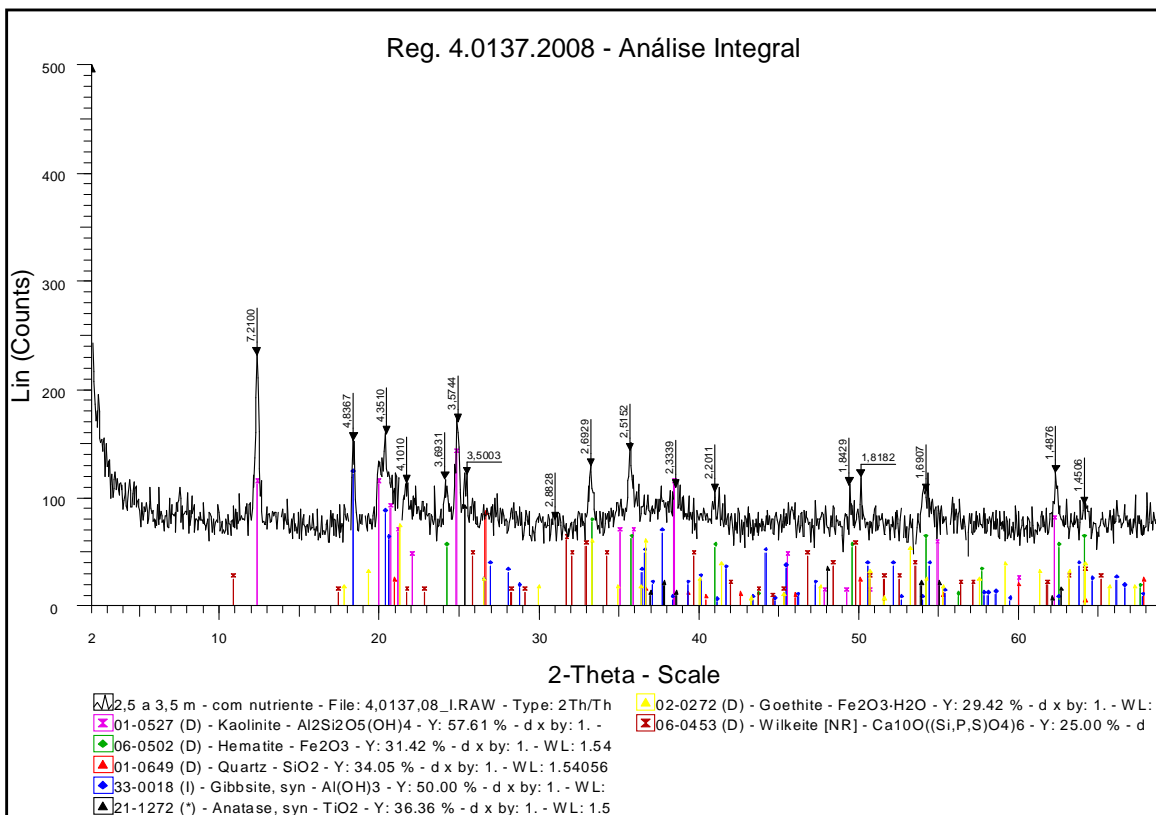


Figura 5.36. Difratoograma de raios X para a amostra coletada a 3m de profundidade no perfil de solo de Santa Maria e tratada com nutriente.

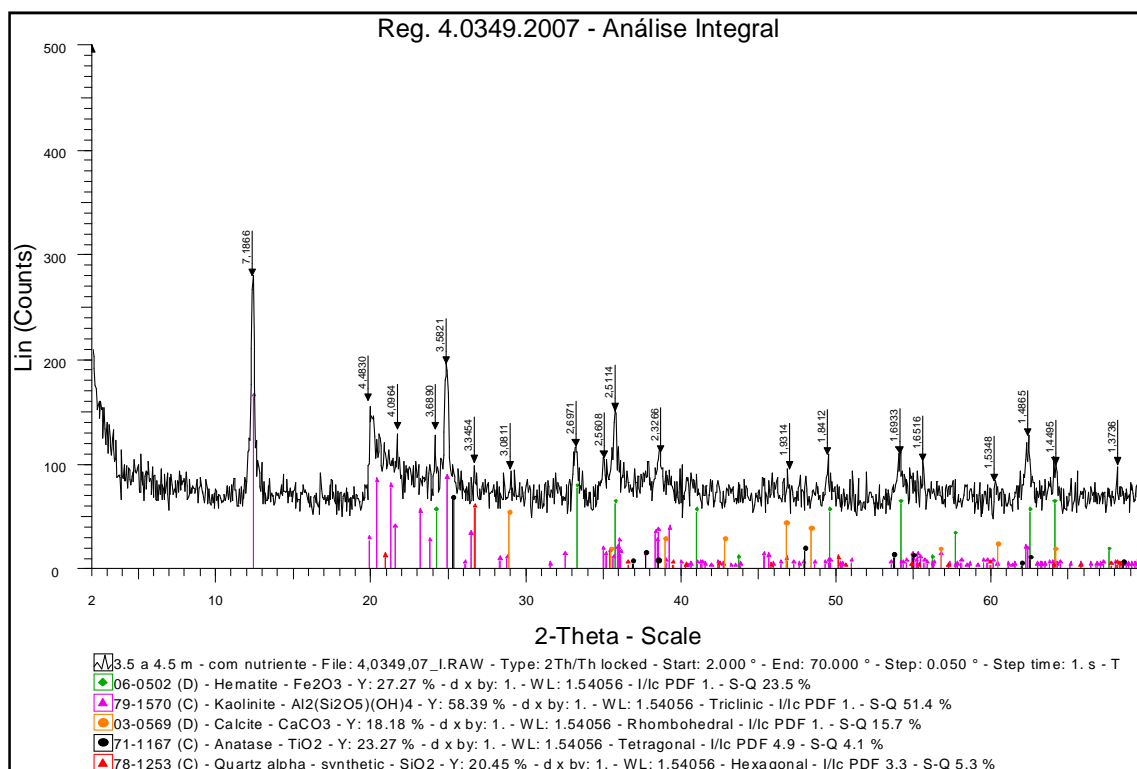


Figura 5.37. Difratoograma de raios X para a amostra coletada a 4m de profundidade no perfil de solo de Santa Maria e tratada com nutriente.

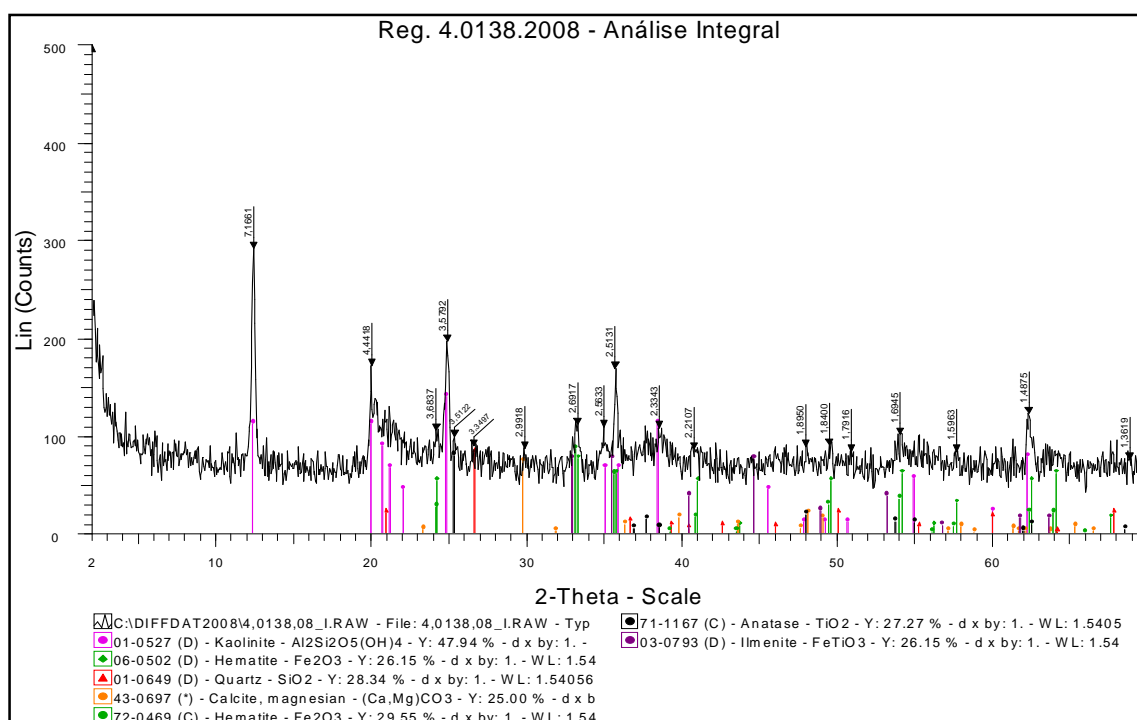


Figura 5.38. Difratoograma de raios X para a amostra coletada a 5m de profundidade no perfil de solo de Santa Maria e tratada com nutriente.

A partir dos difratogramas, foram determinadas as intensidades dos picos principais de cada mineral presente nas amostras analisada (Figuras 5.39 e 5.30). As intensidades não refletem as quantidades exatas dos minerais, devido a que estas dependem de muitos fatores, mas brindam uma idéia estimada da variação de suas proporções no perfil. Este procedimento foi adotado por não se ter realizado uma análise quantitativa dos minerais presentes nos solos.

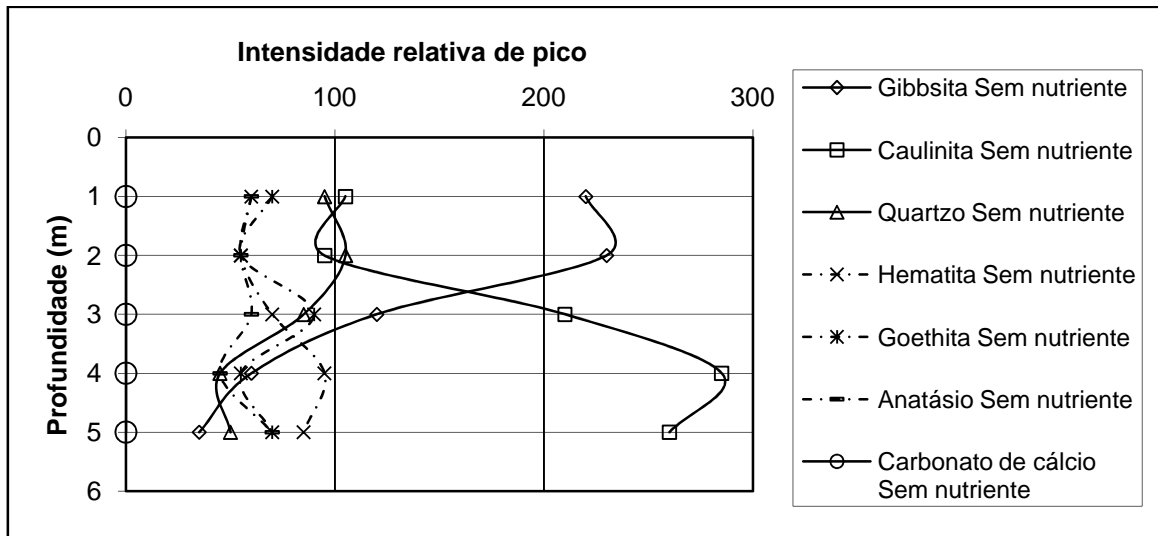


Figura 5.39. Intensidade dos picos principais dos diferentes minerais em profundidade para as amostras sem nutriente no perfil de solo da voçoroca de Santa Maria.

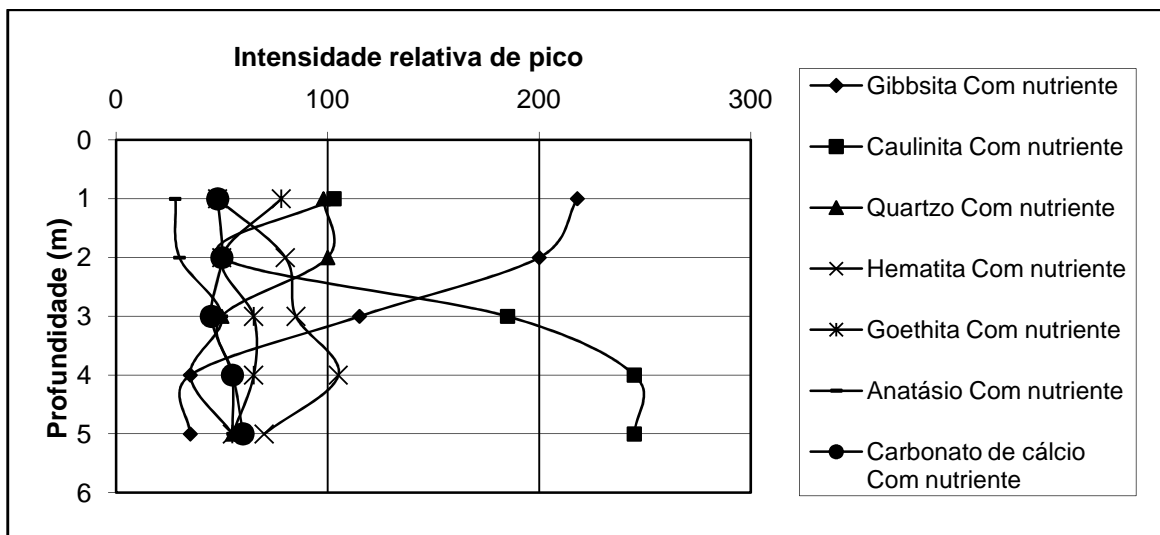


Figura 5.40. Intensidade dos picos principais dos diferentes minerais em profundidade para as amostras com nutriente no perfil de solo da voçoroca de Santa Maria.

Constata-se inicialmente na Figura 5.39 que as variações ao longo do perfil nos teores de caulinita e gibbsita refletem o nível de intemperização do solo, devido à diminuição da caulinita e o aumento da gibbsita em direção à superfície. Ainda, no que tange à intemperização do perfil merece destaque o aumento relativo do teor de quartzo nos dois primeiros metros, sendo este fruto da lixiviação ocorrida nessas camadas tornando-as mais porosas.

Das Figuras 5.39 e 5.40, pode-se observar que os minerais foram conservados ao passar da amostras sem nutriente para as amostras com nutriente, ou seja, o tratamento não afeta a composição mineralógica inicial. Verifica-se, porém na Figura 5.40 o surgimento de minerais de carbonato de cálcio (calcita a 1m, 2m, 4m e 5m e wilkeita a 3m), confirmando assim, mesmo que em pequena quantidade, a precipitação gerada pela atividade bacteriana quando do tratamento, os quais não existiam no solo sem a adição do nutriente. É importante ressaltar, que se observa em geral a possível relação da ação do nutriente com a quantidade de caulinita presente no solo, a qual a sua vez tem relação com a adesão das bactérias Gram-positivas, mostrando-se estas bactérias como promissoras na precipitação do carbonato de cálcio.

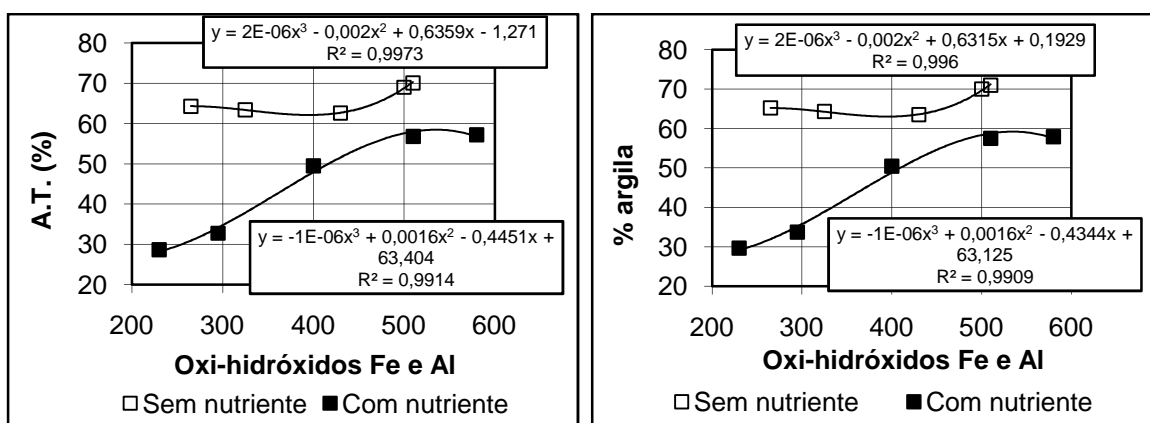
Para confirmar a presença do carbonato de cálcio formado, pingou-se ácido clorídrico (HCl) sobre as amostras de solo tratadas com nutriente, sendo que todas elas apresentaram efervescência quando do uso desse procedimento (Figura 5.41).



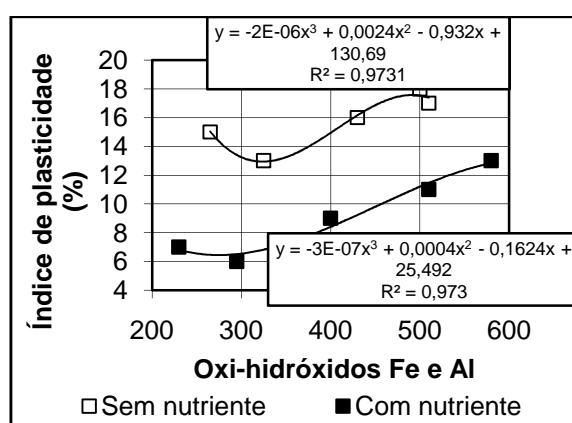
Figura 5.41. Teste com o ácido clorídrico.

Analisou-se ainda a relação entre as propriedades mineralógicas e as propriedades físicas e químicas do solo.

As Figuras 5.42a,b,c ilustram respectivamente as correlações entre os agregados totais (A.T.), a porcentagem de partículas tamanho argila e o índice de plasticidade com a soma das intensidades dos picos de oxi-hidróxidos de Fe e Al. Consta-se desses resultados que o teor de agregados, o teor de partículas tamanho argila e o índice de plasticidade tendem a aumentar com o crescimento dos teores dos oxi-hidróxidos de Fe e Al no solo natural, sendo esta tendência muito mais clara quando do tratamento com o nutriente, isto porque o nutriente confere maior estabilidade aos agregados. Cardoso (2002) indica que em solos intemperizados contendo oxi-hidróxidos de Fe e Al, estes são importantes agentes na agregação.



a) A.T. com oxi-hidróxidos de Fe e Al b) % argila com oxi-hidróxidos de Fe e Al



c) Índice de plasticidade com oxi-hidróxidos de Fe e Al

Figura 5.42. Correlação entre propriedades físicas e a soma dos picos dos oxi-hidróxidos de Fe e Al para o perfil de solo da voçoroca de Santa Maria.

No caso dos minerais de carbonato de cálcio, verifica-se a tendência a aumentar a capacidade de troca catiônica (C.T.C.) com o incremento dos minerais de carbonato de cálcio (Figura 5.43). Como a C.T.C. é constituída da somatória dos cátions básicos ($\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++} + \text{Na}^{+} + \text{K}^{+}$) e dos cátions ácidos ($\text{H}^{+} + \text{Al}^{+++}$) (Lima, 2003), ao aumentar o cálcio com a precipitação dos carbonatos de cálcio, aumenta a capacidade de troca catiônica. Isto encontra-se em concordância com o já determinado (pág. 116) para o cálcio com a C.T.C.

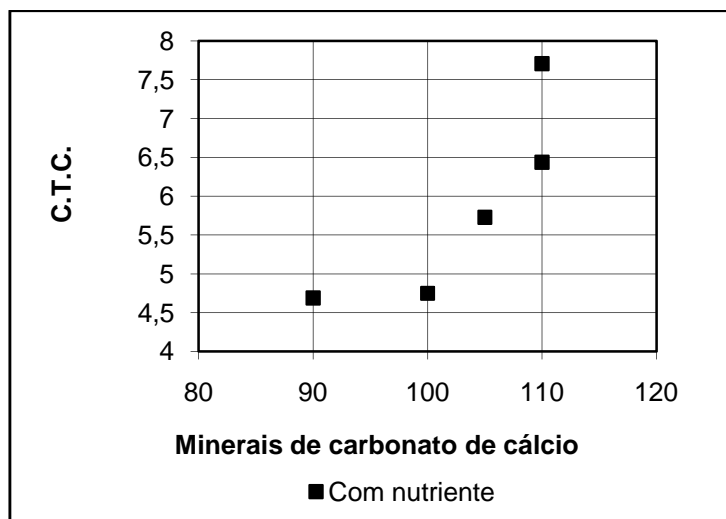


Figura 5.43. Correlação entre a Capacidade de Troca Catiônica e os minerais de carbonato de cálcio dos solos do perfil da voçoroca de Santa Maria.

5.6 - CARACTERIZAÇÃO DA ESTRUTURA DO PERFIL

Para analisar a estrutura do solo constituinte do perfil de intemperização antes e após a adição do nutriente, foi usada como primeira aproximação uma lupa eletrônica de alta resolução com luz natural. Na Figura 5.44, são apresentadas as imagens obtidas. Nas amostras sem nutriente é possível observar que na medida em que a profundidade diminuiu os solos passam a apresentar uma estrutura mais aberta (Figura 5.44a a 5.44e). Provavelmente seja por isso, que nas camadas superficiais, ao tratar os solos com o nutriente ficam mais evidentes as precipitações formadas (Figura 5.44f a 5.44j), apontando para a importância da porosidade no tratamento. Cabe lembrar, que como a adição do nutriente foi feita preenchendo-se 60% dos vazios, as quantidades de nutriente aumentaram com o aumento da porosidade em direção à superfície.

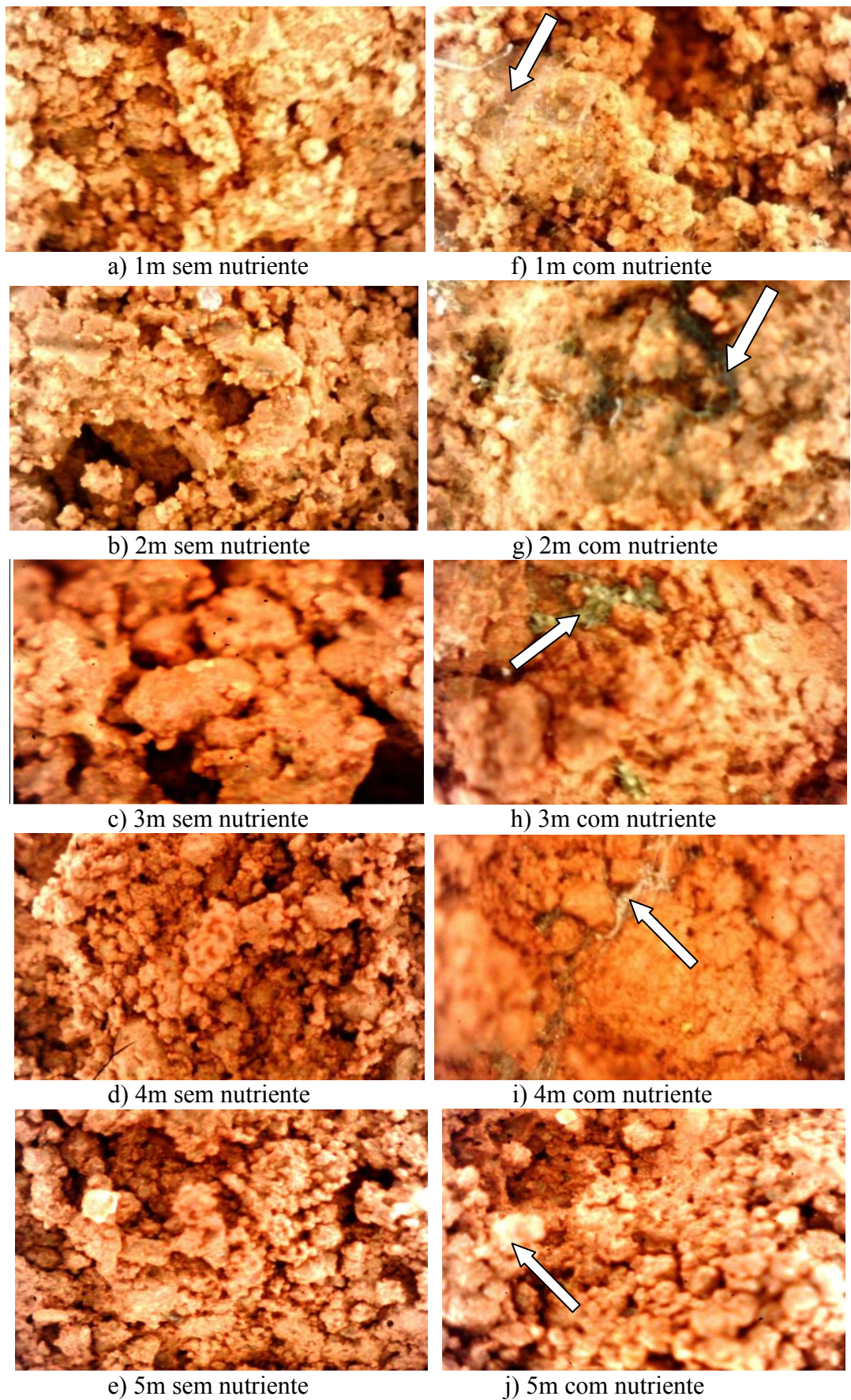
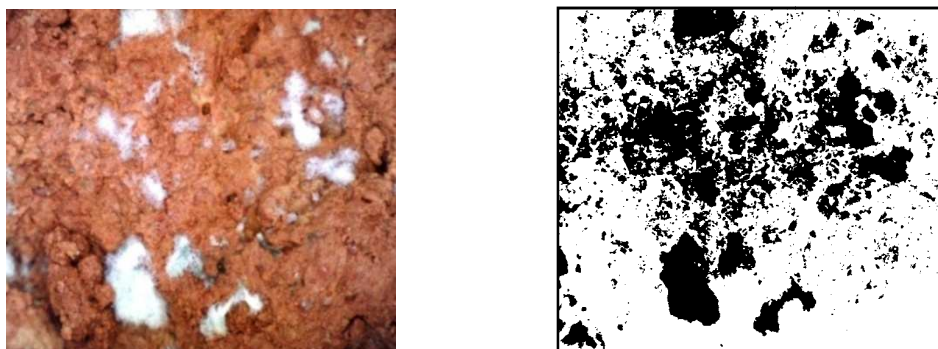


Figura 5.44. Imagens na lupa de alta resolução com luz natural da estrutura das camadas de solo sem e com nutriente do perfil da voçoroca de Santa Maria, aumentos de 100 vezes.

Buscando avaliar de uma forma preliminar, simples e rápida os percentuais de precipitações de carbonato de cálcio, utilizaram-se para as amostras com nutriente, os programas “Photoshop” e “Scion” para o tratamento das imagens obtidas com a lupa eletrônica de alta resolução, com 50 vezes de aumento. A Figura 5.45 apresenta como exemplo as imagens tratadas para 3m de profundidade. A cor preta na Figura 5.45b, representa os precipitados de carbonato de cálcio.



a) Imagem luz natural, 3m de profundidade b) Imagem tratada, 3m de profundidade

Figura 5.45. Tratamento da imagem obtida com a lupa eletrônica de alta resolução com 50 vezes de aumento para a amostra com nutriente a 3m de profundidade para a voçoroca de Santa Maria.

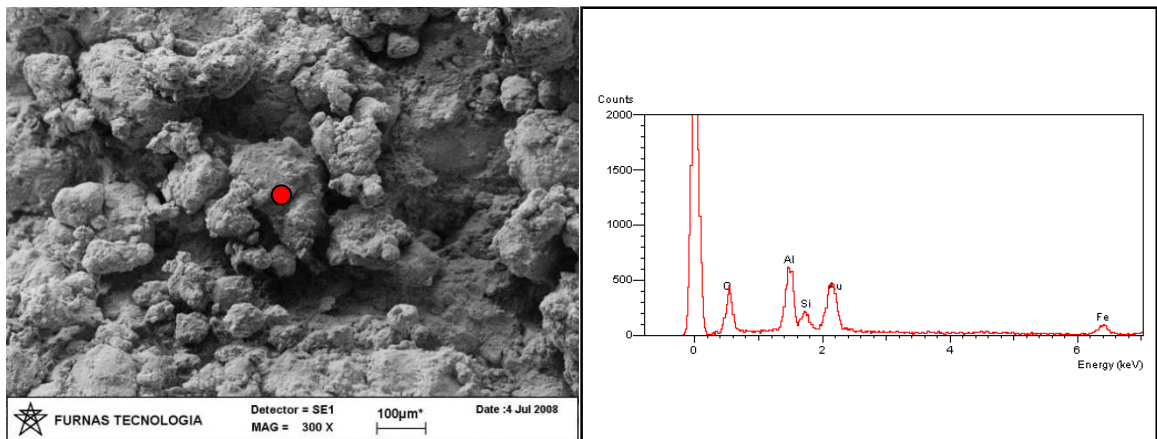
As porcentagens de precipitados (áreas pretas) são calculadas a partir da área total da imagem, na Tabela 5.9 são apresentadas estas porcentagens, considerando as áreas de maior ocorrência de precipitados de carbonato de cálcio. Nelas se observa que as quantidades precipitadas são consideráveis variando entre 30% e 43%. Adicionalmente, estas quantidades são muito semelhantes entre si, contrariando assim, a observação puramente visual feita anteriormente. Esta análise deve ser vista com cuidado pelo método ser preliminar, em 2D e da área de maior quantidade de precipitação, entre outras, podendo subestimar ou sobreestimar as quantidades de precipitados reais presentes nas amostras.

Tabela 5.9. Porcentagens de precipitados, calculado a partir das imagens tratadas para o perfil de solo da voçoroca de Santa Maria.

Profundidade (m)	Área da imagem (m ²)	Área do precipitado (m ²)	Porcentagem de carbonato de cálcio (%)
1	0,0930	0,031	33,21
2	0,0918	0,035	37,72
3	0,0918	0,028	30,19
4	0,0918	0,039	42,83
5	0,0918	0,033	36,44

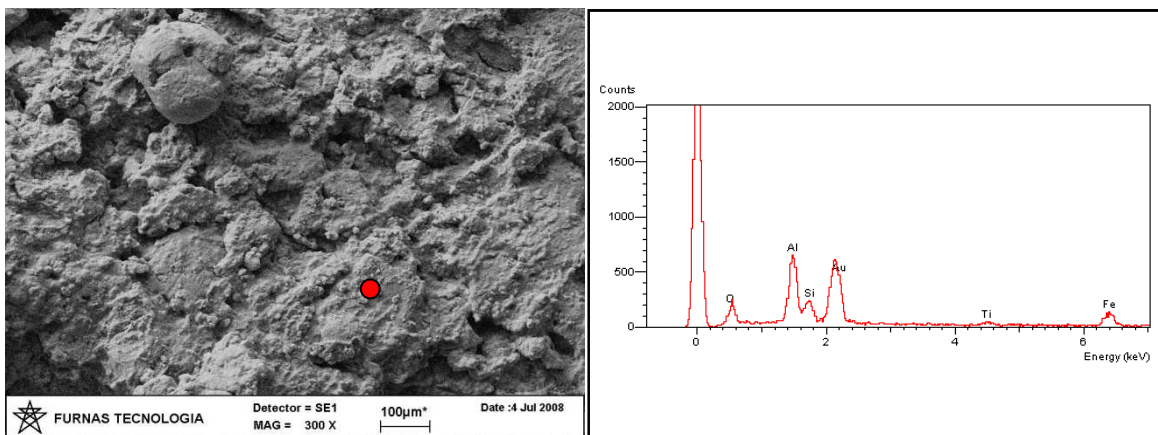
Para ter uma melhor visualização da estrutura e da micro-estrutura das diferentes camadas do perfil de solo, foram realizadas imagens das amostras a partir do microscópio eletrônico de varredura (MEV). Os resultados sem e com nutriente são apresentados respectivamente nas Figuras 5.46 e Figura 5.47. Estas imagens estão acompanhadas da análise química realizada em um ponto determinado. Imagens obtidas utilizando-se a mesma técnica, porém, com outros aumentos, são apresentadas no Anexo 3.

Na Figura 5.46 pode-se observar que quando não se tem nutriente a análise química ilustra elementos comuns nos solos tropicais. Adicionalmente se vê como a estrutura se faz mais aberta na medida em que se aproxima da superfície, ilustrando assim, o efeito do avanço do intemperismo nessa direção, o que coincide com o aumento do índice de vazios na superfície.



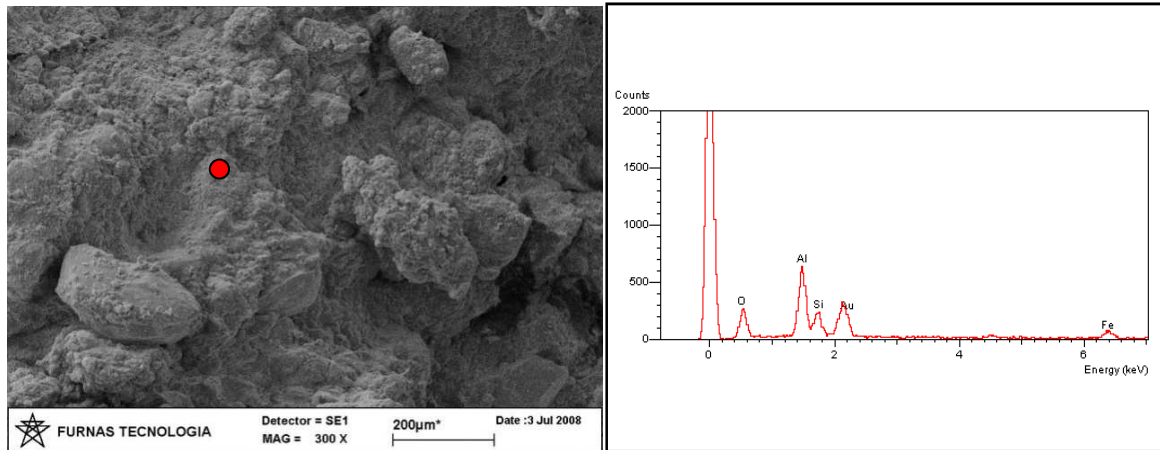
a) 1m de profundidade

b) Composição química do ponto vermelho 1m



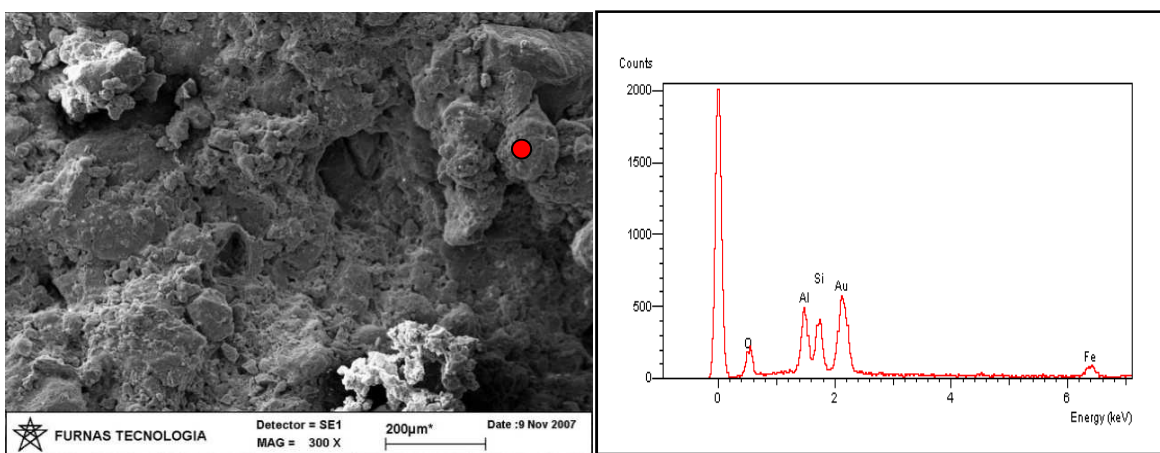
c) 2m de profundidade

d) Composição química do ponto vermelho 2m



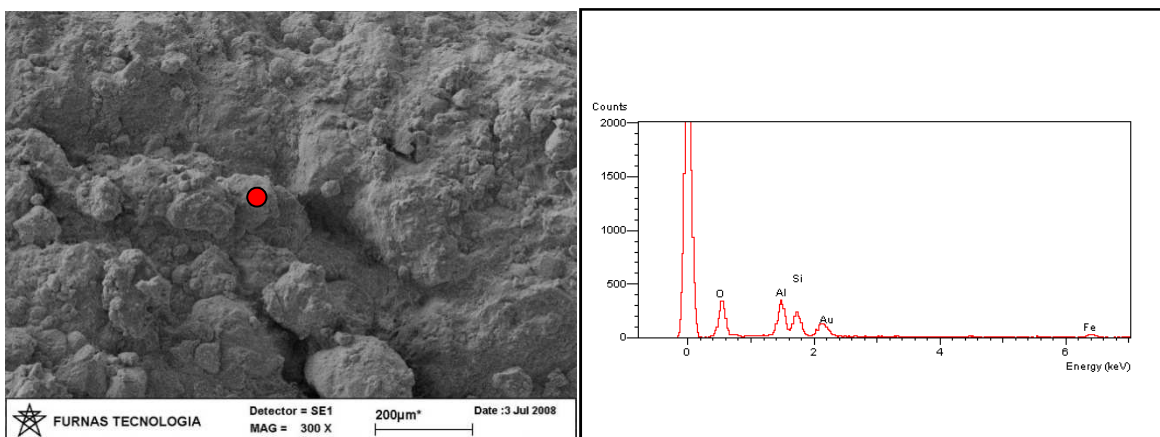
e) 3m de profundidade

f) Composição química do ponto vermelho 3m



g) 4m de profundidade

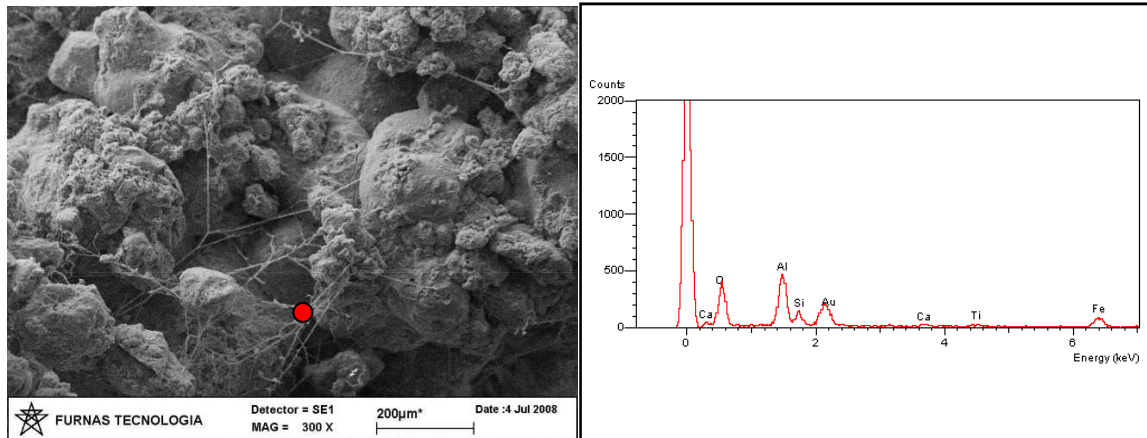
h) Composição química do ponto vermelho 4m



i) 5m de profundidade

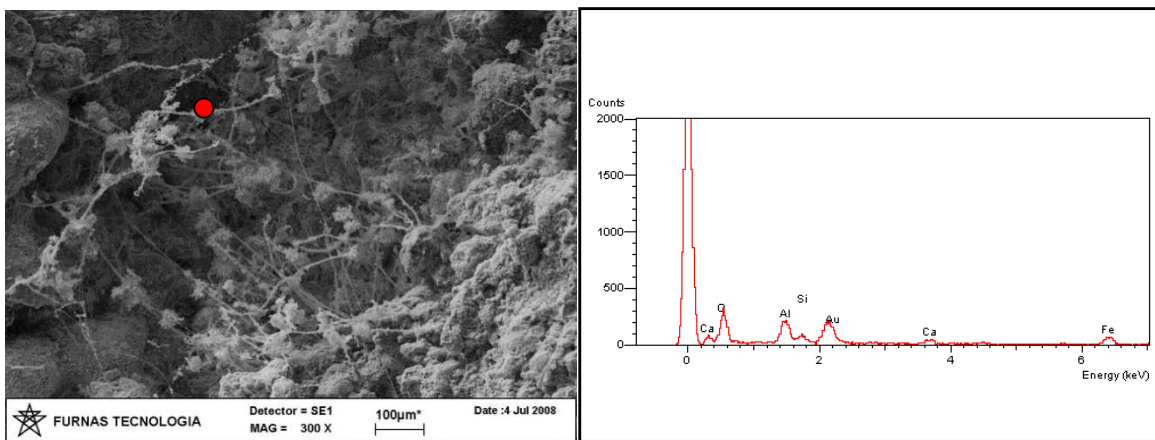
j) Composição química do ponto vermelho 5m

Figura 5.46. Imagens no MEV das diferentes camadas de solo sem nutriente do perfil de solo da voçoroca de Santa Maria, em 300 aumentos.



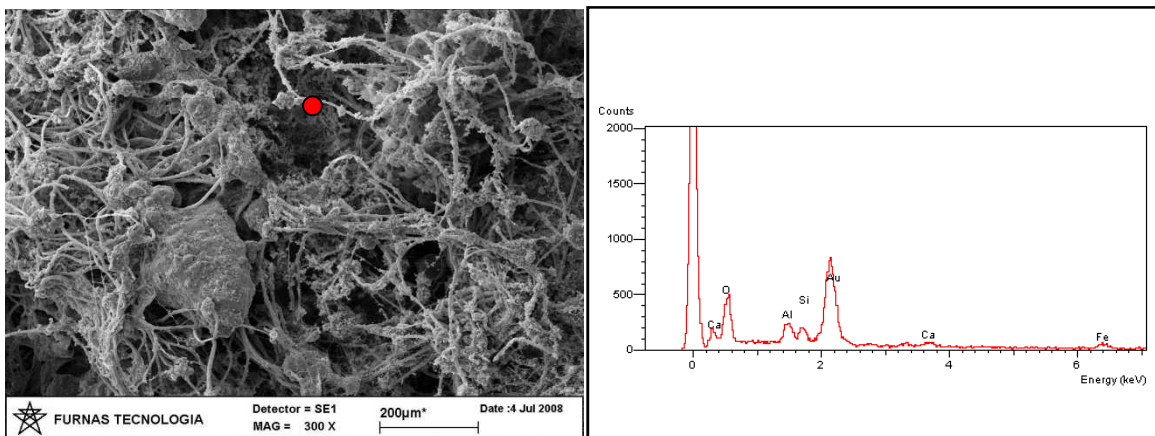
a) 1m de profundidade

b) Composição química do ponto vermelho 1m



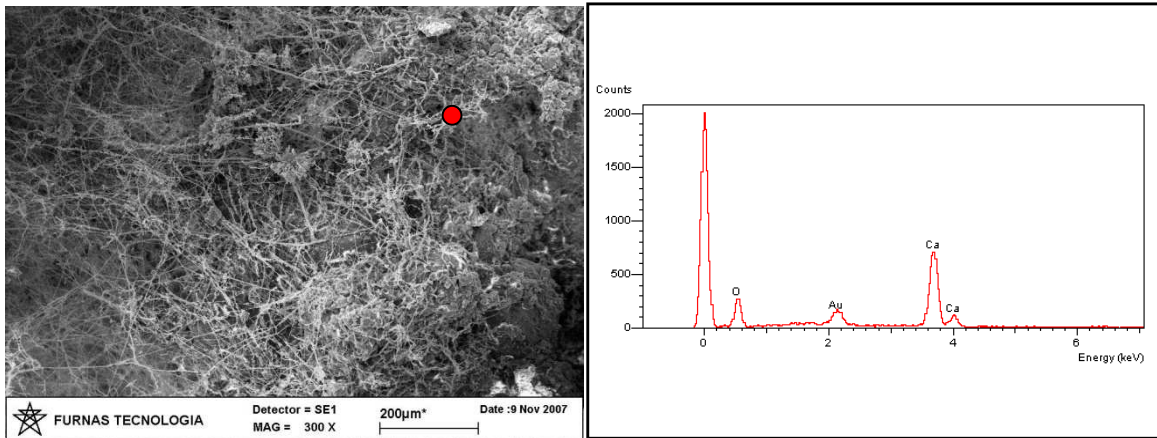
c) 2m de profundidade

d) Composição química do ponto vermelho 2m



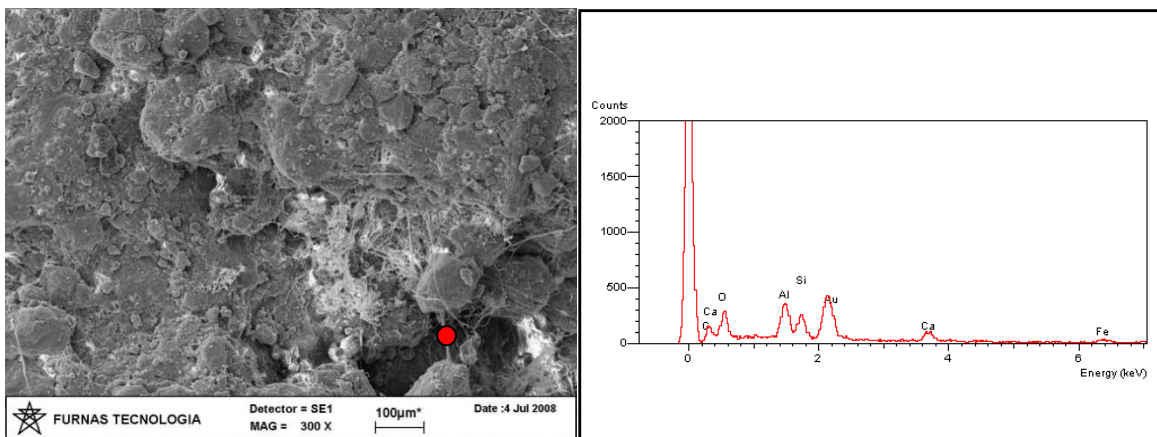
e) 3m de profundidade

f) Composição química do ponto vermelho 3m



g) 4m de profundidade

h) Composição química do ponto vermelho 4m

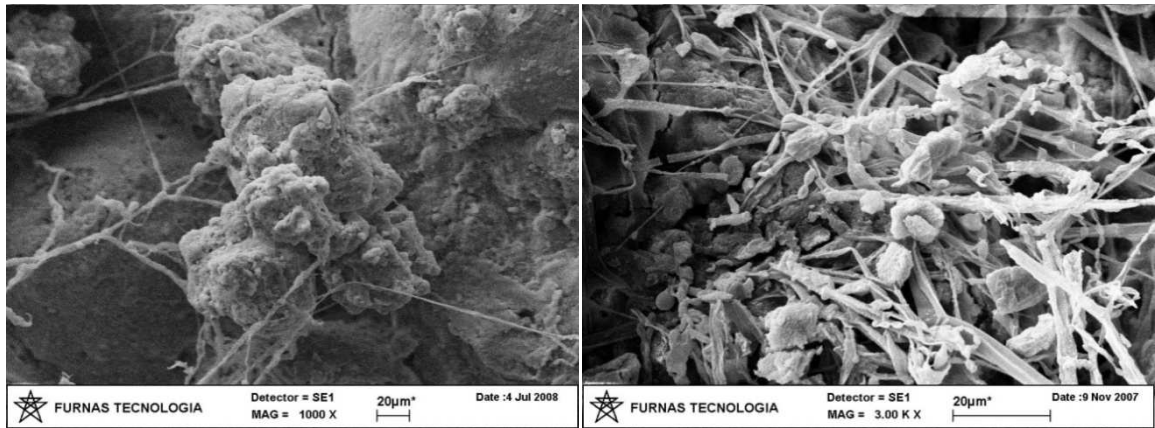


i) 5m de profundidade

j) Composição química do ponto vermelho 5m

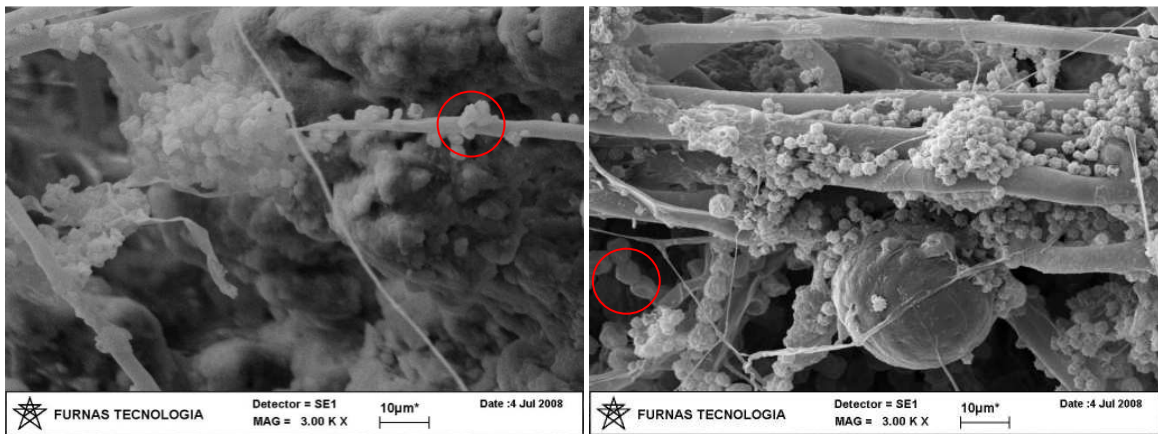
Figura 5.47. Imagens no MEV das diferentes camadas de solo com nutriente do perfil de solo da voçoroca de Santa Maria, em 300 aumentos.

Nos solos com nutriente se observa, para todas as profundidades, a presença de precipitados fibrosos unindo os grãos de solo (Figura 5.47). Na Figura 5.48 pode-se ver em mais detalhe este processo. Estas fibras, quando analisadas, são identificadas contendo cálcio. Cabe ressaltar que como elas são muito finas a análise da composição química engloba parte do solo que se encontra embaixo. Destaca-se, ainda, que só a amostra proveniente da camada de 4m de profundidade mostrou unicamente a presença do cálcio, isto se deve ao fato de neste solo terem-se formado precipitados minerais com estrutura diferente das fibras, impedindo assim a interferência do solo abaixo (Figura 5.49c). Em outras profundidades como a 2m, 3m e 5m também se encontraram estes cristais distintos das fibras denominados de forma “globular” ou “botrioidal”, mas para eles não foi feita a análise da composição química (Figura 5.49a, b, d).



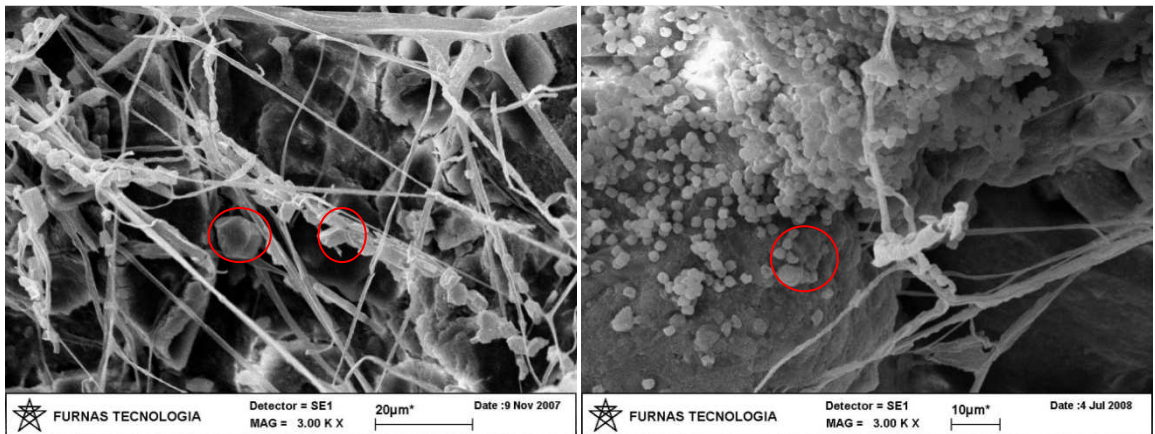
a) 1m de profundidade, 1000 aumentos b) 4m de profundidade, 3000 aumentos

Figura 5.48. Imagens no MEV para duas profundidades no solo com nutriente do perfil da voçoroca de Santa Maria, ilustrando a agregação dos grãos causada pelo tratamento.



a) 2m de profundidade, 3000 aumentos

b) 3m de profundidade, 3000 aumentos

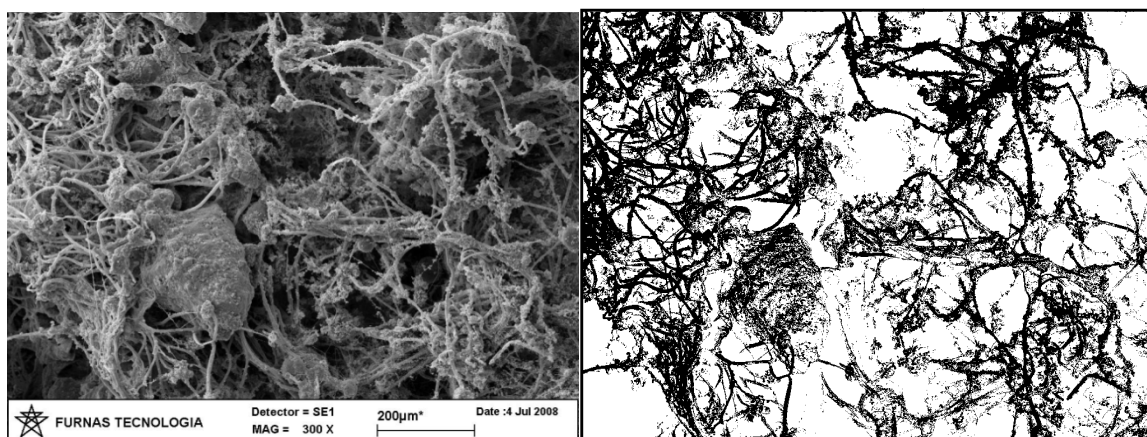


c) 4m de profundidade, 3000 aumentos

d) 5m de profundidade, 3000 aumentos

Figura 5.49. Imagens no MEV para quatro profundidades no solo com nutriente do perfil da voçoroca de Santa Maria, ilustrando os minerais formados com o tratamento.

Apesar da dificuldade de se analisar as imagens do MEV utilizando os programas “Photoshop e Scion”, a Figura 5.50 apresenta o único caso, 3m de profundidade, em que tal análise foi possível. Neste caso, a porcentagem de precipitado identificado foi de 37,5%, valor que se encontra dentro do intervalo definido no tratamento das imagens pela lupa de alta resolução (Tabela 5.9).



a) Imagem MEV, 3m de profundidade

b) Imagem MEV, 3m de profundidade

Figura 5.50. Tratamento de imagem do MEV para a amostra com nutriente a 3m de profundidade para a voçoroca de Santa Maria aumentos de 300 vezes.

5.7 - CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DO PERFIL

Para a caracterização do comportamento hidráulico e mecânico do perfil de solo da voçoroca de Santa Maria, foram realizados ensaios de permeabilidade, compressão simples, tração indireta, resistência ao corte, sucção total e matricial, adensamento duplo-edométrico, “*Pinhole test*” e degradação em amostras sem nutriente e com a adição do nutriente.

5.7.1 - Resistência à Compressão simples

A análise da Figura 5.51 aponta, à primeira vista, para o fato de que nos dois primeiros metros ocorreria uma melhora do comportamento com o tratamento e nos dois últimos metros ele pioraria. Estes resultados se devem analisar considerando o comportamento da resistência ao corte com as umidades (Figura 5.52) e por conseqüente com as sucções (Figura 5.53). De onde é possível verificar que houve uma melhora efetiva na resistência à

compressão simples. Para uma mesma umidade, a resistência à compressão simples foi maior na amostra tratada (Figura 5.52), e se requer de maior sucção na amostra sem tratamento, para obter a mesma resistência a compressão, que na amostra com tratamento (Figura 5.53).

Tendo em vista que a colocação do nutriente gera um aumento de umidade momentâneo no solo, efetuou-se, para as profundidades de 2m e 3m, certa desidratação com o intuito de se verificar a efetividade da melhoria gerada pela precipitação. A Figura 5.52 ilustra que o comportamento continua dependente da umidade confirmando, no entanto, a melhoria gerada pela precipitação (compressão desidratada sem nutriente para uma mesma umidade menor que com nutriente). Estes resultados ilustram a importância de se controlar o tratamento em termos das variações de umidade e sucção, que estão sendo impostas inicialmente ao solo, dada a sua interferência no comportamento mecânico. A longo prazo, a umidade presente no solo tenderá ao equilíbrio fazendo sobressair a melhoria imposta pelo tratamento.

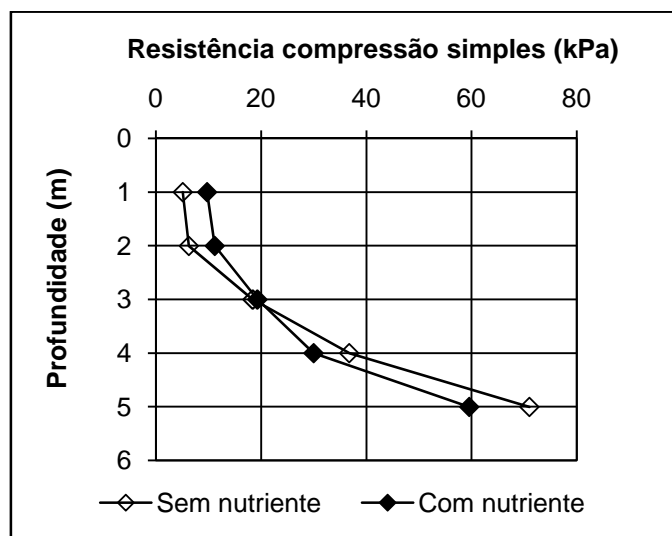


Figura 5.51. Variação da resistência à compressão simples com a profundidade no perfil de solo da voçoroca de Santa Maria.

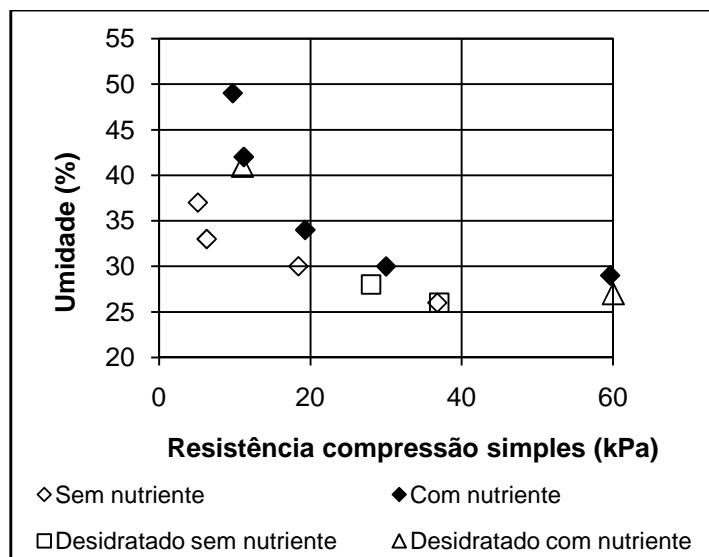


Figura 5.52. Variação da resistência à compressão simples com a umidade no perfil de solo da voçoroca de Santa Maria.

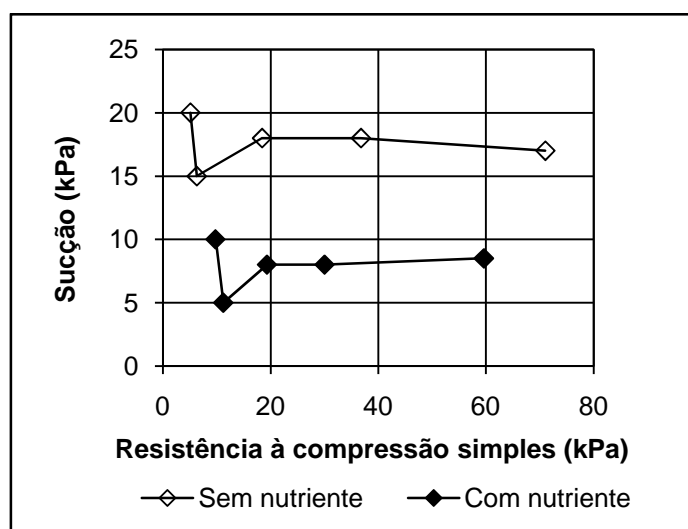


Figura 5.53. Variação da resistência à compressão simples com a sucção para o perfil de solo da voçoroca de Santa Maria.

5.7.2 - Resistência à tração indireta

Com relação à resistência à tração indireta, a Figura 5.54 ilustra que o tratamento gera o aumento da resistência dos solos para as umidades inferiores no ponto de entrada de ar dos microporos, conforme será ilustrado na Figura 5.56. Tal comportamento pode estar ligado ao melhor desempenho dos agregados. Os conceitos de entrada de ar nos macroporos e microporos encontram-se definidos em Camapum de Carvalho e Leroueil (2004).

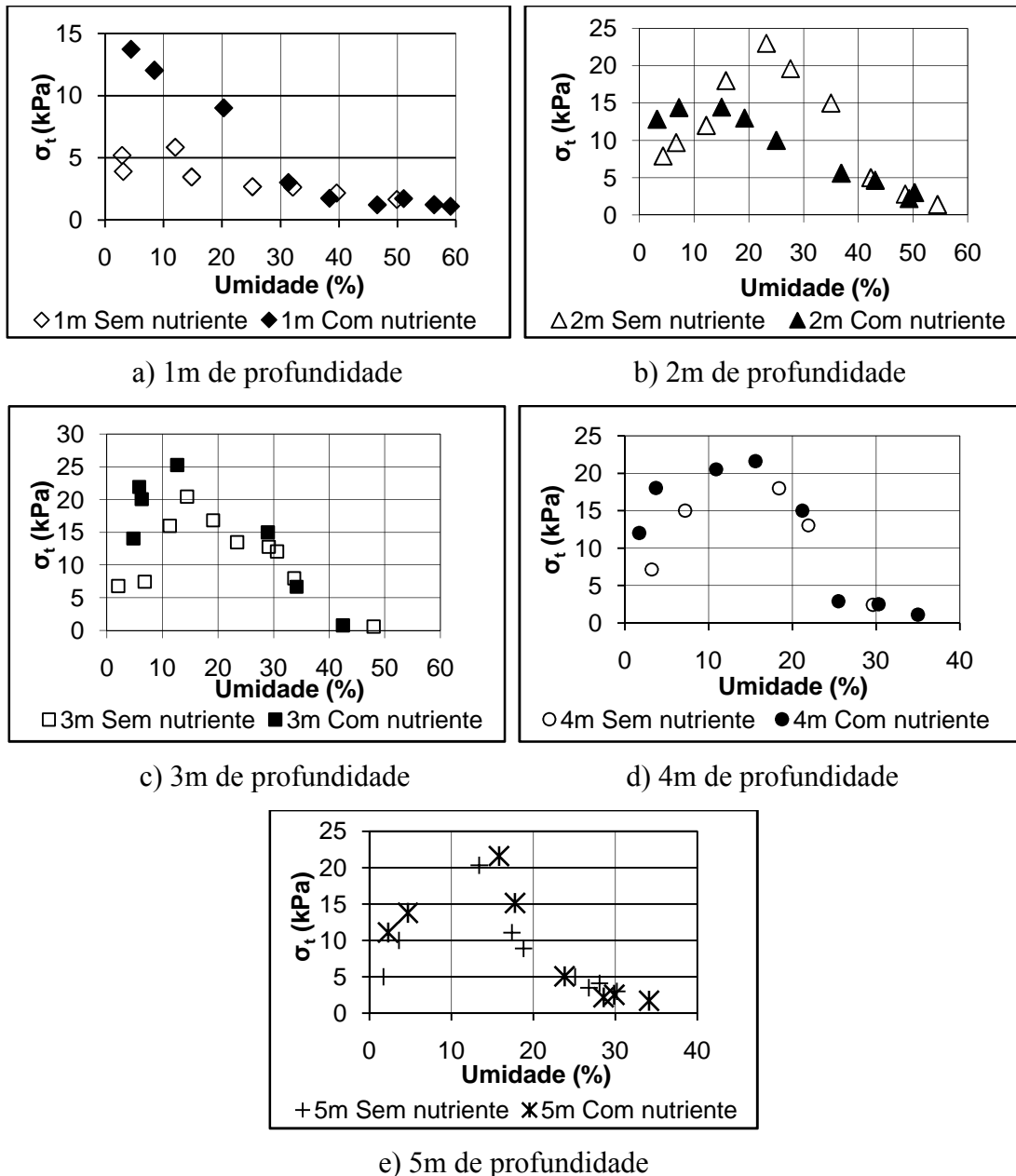


Figura 5.54. Variação da resistência à tração indireta (σ_t) com a umidade para o perfil de solo da voçoroca de Santa Maria.

Segundo Valencia *et al.* (2007), a partir dos valores de tração é possível determinar a coesão total dos solos por meio da seguinte expressão:

$$c = \frac{(q_f)}{\text{Cos}\varphi_{sat}} - \frac{(p_f)}{\text{Tan}\varphi_{sat}}$$

Com $q_f = ((3 * \sigma_t) - \sigma_t)$ e $p_f = \frac{q_f}{2}$, onde σ_t corresponde à resistência à tração diametral e φ_{sat} o ângulo de atrito do solo para o ensaio de cisalhamento em estado saturado.

A Figura 5.55 ilustra os resultados da coesão total em função da umidade. Nesta se observa, como no caso anterior, que a coesão total melhorou nas amostras tratadas para as umidades inferiores ao ponto da entrada de ar nos microporos.

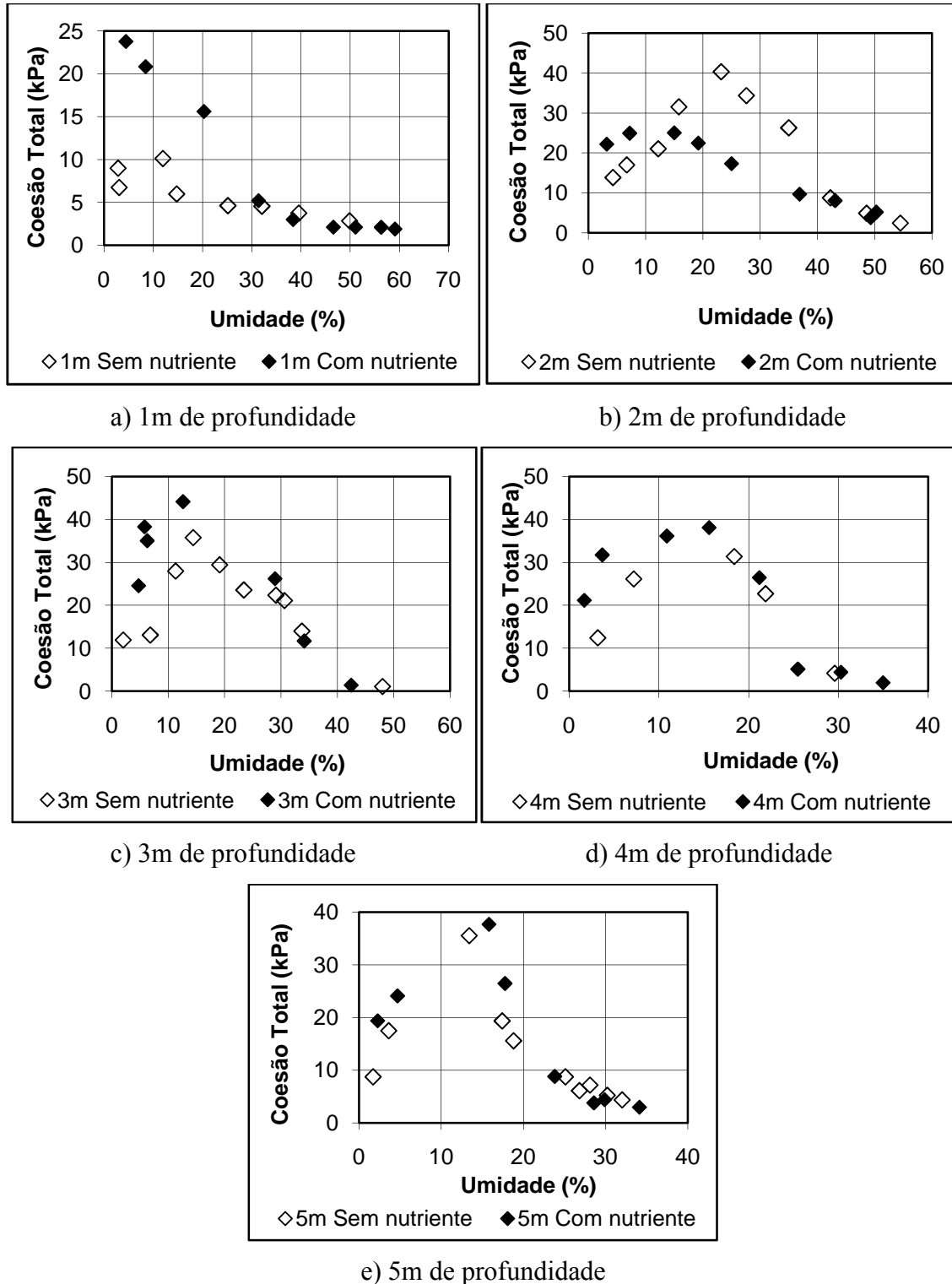


Figura 5.55. Variação da coesão total com a umidade para o perfil de solo da voçoroca de Santa Maria.

5.7.3 - Sucção total e sucção matricial

Com relação à sucção total e matricial, as Figuras 5.56 e 5.57 apresentam os resultados em função da umidade e do grau de saturação para os solos sem e com tratamento.

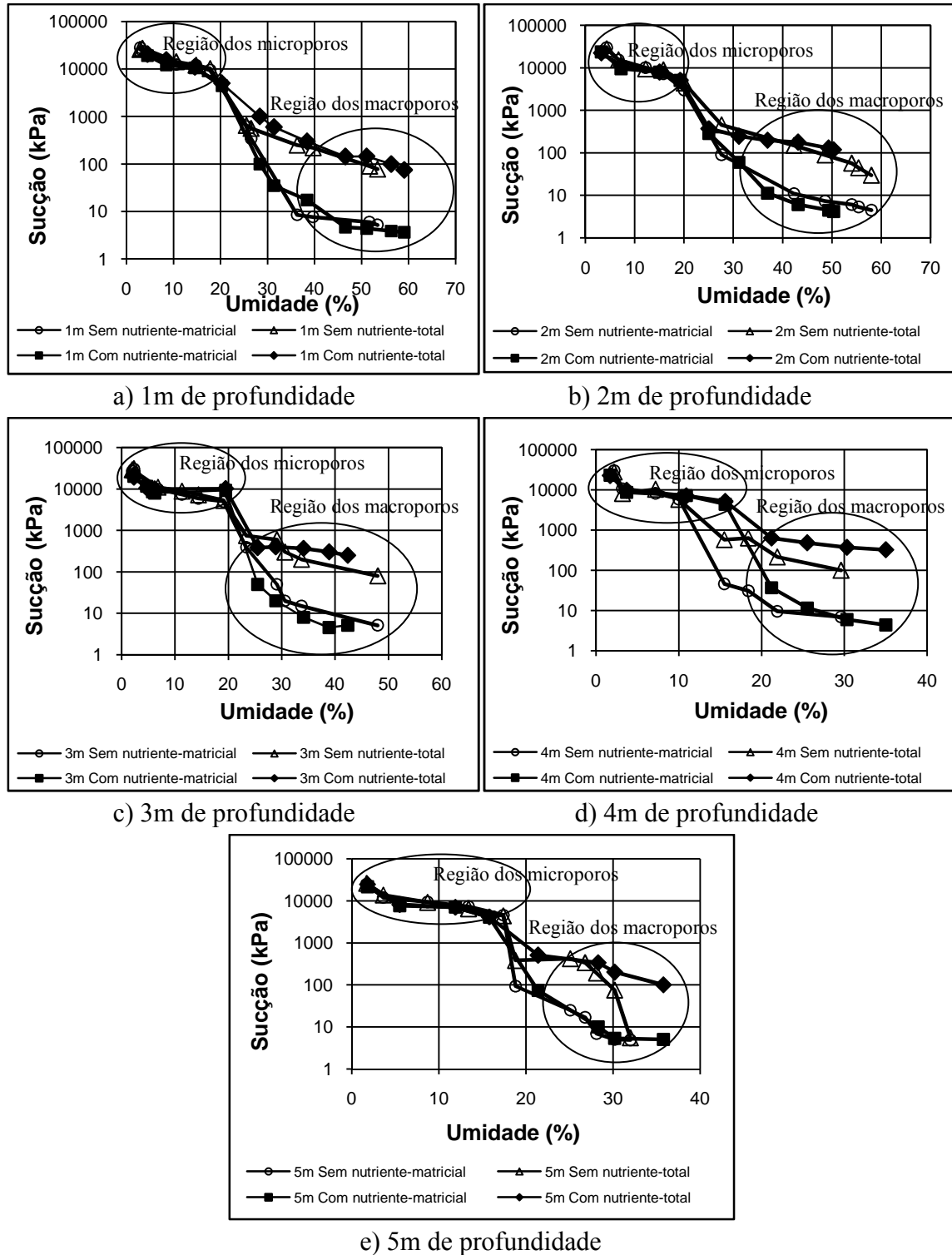
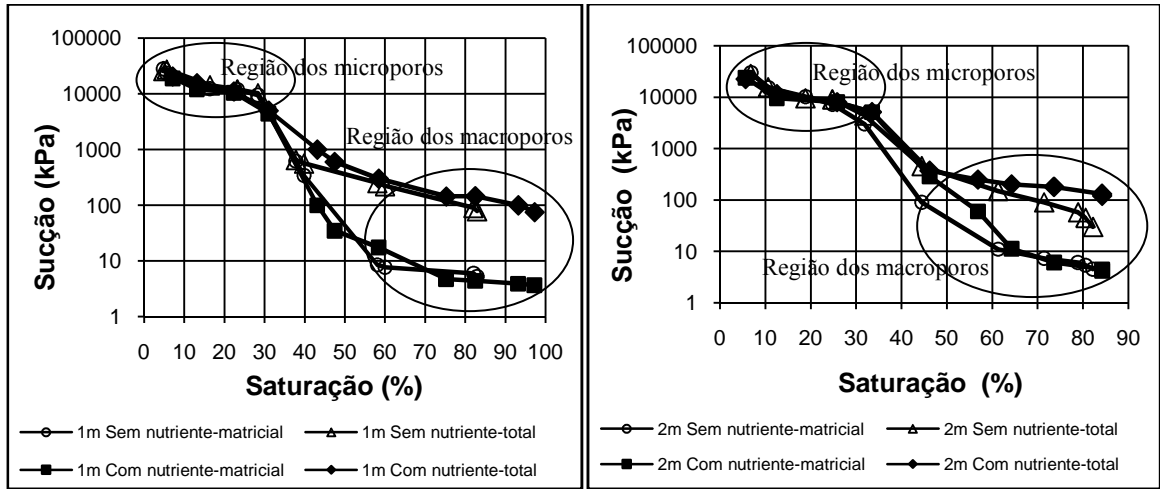
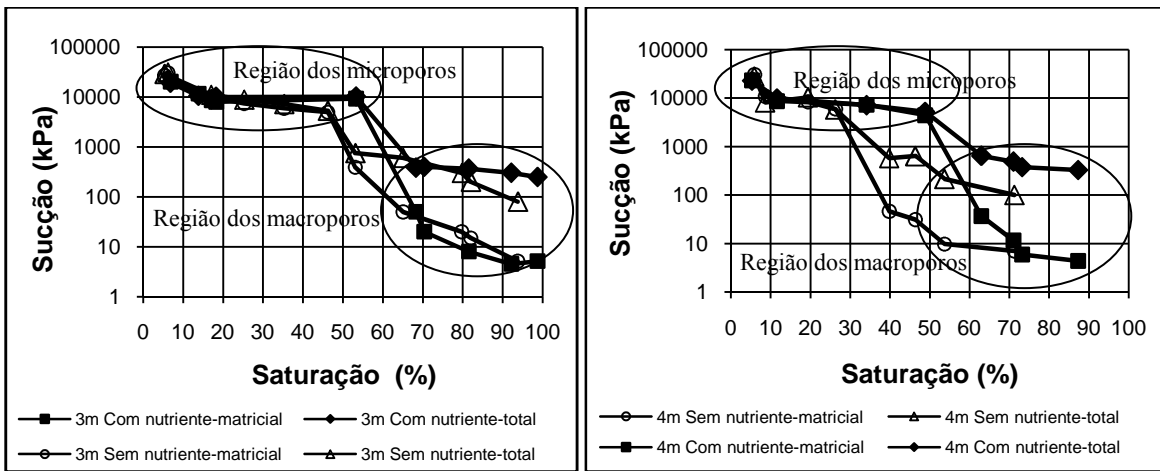


Figura 5.56. Variação da sucção matricial e total com a umidade para o perfil de solo da voçoroca de Santa Maria.



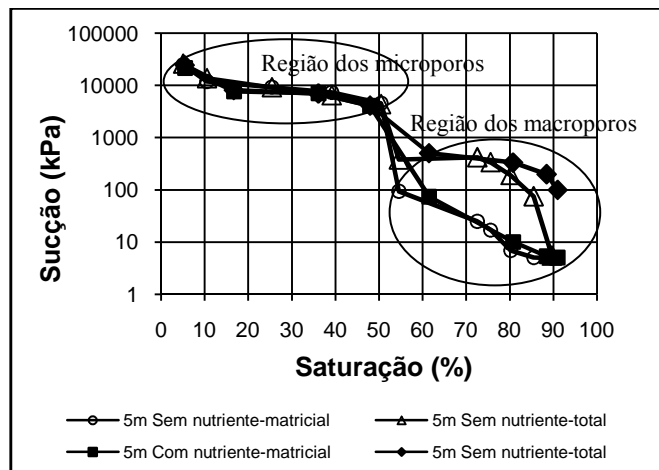
a) 1m de profundidade

b) 2m de profundidade



b) 3m de profundidade

c) 4m de profundidade



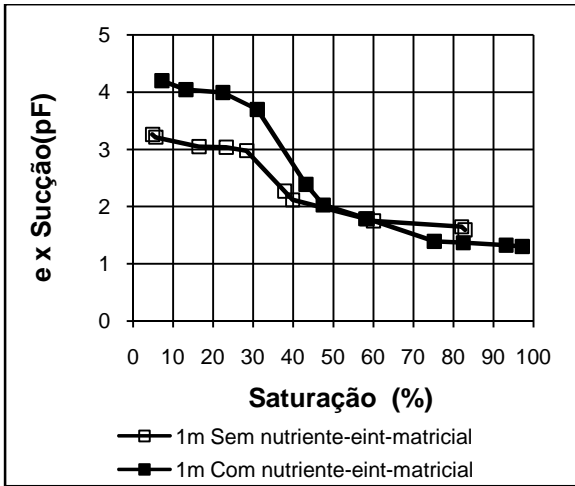
e) 5m de profundidade

Figura 5.57. Variação da sucção matricial e total com a saturação para o perfil de solo da voçoroca de Santa Maria.

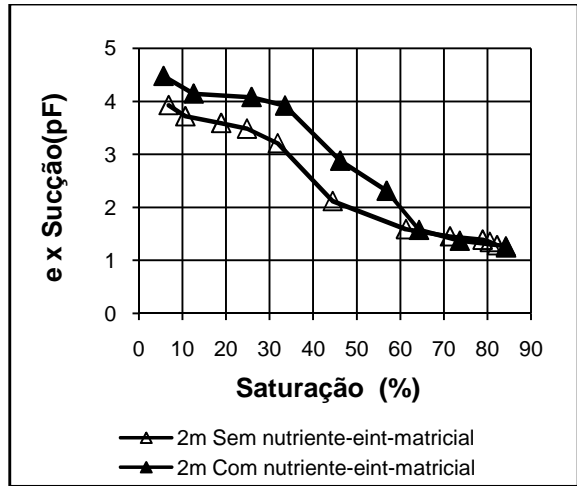
Observa-se nas Figuras 5.56 e 5.57 que, tanto em função da umidade como do grau de saturação, o tratamento tende a aumentar a sucção total na região dos macroporos.

Quanto à sucção matricial, apesar da difícil identificação de um comportamento único quanto a influência do tratamento no comportamento, cabe destacar o deslocamento para a direita do ponto da entrada de ar nos microporos registrado para as curvas características em função do grau de saturação quando da realização do tratamento. Tal deslocamento aponta para uma redução no volume de macroporos.

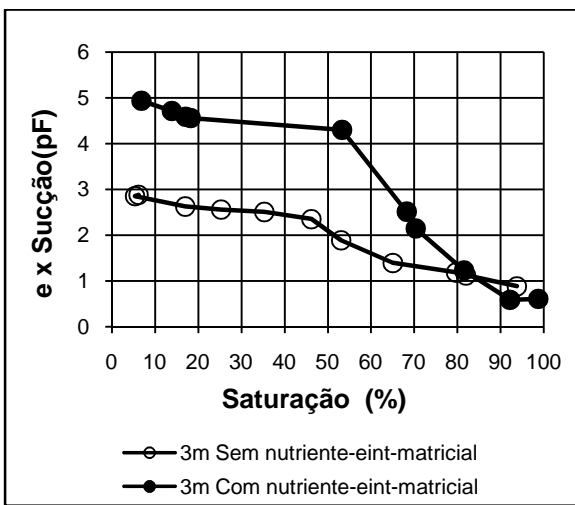
Analisando-se os resultados, a partir da proposta apresentada por Camapum de Carvalho *et al.* (2004), em que se consideram no gráfico $e \times pF$ em função do grau de saturação, o índice de vazios correspondente aos macro ou microporos, foram obtidos os resultados apresentados na Figura 5.58. Nesta figura sobressaem valores superiores de sucção matricial no domínio dos microporos quando da realização do tratamento. Essa constatação explica os resultados obtidos para a resistência à tração indireta ilustrados na Figura 5.54. Naquelas figuras, o tratamento conduziu a uma melhora significativa na resistência à tração indireta quando do tratamento, pela precipitação de carbonato de cálcio nos microporos.



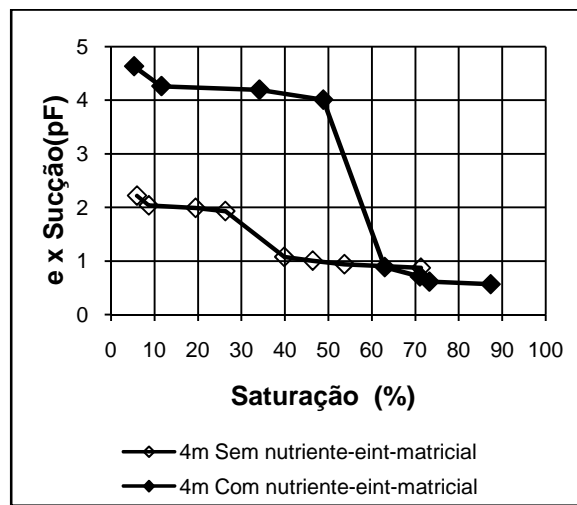
a) 1m de profundidade



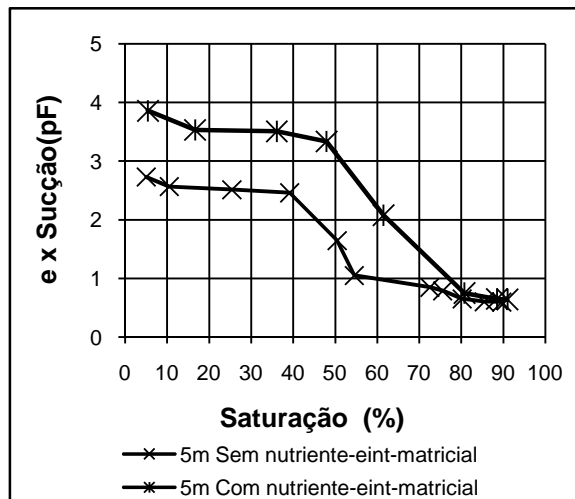
b) 2m de profundidade



c) 3m de profundidade



d) 4m de profundidade



e) 5m de profundidade

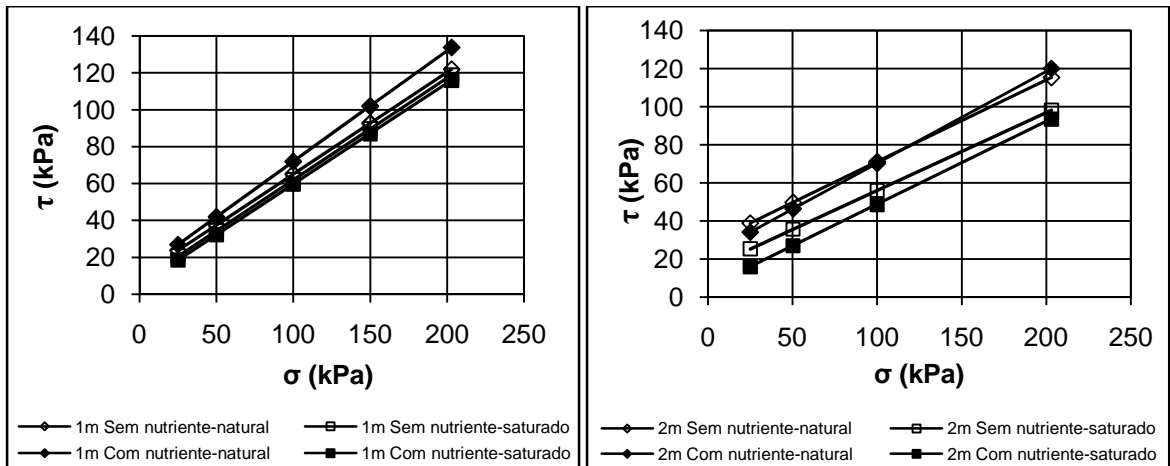
Figura 5.58. Variação do índice de vazios dos macro e micro-poros x sucção (pF) com a saturação para o perfil de solo da voçoroca de Santa Maria

5.7.4 - Resistência ao cisalhamento direto natural e saturado

Para analisar a influência da adição do nutriente na resistência ao cisalhamento, foram examinados os parâmetros de coesão e ângulo de atrito de forma individual (Tabela 5.10). Em quase todos os casos, os ângulos de atrito e as coesões no estado natural e imerso aumentaram ao passar do solo sem tratamento para o solo com tratamento. Isto confirma que o precipitado gerado atua como um cimentante nos solos do perfil estudado. Este aumento oriundo do tratamento se vê refletido no aumento na resistência ao cisalhamento (Figura 5.59), tanto para o solo na umidade natural como para a condição imersa. Porém, é possível observar na Figura 5.59, que à semelhança do verificado na resistência à tração indireta e na sucção transformada, em relação aos inter e intra-agregados, os menores ganhos de resistência se apresentaram para a profundidade de 2m. Isto pode estar associado ao fato de que para esta profundidade a umidade inicial da amostras foi a mais alta ou, pode ainda dever-se ao fato de que nesta profundidade é menor a quantidade de caulinita, resultando assim, conforme analisado anteriormente numa menor aderência bacteriana e, por consequência, gerando um menor volume de precipitado.

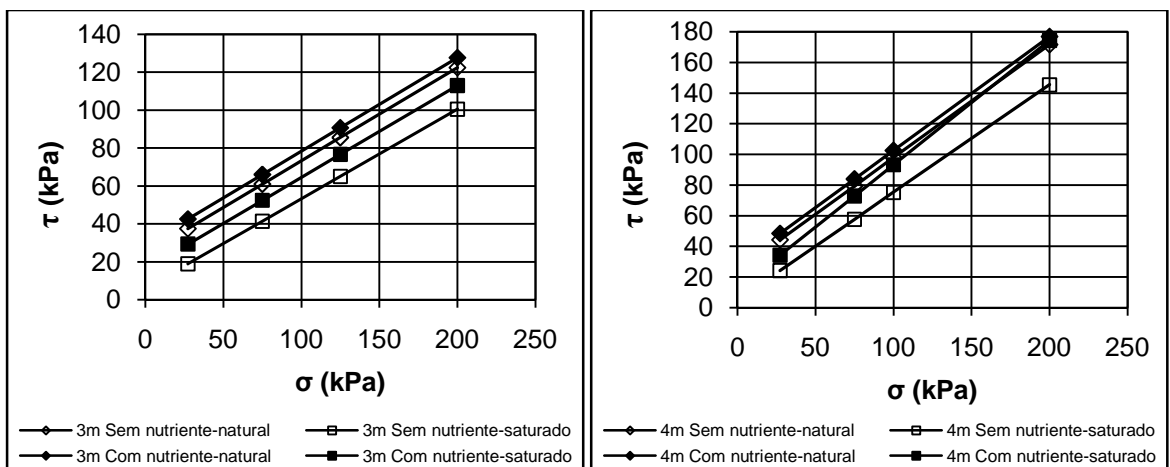
Tabela 5.10. Parâmetros de coesão (c) e ângulo de atrito (ϕ) a partir do ensaio de resistência ao cisalhamento direto natural e saturado para perfil de solo da voçoroca de Santa Maria.

Profundidade (m)	Sem nutriente				Com nutriente			
	Natural		Saturado		Natural		Saturado	
	c (kPa)	ϕ (°)	c (kPa)	ϕ (°)	c (kPa)	ϕ (°)	c (kPa)	ϕ (°)
1	10	29	7	29	12	31	5	29
2	28	23	15	22	22	26	5	24
3	24	26	6	25	29	27	16	26
4	24	36	5	35	28	37	12	39
5	23	37	8	38	37	36	23	36



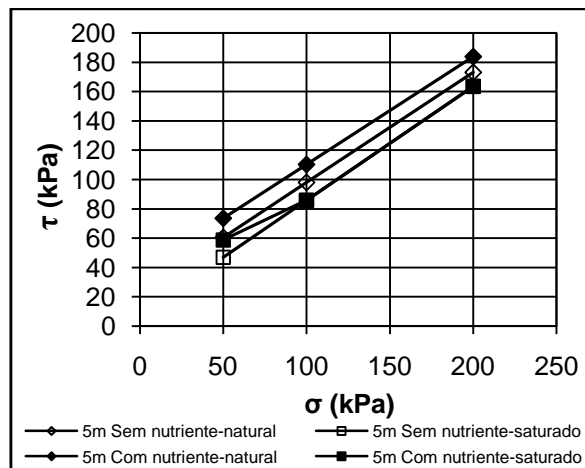
a) 1m de profundidade

b) 2m de profundidade



c) 3m de profundidade

d) 4m de profundidade



e) 5m de profundidade

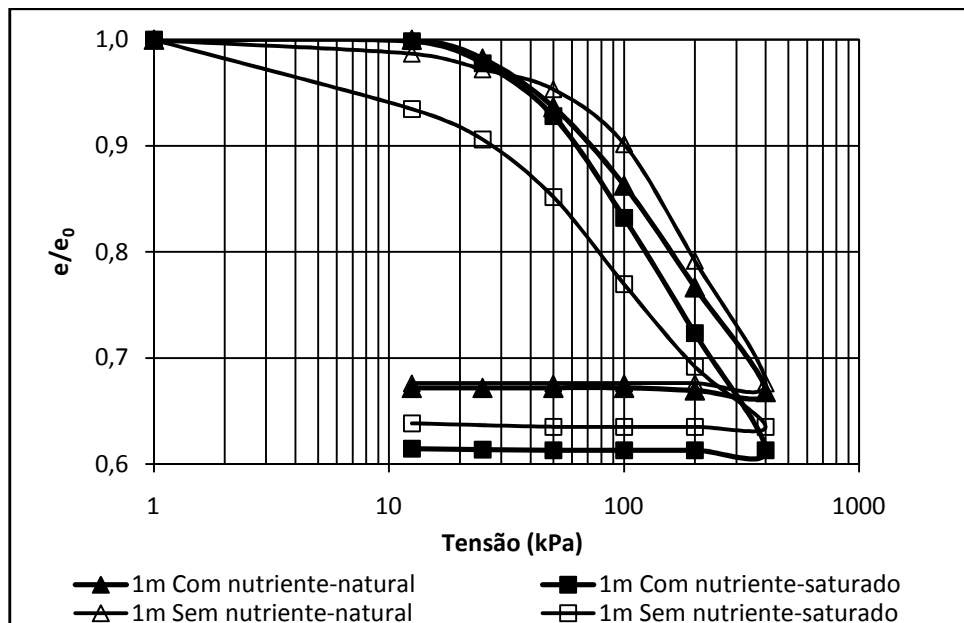
Figura 5.59. Variação da resistência ao cisalhamento natural e saturada (τ) com o esforço (σ) para o perfil de solo da voçoroca de Santa Maria.

5.7.5 - Adensamento duplo edométrico

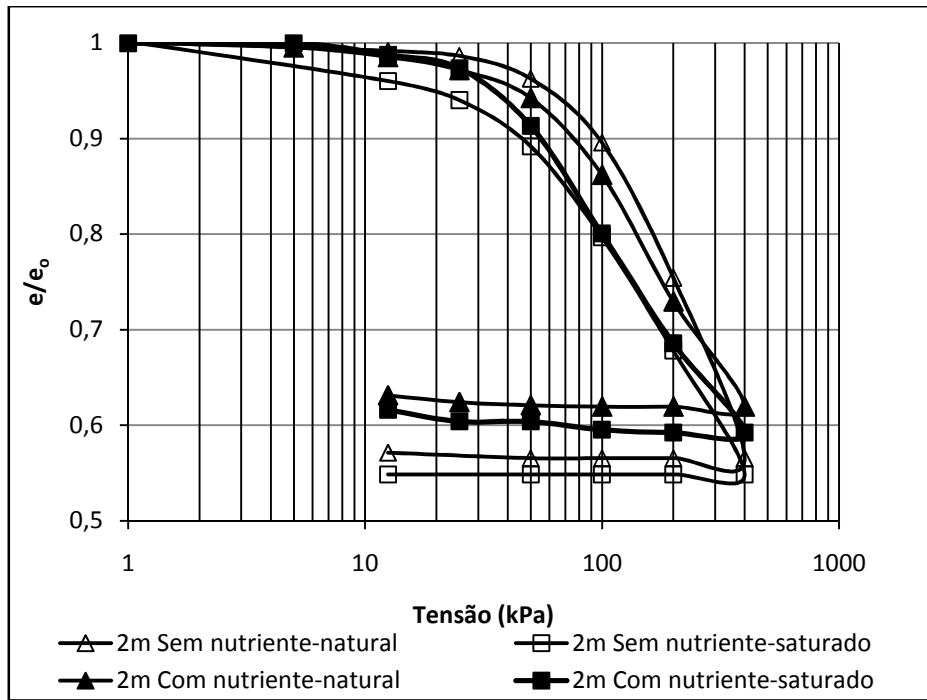
Dada a variação do índice de vazios inicial entre os corpos de prova, optou-se por analisar os resultados de adensamento normalizado em relação ao índice de vazios inicial de cada corpo de prova.

A Figura 5.60 ilustra os resultados de adensamento para as amostras com e sem tratamento ensaiadas na condição natural e inundada. Observa-se em relação às amostras na umidade natural que o tratamento as conduziu a uma maior deformabilidade. Tal comportamento se deve ao fato de que ao se acrescentar o nutriente ao solo aumenta-se o teor de umidade proporcionando assim a redução da sucção, o que tem por consequência o aumento da deformabilidade.

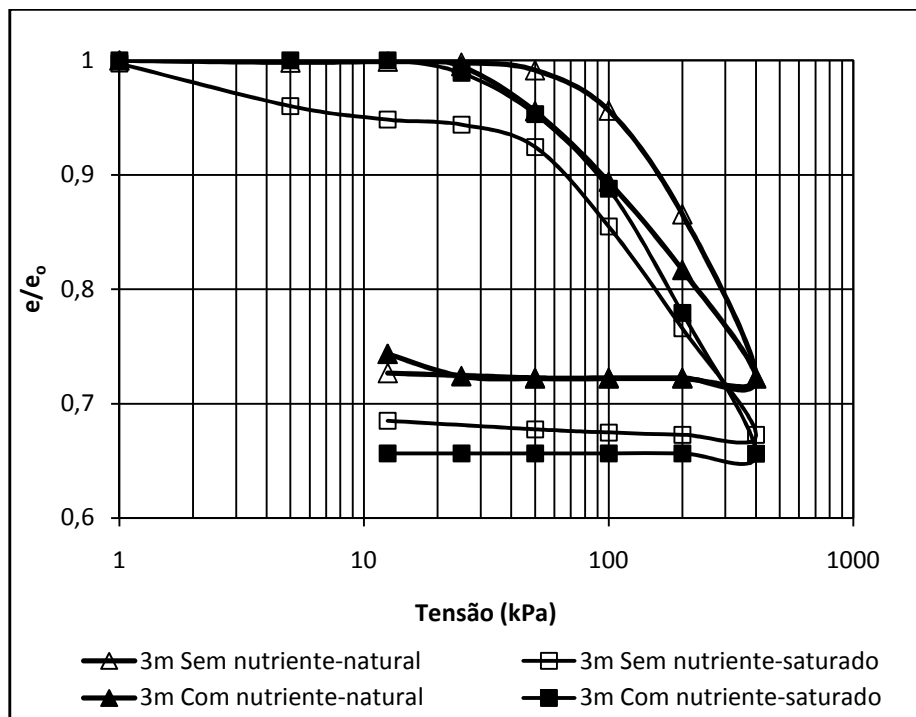
Considerando agora os resultados obtidos após a inundação, verifica-se a menor deformabilidade dos solos tratados, tendendo, no entanto, os pontos a se aproximarem para as maiores cargas de ensaio. A menor deformabilidade do solo tratado reflete a melhoria do comportamento oriunda provavelmente das precipitações. Já, a aproximação das curvas para as cargas mais elevadas reflete possivelmente a quebra das cimentações formadas pelo tratamento. Para 5m de profundidade não se dá a aproximação das curvas, isto pode dever-se à maior melhoria do solo tratado nesta profundidade.



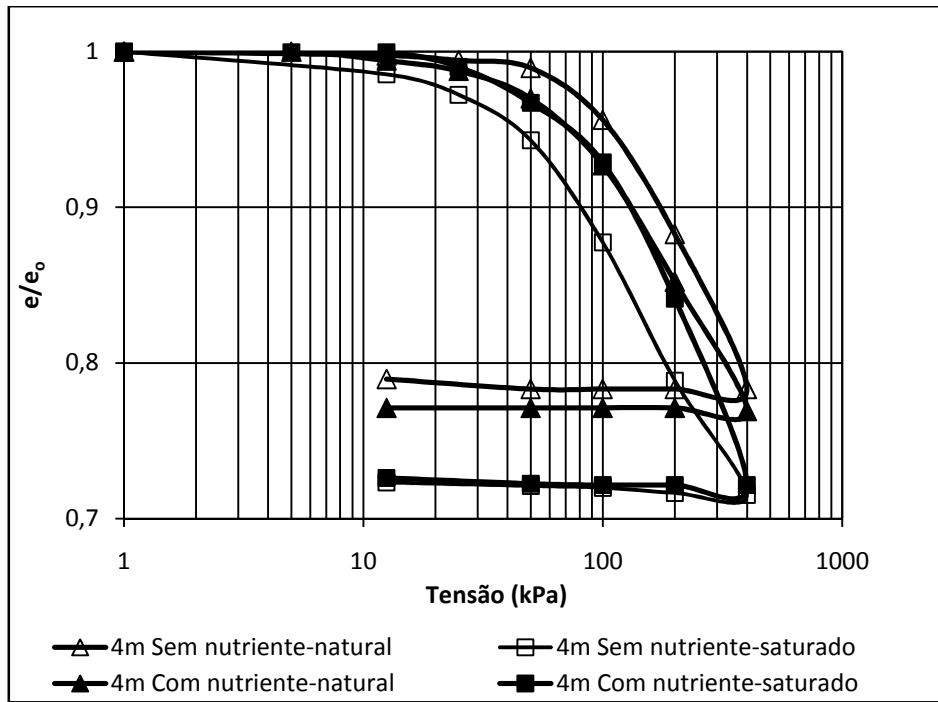
a) 1m de profundidade



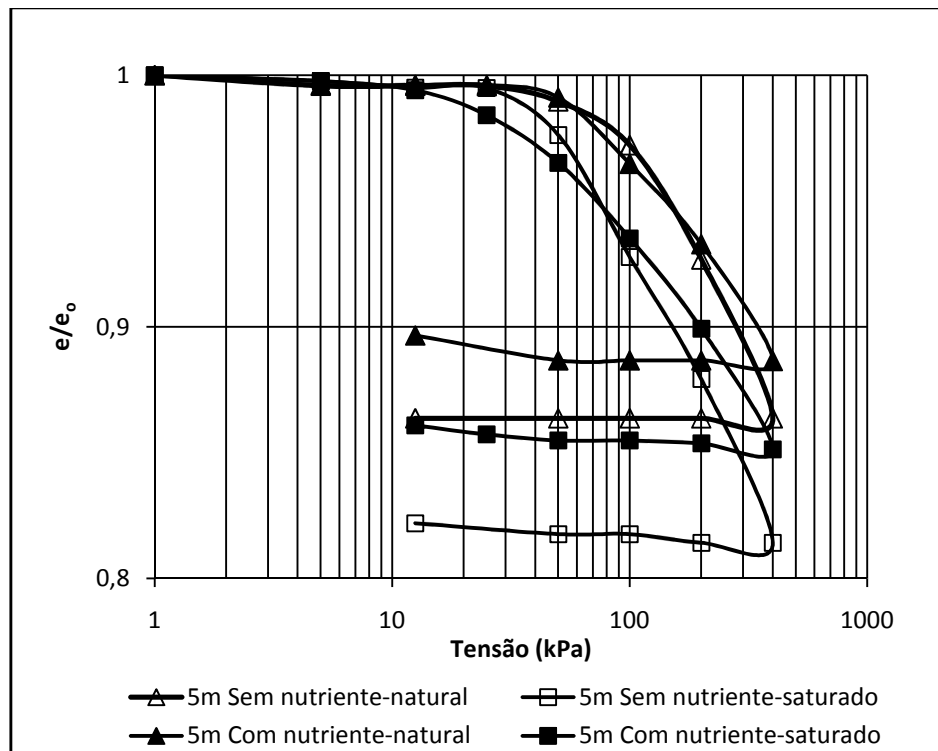
b) 2m de profundidade



c) 3m de profundidade



d) 4m de profundidade



e) 5m de profundidade

Figura 5.60. Variação do índice de vazios com a tensão no ensaio duplo e edométricos para o perfil de solo da voçoroca de Santa Maria.

Para as amostras ensaiadas foram determinados os índices de colapso (i). Estes índices foram calculados segundo a equação proposta por Maia (2005) e apresentada a seguir:

$$i = \frac{\Delta e_c}{\left[1 + \left(\frac{e_{nat}}{e_{0nat}}\right) \times e_{0m\u00e9dio}\right]}$$

em que: $\Delta e_c = \left[\left(\frac{e_{nat}}{e_{0nat}}\right) - \left(\frac{e_{inundado}}{e_{0inundado}}\right)\right] \times e_{0m\u00e9dio}$ e $\frac{e_{0nat} + e_{0inundado}}{2}$

Sendo:

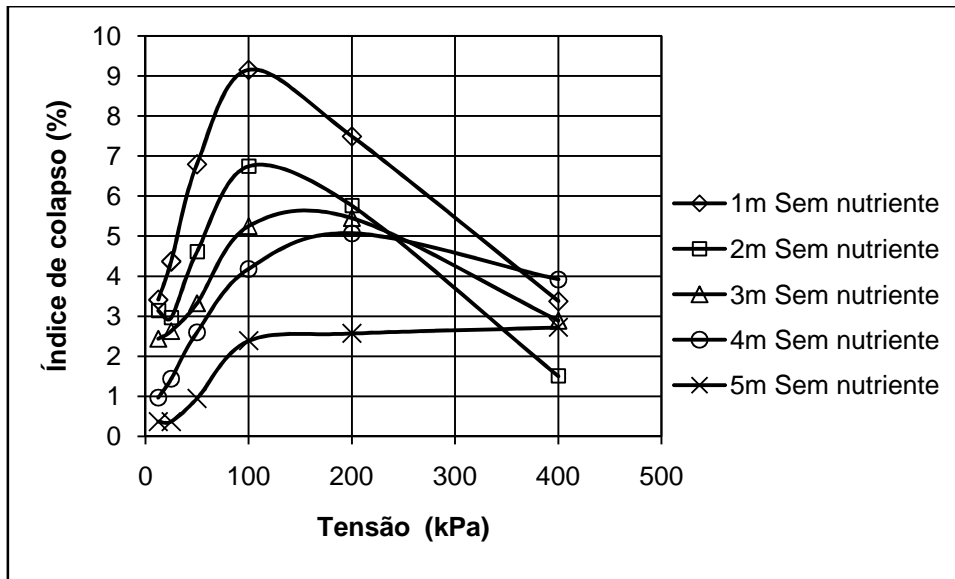
e_{nat} e $e_{inundado}$ o \u00edndice de vazios final do solo para uma determinada tens\u00e3o aplicada, considerando respectivamente o solo na umidade natural e inundado.

e_{0nat} e $e_{0inundado}$ o \u00edndice de vazios inicial do solo para uma determinada tens\u00e3o aplicada, considerando respectivamente o solo na umidade natural e inundado.

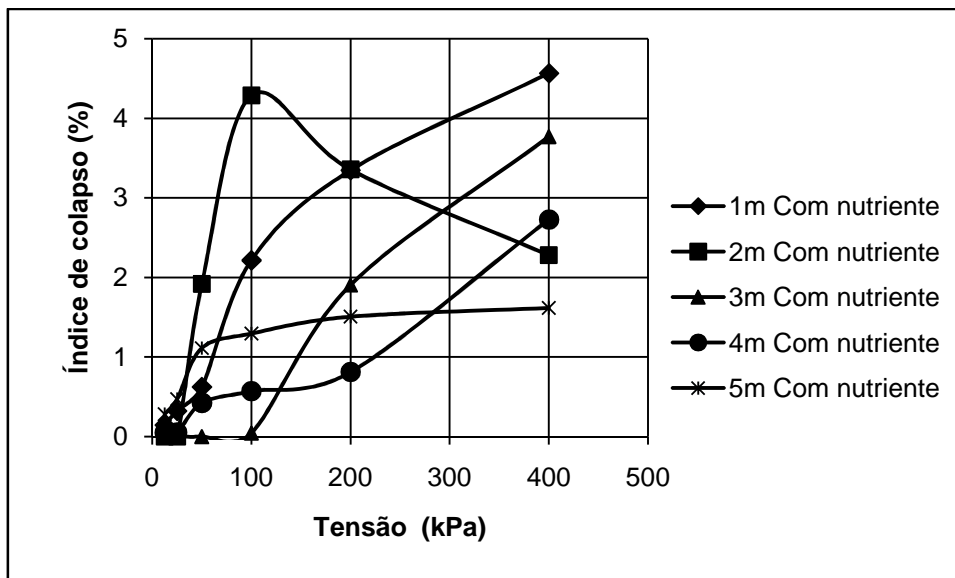
Antes de passar \u00e0 an\u00e1lise destes resultados, vale observar que estando o solo tratado mais \u00famido e, portanto tendo deformado mais quando ensaiado na umidade natural, e sendo o solo tratado menos deform\u00e1vel na condi\u00e7\u00e3o inundada, isso por si s\u00f3 implicar\u00e1 no menor \u00edndice de colapso do solo tratado. O ideal seria conduzir o solo tratado \u00e0 umidade do solo n\u00e3o tratado, quando do ensaio na condi\u00e7\u00e3o natural.

Observa-se na Figura 5.61 que as curvas \u00edndice de colapso *versus* carga aplicada apresentam um valor de colapso m\u00e1ximo para um determinado n\u00edvel de tens\u00e3o quando se aplica um carregamento progressivo. A tens\u00e3o correspondente a esse valor m\u00e1ximo de colapso ser\u00e1 aqui designada como tens\u00e3o cr\u00edtica. Analisando-se a Figura 5.61a, observa-se que essa tens\u00e3o cr\u00edtica aumenta com a profundidade, ou seja, com a diminui\u00e7\u00e3o do \u00edndice de vazios inicial do solo. Ao mesmo tempo, constata-se que o \u00edndice de colapso tamb\u00e9m diminui com o aumento da profundidade, o que era esperado devido \u00e0 diminui\u00e7\u00e3o do \u00edndice de vazios no mesmo sentido.

Analisando-se a Figura 5.61b, correspondente ao solo tratado, verifica-se a clara redu\u00e7\u00e3o dos coeficientes de colapso calculados em rela\u00e7\u00e3o \u00e0queles obtidos nas mesmas profundidades para o solo n\u00e3o tratado. Observa-se, ainda, que a tens\u00e3o cr\u00edtica de colapso anteriormente definida s\u00f3 pode ser verificada para a profundidade de 2m no intervalo de tens\u00f5es estudadas. A ocorr\u00eancia da tens\u00e3o cr\u00edtica nessa camada talvez se deva \u00e0 maior umidade inicial do solo.



a) Amostras sem nutriente



b) Amostras com nutriente

Figura 5.61. Variação do índice de colapso com a tensão para as amostras sem nutriente e com nutriente do perfil de solo da voçoroca de Santa Maria.

5.7.6 - Permeabilidade

Na Figura 5.62 verifica-se que a permeabilidade sofreu pequena redução nos dois primeiros metros e no último metro ensaiado, o que coincide com as reduções do índice de vazios.

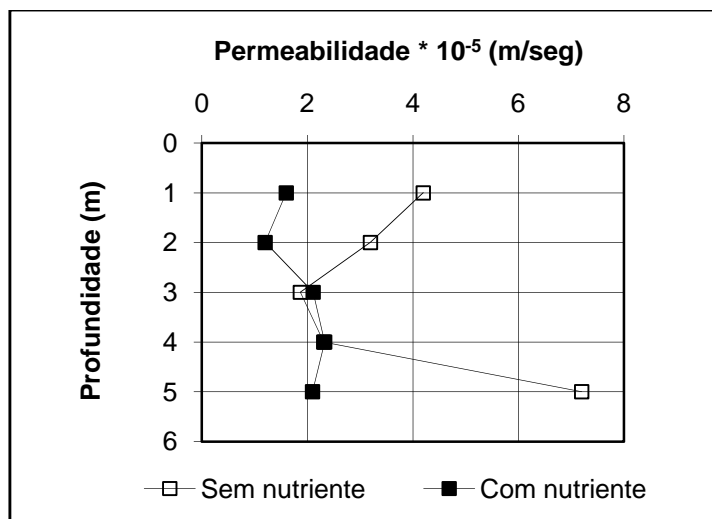


Figura 5.62. Variação da permeabilidade com a profundidade do perfil de solo da voçoroca de Santa Maria.

No entanto, analisadas as permeabilidades em função dos índices de vazios inter-agregados, que são os vazios por onde realmente circula a água e onde se precipitaram os carbonatos, pode-se observar que em todos os casos o nutriente gerou a redução da permeabilidade (Figura 5.64).

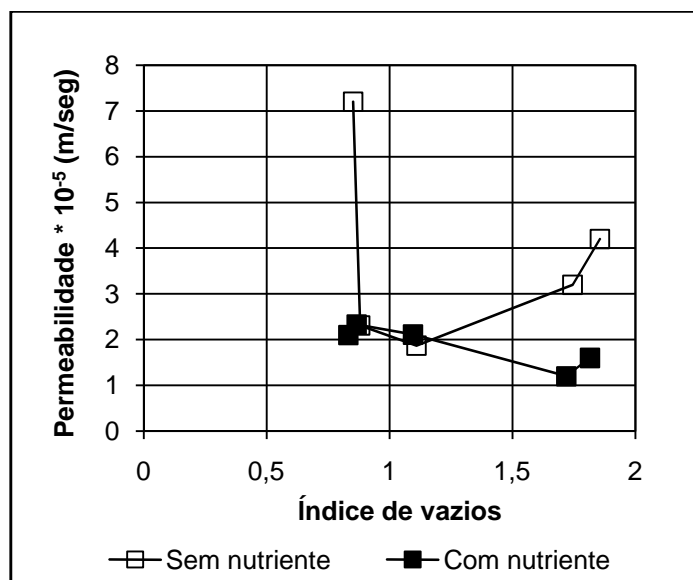


Figura 5.63. Variação da permeabilidade com o índice de vazios para o perfil de solo da voçoroca de Santa Maria.

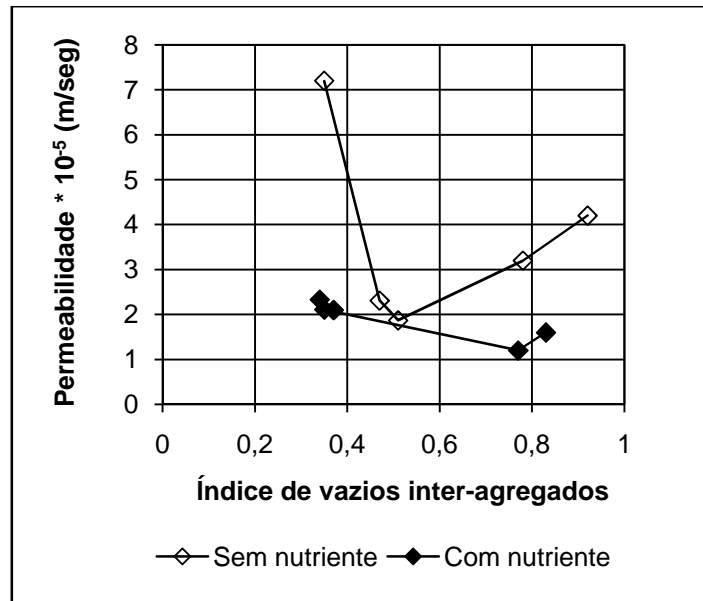


Figura 5.64. Variação da permeabilidade com o índice de vazios inter-agregado para o perfil de solo da voçoroca de Santa Maria.

5.7.7 - “Pinhole test” ou furo de agulha

Para analisar se a erosão interna dos solos diminuiu com o tratamento efetuado, foram realizados os ensaios de “Pinhole test”. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 5.65.

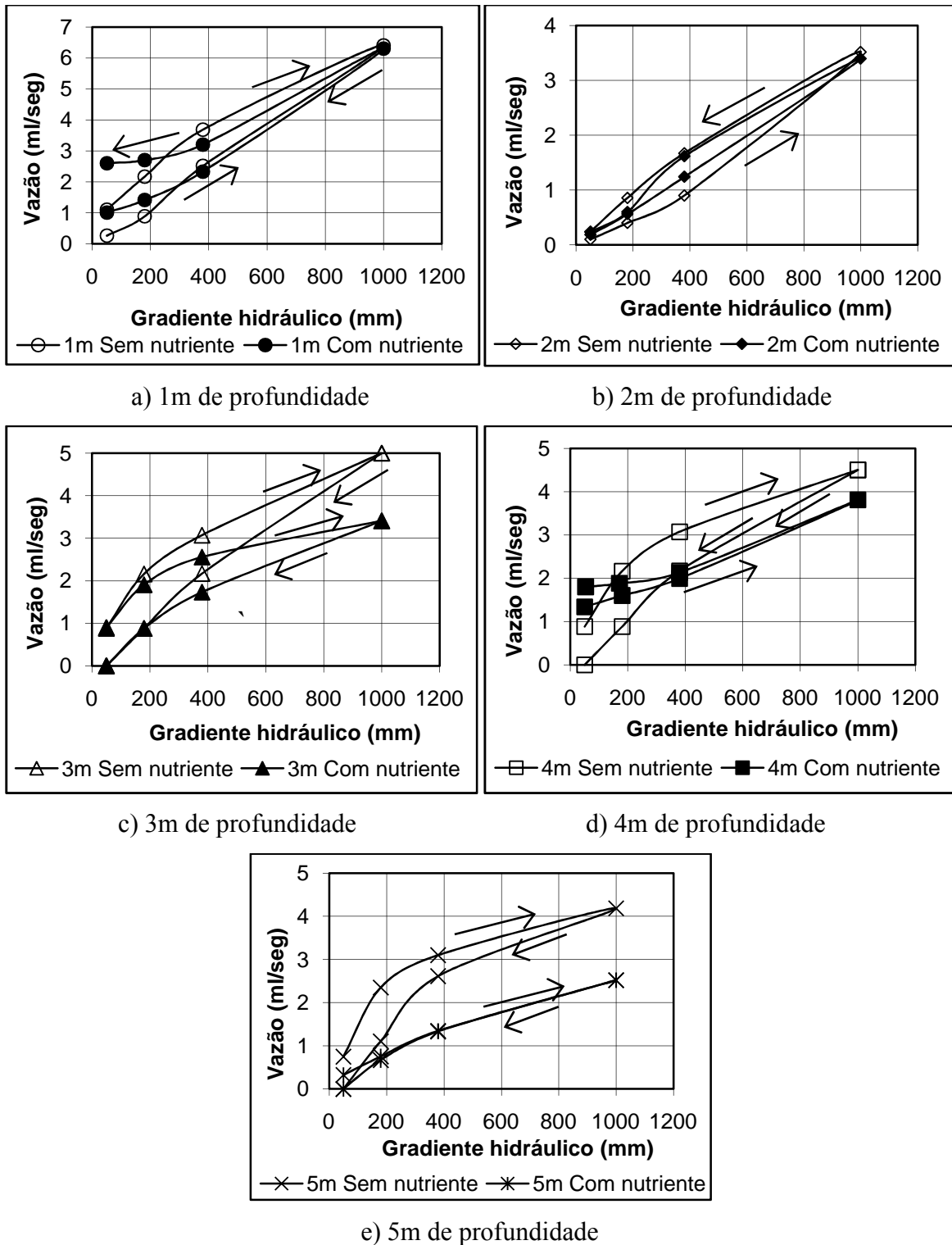


Figura 5.65. Variação da vazão com o gradiente hidráulico para as amostras sem nutriente e com nutriente do perfil de solo da voçoroca de Santa Maria.

Nesta Figura, pode-se observar, que apesar de aparentemente ter acontecido colmatagem durante o desenvolvimento de alguns dos ensaios (vazão de carga maior que a vazão de descarga para o mesmo gradiente hidráulico), a diferença nas trajetórias carga (→) –

descarga (←), para todas as profundidades nos solos sem nutriente, evidencia claramente a ocorrência do processo erosivo, ou a perda de estabilidade estrutural do solo, motivo pelo qual se tem a colmatação. Destaca-se que os processos de erosão e de esqueletização geralmente proporcionam o aumento da vazão, quando não ocorre colmatação do sistema de drenagem.

O tratamento do solo para todas as profundidades proporciona maior estabilidade estrutural. A constatação nos últimos três metros de vazões menores para os maiores gradientes, quando do ensaio no solo tratado aponta para o maior fechamento dos poros gerado pela precipitação do carbonato de cálcio.

Quanto à dispersividade, todos os solos, sejam com ou sem tratamento, foram considerados não dispersivos segundo a classificação da Norma 14114, não tendo sido verificada turbidez na água drenada.

5.7.8 - Desagregação

Nas Tabelas 5.11 e 5.12 são apresentados os resultados do ensaio de desagregação realizados sobre os solos não tratados e tratados com o nutriente em todas as profundidades.

Tabela 5.11. Resultados do ensaio de desagregação sem nutriente para o perfil de solo da voçoroca de Santa Maria.

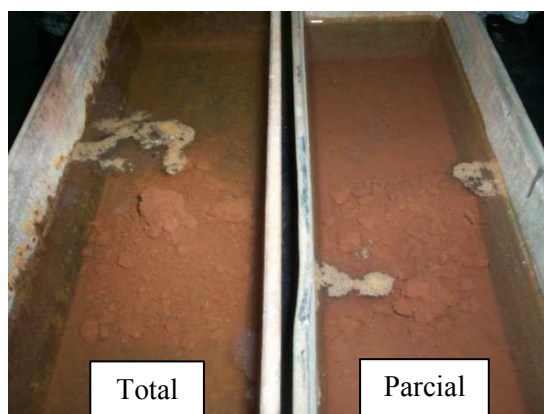
SOLO SEM NUTRIENTE					
IMERSÃO PARCIAL ATÉ TOTAL					
Fases da atuação da água no ensaio	1m	2m	3m	4m	5m
Base do Corpo	Intacta	Intacta	Intacta	Intacta.	Intacta
(1/3) altura do Corpo	Desagregação total	Desagregação pouco na base	Desagregação pouco na base	Desagregação pedaços	Intacta
(2/3) altura do Corpo	Desagregação total	Desagregação pedaços	Desagregação pouco na base	Desagregação pedaços	Intacta
Total (24h)	Desagregação total	Desagregação em pedaços	Desagregação em pedaços	Desagregação pedaços	Intacta, só pó
IMERSÃO TOTAL					
Fases da atuação da água no ensaio	1m	2m	3m	4m	5m
Total (24h)	Desagregação total	Desagregação pedaços	Desagregação total	Desagregação pedaços	Fraturada

Tabela 5.12. Resultados do ensaio de desagregação com nutriente para o perfil de solo da voçoroca de Santa Maria.

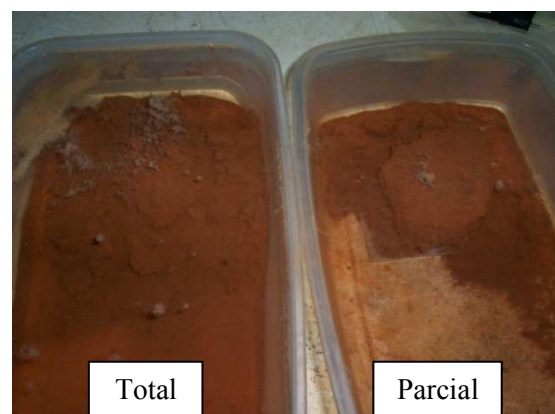
SOLO COM NUTRIENTE					
IMERSÃO PARCIAL ATÉ TOTAL					
Fases da atuação da água no ensaio	1m	2m	3m	4m	5m
Base do C.P.	Intacta	Intacta	Intacta	Intacta	Intacta
(1/3) altura do Corpo	Desagregação só uma ponta da base	Intacta	Intacta	Intacta	Intacta
(2/3) altura do Corpo	Desagregação em duas pontas	Intacta	Intacta	Intacta	Intacta
Total (24h)	Desagregação nas mesmas duas pontas	Só um caiu o canto inferior	Intacta	Intacta	Intacta
IMERSÃO TOTAL					
Fases da atuação da água no ensaio	1m	2m	3m	4m	5m
Total (24h)	Desagregação total	Intacta	Intacta	Desagregação um pouco	Intacta

Os resultados deste ensaio ilustraram claramente a melhoria da estabilidade dos solos tratados quando inundados com água, devido à pouca ou nula desagregação dos solos tratados quando imersos na água.

Nas Figuras 5.66 são apresentadas as imagens das amostras sem e com tratamento obtidas no ensaio de desagregação. Estas imagens confirmam a melhoria do comportamento do solo tratado.



a) 1m Sem nutriente



b) 1m Com nutriente



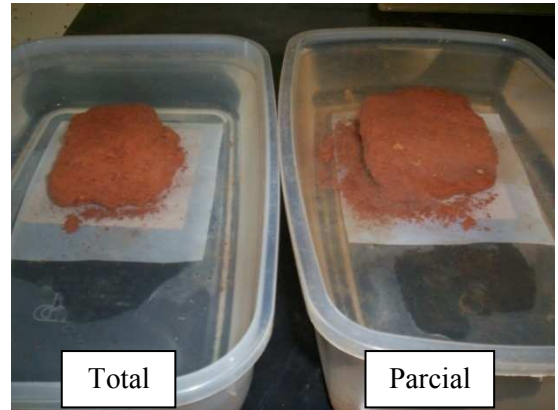
c) 2m Sem nutriente



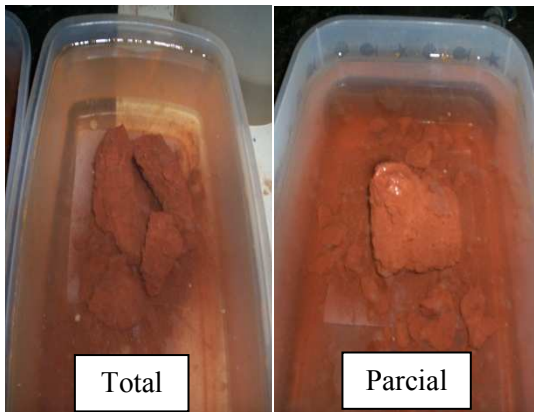
d) 2m Com nutriente



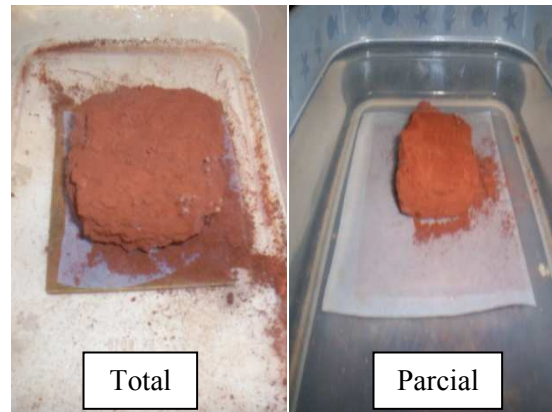
e) 3m Sem nutriente



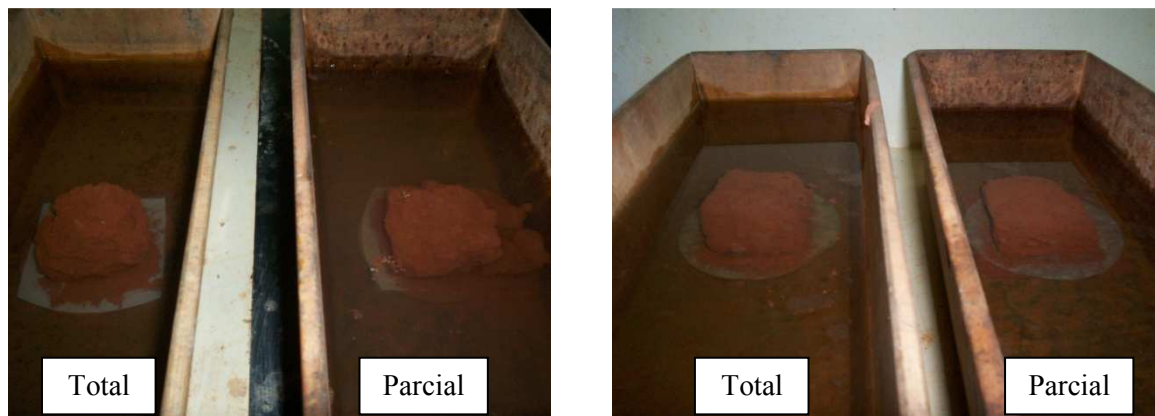
f) 3m Com nutriente



g) 4m Sem nutriente



h) 4m Com nutriente



i) 5m Sem nutriente

j) 5m Com nutriente

Figura 5.66. Imagens ensaios de desagregação após 24 horas de imersão (com inundação parcial e total) nos solos sem nutriente e com nutriente para o perfil de solo da voçoroca de Santa Maria.

Os ensaios de “*Pinhote test*” e desagregação permitem determinar qualitativamente a erodibilidade dos solos, com os resultados destes ensaios se verificou claramente que o tratamento conseguiu diminuir a erodibilidade dos solos estudados.

5.7.9 – Custo estimado para o controle da erosão da voçoroca de Santa Maria

O custo para a estabilização dos taludes da erosão de Santa Maria, usando a técnica da biomineralização nas condições estudadas e considerando uma profundidade média de tratamento igual a 6m e uma malha de 1m x 1m, foi estimado em aproximadamente R\$1.200.000,00 (Para julho de 2009). Destaca-se que a questão do tipo de nutriente mais apropriado bem como dos teores ideais não foram aqui estudados. Agora, já confirmado o potencial de biomineralização das bactérias nativas regionais, deve-se buscar a otimização dos custos quanto ao tipo de nutriente e os respectivos teores.

O custo aqui estimado levou em conta o valor pago por litro de nutriente considerando-se pequena quantidade. Estima-se que em maior escala, como é de praxe, o preço deve diminuir.

No valor orçado o nutriente foi o responsável pela quase totalidade do custo, aproximadamente 95%, daí a importância de se analisar outros tipos, teores e preço em grande quantidade.

Embora desconhecendo os trabalhos de recuperação a serem realizados, foi noticiado na 1ª Edição do jornal televisivo diário DFTV, do dia 27 de março de 2009, que referida erosão seria recuperada pela NOVACAP, tendo um custo de R\$1.500.000,00, valor este superior ao aqui previsto.

5.7.10 – Riscos que devem ser avaliados

Cabe destacar a necessidade de projeto geotécnico, no qual se leve em conta o próprio efeito da variação da umidade e do pH do solo impostos na fase inicial pelo tratamento na estabilidade dos taludes existentes em cada erosão a ser tratada.

Um outro aspecto a ser avaliado é a questão dos riscos ambientais oriundos do aumento da população microbiana. Deve-se ainda analisar o eventual risco de contaminação do lençol freático pelo nutriente na zona próxima ao tratamento.

5.7.11 - Conclusão sobre a análise dos resultados

Em conclusão, no perfil de solo tropical objeto desta pesquisa, as bactérias nativas nele presentes utilizaram eficazmente o nutriente B4 para precipitar carbonato de cálcio. O carbonato de cálcio gerado com o tratamento propiciou variações nas propriedades físicas, químicas, mineralógicas e mecânicas dos solos. Verificou-se nas alterações a redução do índice de vazios, do limite de liquidez, do índice de plasticidade, da retração, da permeabilidade, do índice de colapso e da erodibilidade e, o aumento da sucção e das resistências à compressão simples, ao cisalhamento e à tração. O efeito destas variações se viu refletido na maior estabilidade estrutural dos grãos, no melhor desempenho dos agregados e na menor deformabilidade da massa de solo, apontando assim para a possibilidade de utilização da técnica de biomineralização no controle de processos erosivos.

6 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

6.1 - CONCLUSÕES

Os estudos sobre processos erosivos do Distrito Federal têm indicado, na maioria dos casos, que o mecanismo de evolução destas erosões está associado à degradação físico-química dos solos. Técnicas comuns de estabilização vêm sendo usadas na atualidade com custos muito altos e impactos ambientais muitas vezes não desprezíveis, para mitigar estes problemas. É por isto, que além do caráter inovador desta pesquisa, os custos associados ao emprego da técnica proposta de biomineralização, podem chegar a ser mais econômicos e causar menos impactos ambientais.

O uso da biomineralização na engenharia geotécnica requer a integração de profissionais de diferentes áreas do conhecimento, de modo a permitir o entendimento do processo de precipitação de minerais a partir de bactérias, bem como de seus efeitos nas propriedades físicas, químicas, mecânicas e hidráulicas do solo, sem que se esqueça de seus reflexos no meio ambiente.

É importante ressaltar, que o fato de se ter trabalhado nesta pesquisa com bactérias nativas do solo e não com a adição de uma bactéria calcificante externa ao meio como têm sido desenvolvidas na maioria das investigações realizadas até o momento, diminui a possibilidade de impacto ambiental.

Feito este preâmbulo passa-se agora as conclusões específicas relativas a esta pesquisa:

Nos solos do perfil estudado foram isoladas no universo de bactérias presentes, 43 tipos de bactérias diferentes. Cada uma destas bactérias, em maior o menor grau, foram propícias à biomineralização de carbonato de cálcio.

O incremento do pH em água gerou a tendência de aumento da população bacteriana. Adicionalmente, a maior quantidade de bactérias presentes no solo mostrou-se associada ao aumento da quantidade de caulinita.

O nutriente B4 induziu maior precipitação nos solos do perfil da voçoroca de Santa Maria que o meio com uréia, indicando que, um meio baseado em acetato de cálcio, extrato de levedura e glicose, pode ser mais propício para o processo de precipitação de carbonato de cálcio. Adicionalmente, este nutriente oferece a vantagem de não requerer que a bactéria presente no solo seja uréase positiva como o é o caso do nutriente com uréia, permitindo assim uma maior eficiência.

Com relação às propriedades físicas dos solos estudados, o índice de vazios sofreu uma pequena diminuição ao adicionar o nutriente, apontando para a precipitação de carbonato de cálcio.

Nos solos estudados, a adição do tratamento neutralizou o efeito do defloculante fazendo com que o ultrassom, por sua vez, não conseguisse surtir o efeito da desagregação total, propiciando ao solo sua estabilização estrutural. Essa constatação é particularmente importante em áreas nas quais existe o risco de infiltração de fluidos poluentes como é o caso do esgoto e chorume. Além disso, o precipitado de carbonato de cálcio gerado com o tratamento contribui para evitar eventuais processos de erosão interna.

Quando usado o nutriente, os valores de Agregados Totais (A.T.) foram menores, indicando assim uma maior estabilidade das micro-concreções. Adicionalmente, ao ser o A.T. para as amostras submetidas a 15 dias de cura menores que para aquelas submetidas a 1 dia de cura, confirma-se que a precipitação ocorrida nos 15 dias estaria estabilizando o solo, enquanto efeito imediato do tratamento contribuiria para sua desestabilização momentânea.

Com relação aos limites de Atterberg, verificou-se que o tratamento contribui para diminuir a plasticidade do solo provavelmente devido à preservação do estado agregado. As análises realizadas indicaram que as alterações ocorridas no limite de liquidez e no índice de plasticidade estariam ligadas à geração de carbonato de cálcio no solo tratado.

O tratamento conduziu à diminuição da retração do solo. Tal constatação pode, do ponto de vista geotécnico, ser considerado como positiva, pois além de minimizar o risco de trincas de retração também contribui para a estabilidade do maciço.

Verificou-se que existe uma relação das propriedades químicas iniciais do solo não tratado e a quantidade de precipitado de carbonato de cálcio, sendo que, ao se relacionar as condições iniciais do solo com o teor de cálcio este aumenta com a diminuição do pH e com o aumento da acidez, da C.T.C e do teor de carbono.

Ao analisar os minerais presentes nos solos pela técnica de difração de raios X, observou-se que os minerais se conservaram ao passar da amostra sem nutriente à amostra com nutriente, ou seja, o tratamento não afeta a composição mineralógica inicial. Verificou-se, porém, o surgimento de minerais de carbonato de cálcio gerado pela atividade bacteriana quando do tratamento do solo.

Nos solos tratados, observou-se pela técnica da microscopia eletrônica de varredura, que em todas as profundidades houve aparição de precipitados, seja em forma de fibras, glóbulos ou texturas botrioidais, que unem ou recobrem os grãos de solo ou preenchem os vazios. Estes precipitados quando analisados quimicamente apresentaram o elemento cálcio.

No que diz respeito às resistências à compressão simples, quando analisados os comportamentos considerando-se as umidades e, por consequência, as succões, foi possível verificar que houve uma melhora efetiva na resistência à compressão simples dos solos tratados. Este fato mostrou a importância de se controlar o tratamento em termos das variações de umidade e succão que estão inicialmente sendo impostas ao solo, dada a sua interferência no comportamento mecânico e na estabilidade dos taludes.

Com relação à resistência à tração indireta e à coesão total, observou-se que o tratamento gerou o aumento da resistência dos solos para as umidades inferiores ao ponto de entrada de ar dos microporos, indicando que possivelmente os precipitados de carbonato de cálcio também preenchem os microporos.

No que se refere à resistência ao cisalhamento verificou-se uma melhoria de comportamento com o tratamento, tanto para o solo na umidade inicial como na condição imersa, refletindo uma melhoria da cimentação gerada pelo carbonato de cálcio.

Observou-se que, tanto em função da umidade como do grau de saturação, o tratamento tende a aumentar a sucção, total na região dos macroporos dos solos. Quanto à sucção matricial, considerando-se as curvas características em função do grau de saturação, o deslocamento para a direita do ponto de término da entrada de ar nos macroporos, bem como do início da entrada de ar nos microporos, apontam para a redução do volume dos vazios pelos precipitados. Já, quando analisados os resultados por meio de curvas de ($e_{int} \times pF$) em função do grau de saturação, sobressaíram valores superiores de sucção matricial no domínio dos microporos quando da realização do tratamento; tais resultados poderiam justificar o aumento da resistência a tração nesse mesmo intervalo de grau de saturação. Estes resultados mostram que mesmo se apresentando maior precipitação de carbonatos de cálcio nos macroporos comparado com as precipitações que possam ocorrer nos microporos, estas últimas são muito efetivas.

A partir dos ensaios de adensamento realizados após a inundação, encontrou-se que o solo tratado apresentou menor deformabilidade, refletindo a melhoria do comportamento oriunda das precipitações. A aproximação das curvas de adensamento realizadas com e sem tratamento para as cargas mais elevadas provavelmente indica a quebra das cimentações formadas quando do tratamento.

A permeabilidade, quando analisada em função dos índices de vazios inter-agregados, mostrou em todos os casos que o tratamento proporcionou sua redução pela possível precipitação de carbonatos.

Com relação aos resultados dos ensaios do “*Pinhlote test*” e de desagregação verificou-se claramente que o tratamento conseguiu diminuir a erodibilidade dos solos estudados, indicando assim a eficiência que a técnica de biomineralização tem na mitigação dos processos erosivos em perfis de solos tropicais regionais.

Como síntese conclusiva, diante das melhorias verificadas nas propriedades e comportamentos do solo com o tratamento, tem-se que a técnica da biomineralização se constitui em uma opção viável para o controle de processos erosivos. O aprofundamento nesta linha de pesquisa permitirá a incorporação da técnica aos problemas reais, inclusive em outras aplicações.

6.2 – SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Os estudos versando sobre biotecnologia aplicada às obras de engenharia civil são poucos, sendo que até agora foram dados apenas os primeiros passos, o que torna relevante a continuidade das pesquisas sobre o tema.

Recomenda-se estudos mais detalhados sobre os diferentes tipos de bactérias propiciadoras da precipitação do carbonato de cálcio objetivando otimizar o tratamento do solo. Nesse estudo deve-se incluir a análise de outros tipos e teores de nutriente bem como das proporções dos compostos que o constituem. Deve-se ainda analisar a influência da sazonalidade na população bacteriana.

Sugere-se a realização de estudos semelhantes ao aqui apresentado para outros perfis de intemperismo.

Outro aspecto relevante a ser analisado diz respeito ao tempo de cura, pois se por um lado o aumento da umidade inicial do solo eventualmente pode comprometer seu comportamento mecânico, por outro ao se adotar tempos de cura superiores a quinze dias ocorre a expectativa de uma melhora do comportamento.

Definidas as condições ideais de aplicação da biomineralização a partir dos estudos de laboratório, recomenda-se após definir as condições operacionais ótimas para o campo que se implante um experimento *in situ*.

Nesta pesquisa deu-se ênfase a biomineralização do carbonato de cálcio, no entanto, seria recomendável estudar outras formas de precipitação tais como dos óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio, por serem estes conhecidamente compostos que contribuem para a melhoria do comportamento mecânico dos solos tropicais.

Em pesquisas futuras é recomendável usar técnicas de separação do material precipitado para que se possa avaliar sua estabilidade ao longo do tempo diante de ataques por agentes químicos.

Para estudos posteriores se sugere o uso de outras técnicas de detecção dos minerais de carbonato de cálcio que complementem os resultados, como a análise Térmica Diferencial (TEM) e a análise pelo Espectrômetro de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR).

Nesta pesquisa foi estudada a mudança nas propriedades dos solos naturais pela aplicação de um nutriente, que junto com as bactérias nativas precipitaram minerais de carbonato de cálcio. Seria interessante, esterilizar os solos, garantindo que não tivessem presença de bactérias, e adicionar o nutriente, para analisar quanto da mudança das propriedades é por biomineralização e quanto pela ação química causada pelo nutriente.

Finalmente, diante dos resultados obtidos torna-se recomendável estudar a utilização da técnica de biomineralização na solução de outros problemas de engenharia tais como barragens e construção rodoviária.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT. NBR 6457. (1986). Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização, Rio de Janeiro, RJ, 9 p. Origem: MB-27/84.
- ABNT. NBR 6459. (1984). Solo - Determinação do limite de liquidez, Rio de Janeiro, RJ, 6 p. Origem: MB-30.
- ABNT. NBR 6508. (1984). Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da massa específica, Rio de Janeiro, RJ, 8p. Origem: MB – 28.
- ABNT. NBR 7180. (1984). Solo - Determinação do limite de plasticidade, Rio de Janeiro, RJ, 3 p. Origem: MB-31.
- ABNT. NBR 7181 (1984). Solo - Análise Granulométrica, Rio de Janeiro, RJ, 13 p. Origem: MB-32.
- 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.
- ABNT. NBR 13602. (1996). Solo – Avaliação da dispersibilidade de solos argilosos pelo ensaio sedimentométrico comparativo – Ensaio de dispersão SCS, Rio de Janeiro, RJ, 5 p.
- ABNT. NBR 13292. (1995). Solo – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante, Rio de Janeiro, RJ, 8 p.
- ABNT. NBR 14114. (1998). Solo – Solos argilosos dispersivos. Identificação e Classificação por meio do ensaio do furo de agulha (*Pinhole Test*), Rio de Janeiro, RJ.

- ABNT. NBR 14545. (2000). Solo – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável, Rio de Janeiro, RJ, 12 p.
- ABNT – MB 3336. (1991). Ensaio de adensamento unidimensional, Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo, 13 p.
- Araki, M. S. (1997). Aspectos Relativos às Propriedades dos Solos Porosos Colapsíveis do Distrito Federal. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de engenharia civil e ambiental, Brasília, DF, 121 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.
- ASTM D-3080. (2004). Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions, vol 04.08, 7p.
- Bang, S. & Ramakrisnan, V. (2001). Microbiologically-Enhanced Crack Remediation (MECR). South Dakota School of Mines and Technology, 13p.
- 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.
- Bertoni, J. & Lombardi, F. (1999). Conservação do Solo. Ícone, 4º ed. São Paulo, SP, 335 p.
- Black, K., Sun, H., Craig, G., Paterson, D. M., Watson, J. a n d Tolhurst, T. (2001). Incipient erosion of biostabilized sediments examined using particle-field optical holography. Environmental Science Technology. Jerald Schnoor. University of Iowa, Iowa City, 35: 2275-2281.

- Boquet, E., Boronat, A. & Ramos, A. (1973). Production of calcite (calcium carbonate) crystals by soil bacteria is a general phenomenon. *Nature* (246):527-529.
- Brandy, N. C. (1979). *Natureza e propriedades dos solos* (Tradução de Antonio B. Neiva Figueiredo Filho), 5ª edição, Rio de Janeiro, Freitas Bastos, 647 p.
- Camapum de Carvalho, J. (1985). *Etude du comportement mécanique d'une marne compactée*. These em Doctorat en Génie Civil. Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse. 1981.
- Camapum de Carvalho, J., Lima, M. & Mortardi, D. (2001). Considerações sobre prevenção e controle de voçorocas, 7º Simpósio Nacional de Controle de Erosão, ABMS/ABGE, Goiânia, GO.
- Camapum de Carvalho, J. (2005). Mecanismos de inestabilização de taludes de erosões. IV COBRAE – Conferencia Brasileira sobre Estabilidade de Encostas, Salvador. 1: 361-372.
- Camapum de Carvalho, J. (2005). *Aulas de Geotecnia I*. Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de engenharia civil e ambiental, Brasília.
- Camapum de Carvalho, J. ; Leroueil, S. (2004). Curva característica de sucção transformada. *Solos e Rochas*, São Paulo, v. 27, n. 3, p. 231-242.
- Camapum de Carvalho, J., Martines, M., Mortini, D., Fázio, J. A., da Motta, N. O. & Apolinário, R. (2006). Processos erosivos. Livro: *Processos Erosivos no Centro-Oeste Brasileiro*. Ed: FINATEC, Brasília, Cap 2, 39-91.
- Cardona, F. & Usta, M. (2002). Un estudio de la reducción de permeabilidad por la depositación de finos y bacterias en medios porosos. Trabajo de grado. Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia, 119 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. (2002). Propriedades e Comportamento Mecânico de Solos do Planalto Central Brasileiro. Tese de Doutorado. Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de engenharia civil e ambiental, Brasília, DF, 357 p.
- Carneiro, F. L. L. B. & Barcellos, A. (1953). Résistance à la traction dès bétons. Bulletin Rilem (1), 13, 97-108.
- Castanier, S., Le Me'tayer-Levrel, G. & Perthuisot, J.-P. (1997). La carbonatogene`se bactérienne. In: Causse, F., Gasse, F. (Eds.), Hydrologie et ge'ochimie isotopique. ORSTOM, Paris, 197–218.
- 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 , July 1999: 9-23.
- Ciferri, O., Tiano, P. & Mastromei, G. (2004). Análisis del Biocemento y sus aplicaciones. Premios Miliarium, 42 p.
- Conrado, E. J., Camapum de Carvalho, J., Bueno da Fonseca, F., Macedo, R. M., Cabral, R. e Lima, M. (2006). Solos tropicais e o processo erosivo. Livro: Processos Erosivos no Centro-Oeste Brasileiro. Ed: FINATEC, Brasília, Cap 3, 93-153.
- Da Silva, J. D. (2006). Estudo da colapsibilidade da argila porosa de Brasília pelo fluxo de contaminantes. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de engenharia civil e ambiental, Brasília, DF, 141 p.
- De Paula, S. (2006). Uma abordagem de parâmetros de biomineralização em um sistema constituído por carbonato de cálcio. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, Instituto de Física, São Paulo, 182 p.

- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA (1997). Manual de Métodos de Análise de Solo. Centro Nacional de Pesquisa do Solo, 2ª edição, Rio de Janeiro, RJ. 212p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. (1999). Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. Rio de Janeiro. 412p.
- DNER – ME 138. (1994). DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. Misturas betuminosas – determinação da resistência a tração por compressão diametral. Norma rodoviária. Método de ensaio. DNER/IPR, Rio de Janeiro, RJ, 4 p.
- Erlich, H. L. (1998). Geomicrobiology: Its significance for geology. *Earth Sci. Rev.* 45: 45–60.
- Flórez, J. A. (2007). Estabilización de suelos con biocemento. Universidad de Los Andes, Bogotá, Colombia, 6p.
- GeoDelft. (2006). Nationaal Instituut voor Geo-engineering. www.geodelft.nl. Acesso o dia 13 de março de 2006.
- Google Earth. (2009). Acesso o dia 21 de maio de 2009.
- Gomes, M. R. F. (2006). Comportamento de um aterro compactado em campo e em laboratório. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 162 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, M. (2009). Uso de biotecnologia na melhoria de solos para fins de pavimentação rodoviária. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de engenharia civil e ambiental, Brasília, DF, 119 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.
- <http://antibios.com/moodle/course/view.php?id=10>. (2009). Acesso o dia 04 de junho de 2009.
- http://depa.pquim.unam.mx/amyd/archivero/3c.PruebasBioquimicas_7308.pdf. (2009). Acesso o dia 04 de junho de 2009.
- <http://geo-er.eng.hokudai.ac.jp/new2/research/softrock-e/softrock-e.html> no dia. (2006). Acesso o dia 23 de abril de 2006.
- http://ingenieracivil.blogspot.com/2008/08/exploracion-muestreo-en-el-campo-y_19.html. (2009). Acesso o dia 07 de junho de 2009.
- http://ingenieracivil.blogspot.com/2008_07_01_archive.html. (2009). Acesso o dia 07 de junho de 2009.
- <http://microbiologiabrasil.blogspot.com/2009/01/prova-vermelho-de-metila-mr.html>. (2009). Acesso o dia 04 de junho de 2009.

- <http://www.hardydiagnostics.com/catalog2/hugo/CatalaseReagent.htm>. (2009). Acesso o dia 04 de junho de 2009.
- <http://www.joseacortes.com/praticas/tinciongram.htm>. (2009). Acesso o dia 04 de junho de 2009.
- <http://www.scribd.com/doc/5203044/Medios-de-Cultivo-y-Pruebas-Bioquimicas>. (2009). Acesso o dia 04 de junho de 2009.
- Iwasa, O & Fedrich, R. (1998). Controle de erosão urbana. In: Oliveira, A.M.S & Brito, S.N.A., Geologia de Engenharia, ABGE, , São Paulo, SP, Cap. 16: 271-281.
- 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.
- 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.
- Maia, N. H. (2005). Influencia de aspectos estruturais no colapso de solos do norte do Paraná. Universidade de São Paulo, Tese para obtenção do título de Doutor em Geotecnia, 325p.
- Marinho, F. A. M. (1995). A técnica do papel filtro para a medição da sucção. Anais do encontro de solos não saturados, Porto Alegre, RS, 112-125.
- Martines, M. S., Camapum de Carvalho, J. & Palmeiras, E.M. (2006). Controle de erosões. Livro: Processos Erosivos no Centro-Oeste Brasileiro. Ed: FINATEC, Brasília, Cap. 13, 427-464.

- 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.
- Martins, E. O. & Souza, N. M. (2005). Utilização do Programa Spring para o cadastramento de erosões. In: Simpósio Brasileiro de Aplicação de Informática em Geotecnia, 5, Belo Horizonte, MG. Anais INFO-GEO-ABMS.
- Me'tayer-Levrel, G. L. Castanier S., Oriol G., Loubie're c, J.-F & . Perthuisot, J.-P. (1999). Applications of bacterial carbonatogenesis to the protection and regeneration of limestones in buildings and historic patrimony. *Sedimentary Geology* 126: 25–34.
- 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.
- Mortari, D. & Camapum de Carvalho, J. (1994). Influencia do perfil de umidade na Instabilidade de Encostas de Boçoroca no Distrito Federal. X Congresso Brasileiro de Mecânica de Solos e Engenharia Geotécnica, vol. 4. ABMS, Foz do Iguaçu, PR, 882-888.
- Navarro, C., Gallego, M., Ben chekroun, K. & Muñoz, M. (2003). Conservation of ornamental stone by *Mixococcus xanthus*. Induced carbonate biomineralization. *Applied and Environmental Microbiology*, April, 69, n°4: 2182-2193.
- Nogami, J. & Villibor, D. (1995). *Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos*. Brasil. Ed. Vilibor, São Paulo, SP, 213p.

- Oliveira, M. (1999). Processos erosivos e preservação de áreas de risco de erosão por voçorocas. *Erosão e Conservação de Solos: Conceitos, Temas e Aplicações*, Bertrand Brasil, Rio de Janeiro, RJ, 57-100.
- Oliveira, E. M. (2005). Cadastro georrefenciado de erosões no Distrito Federal. Defesa de Mestrado, Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de engenharia civil e ambiental, Brasília, DF, 114 p.
- Peña, J. J. (1980). *Introducción a la microbiología del suelo*. Libros y editoriales S.A. Mexico. 27-402.
- Pèrez, J. L., Villegas, R., Vale, J. F., Bello, M. A. & Alcade, M. (1995). Effects of consolidant and water repellent treatments on the porosity and pore size distribution of limestones. In *Proceeding of the international Colloquium Methods of Evaluating Products for the Conservation of Porous Building Materials in Monuments*. ICCROM, Rome, 203-211.
- Postaisdazezinha.blogspot.com. (2009). Acesso o dia 21 de maio de 2009.
- Primavesi, A. (1952). *Erosão. Criação e Lavoura*, nº 10, São Paulo, SP, 82 p.
- Qinn, P. J., Carter, M. E., Markey, B. & Carter, G. R. (1994). *Clinical Veterinary Microbiology*. Ed: Wolfe, London, 648 p.
- Santos P. S. (1975). *Tecnologia de argilas aplicada às argilas brasileiras*. vol. 1 Fundamentos, Edgard Blucher Ltda, Universidade de São Paulo, 335 p.
- SECSA. (2006) Perma zyme 11x. Bogotá, Col. www.secsasa.com. Acesso 13 de março de 2006.
- Soto, A. (2003). *Introducción a los Biominerales y Biomateriales*. Universidade de Chile. 31 p.

- Souza, É. R. A., Abílio de Carvalho, O. e Fontes, R. (2004). Evolução geomorfológica do Distrito Federal. EMBRAPA, documentos 122, 56 p.
- STASOIL. (2006) Terrazyme. www.stasoil.com/Terrazyme.html. Acesso o dia 13 de março de 2006.
- Stocks-Firscher, S., Galinat, J. & Bang, S. (1999). Microbiological precipitation of CaCO₃. *Soil Biology & Biochemistry*, 31, 1563-1571.
- Tiano, P., Biagiotti, L. & Mastromei, G. (1999). Bacterial bio-mediated calcite precipitation for monumental stones conservation: methods of evaluation, 36, 139-145.
- Valencia, Y. G., Farias, M. M., Camapum de Carvalho, J. e Cordão Neto, M. P. (2007). Determinação dos parâmetros da envoltória de ruptura em solos não saturados a partir de diversos ensaios simples de laboratório. VI Simpósio Brasileiro de Solos não saturados. Salvador, BA, 339-348.
- Whiffin, V., Lambert, J., Dert F. & Van ree, C. (2005). Biogrout and Biosealing. Pore space engineering with bacteria. September-October, 13-36.
- Whiffin, V., Van Paassen, L. A., Harkes, M. P. (2007). Microbial Carbonate Precipitation as a Soil. Improvement Technique *Geomicrobiology Journal*. Taylor & Francis Group. 24:1-7.
- Wikipédia. (2009). A enciclopédia livre. <http://pt.wikipedia.org/wiki/Bactéria>. Acesso o dia 04 de junho de 2009.
- www.enq.ufsc.br/labs/probio/disc_eng_bioq/trabalhos_pos2004/microorganismos/BACTERIAS.htm. Acesso o dia 04 de junho de 2009.
- www.ucm.es/info/mfar/pdfs/GuiaMicro3.pdf#search=%22metodos%2Bidentificacion%2Bmicroorganismos%22. (2006). Acesso o dia 23 de maio de 2006.

www.microinmuno.qb.fcen.uba.ar/SeminarioPruebasBioquimicas.htm. (2006). Acesso o dia 23 de maio de 2006.

www.microbiologia.ufba.br/aulas/provas%20bioquimicas.doc (2006). Acesso o dia 23 de maio de 2006.

www.scribd.com/doc/5203044/Medios-de-Cultivo-y-Pruebas-Bioquimicas. (2009). Acesso o dia 04 de junho de 2009.

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 1

Correlações estatísticas para o perfil da voçoroca da Santa Maria sem nutriente (S.N.) e com nutriente (C.N.) usando a ferramenta “Análise de dados – correlações” do “Excel”

Propriedade S.N.	pH (água)	pH (KCL)	ΔpH	Cálcio + Magnésio	Cálcio	Magnésio	Potássio	Sódio	Valor S
pH (água)	1,000								
pH (KCL)	0,011	1,000							
ΔpH	-0,596	0,796	1,000						
Cálcio + Magnésio	-0,887	-0,111	0,447	1,000					
Cálcio	-0,584	-0,440	0,000	0,813	1,000				
Magnésio	-0,800	-0,371	0,186	0,943	0,791	1,000			
Potássio	0,195	-0,294	-0,354	-0,271	-0,500	0,000	1,000		
Sódio	-	-	-	-	-	-	-	1,000	
Valor S	-0,704	-0,057	0,380	0,910	0,645	0,919	0,000	-	1,000
Alumínio	-0,704	0,606	0,913	0,560	0,000	0,408	0,000	-	0,583
Acidez Total	-0,868	-0,202	0,363	0,993	0,816	0,975	-0,181	-	0,925
Valor C.T.C	-0,843	-0,173	0,372	0,988	0,789	0,975	-0,143	-	0,954
Saturação de alumínio	-0,565	0,754	0,947	0,378	-0,178	0,191	-0,036	-	0,400
Saturação de bases	-0,435	0,000	0,264	0,606	0,224	0,707	0,447	-	0,866
Carbono orgânico	-0,896	0,029	0,566	0,985	0,786	0,872	-0,397	-	0,864
Matéria orgânica	-0,897	0,029	0,567	0,985	0,786	0,871	-0,398	-	0,863
Fósforo	-0,857	-0,308	0,272	0,966	0,786	0,994	-0,052	-	0,913
Índice vazios	-0,854	0,384	0,825	0,863	0,550	0,661	-0,468	-	0,748
Saturação	0,847	-0,341	-0,787	-0,894	-0,545	-0,733	0,341	-	-0,842
Umidade	-0,682	0,662	0,944	0,612	0,297	0,329	-0,594	-	0,469
Peso específico	0,799	-0,561	-0,934	-0,708	-0,233	-0,516	0,233	-	-0,662
% finos	-0,116	-0,075	0,010	0,327	0,714	0,161	-0,909	-	0,093
% Argilas	-0,678	0,361	0,701	0,767	0,666	0,519	-0,769	-	0,589
T.A (%)	0,075	0,736	0,546	-0,114	-0,061	-0,431	-0,818	-	-0,278
Atividade Skempton	-0,496	0,438	0,652	0,584	0,084	0,539	0,204	-	0,797
Atividade EMBRAPA	-0,777	-0,345	0,193	0,902	0,680	0,986	0,151	-	0,930
A.T (%)	-0,672	0,368	0,703	0,760	0,660	0,509	-0,774	-	0,581
wL	-0,575	0,609	0,837	0,678	0,284	0,494	-0,284	-	0,752
Ip	-0,673	0,464	0,780	0,778	0,368	0,639	-0,184	-	0,854

Propriedade S.N.	Alumínio	Acidez Total	Valor C.T.C	Saturação de alumínio	Saturação de bases	Carbono orgânico	Matéria orgânica	Fósforo	Índice vazios
Alumínio	1,000								
Acidez Total	0,515	1,000							
Valor C.T.C	0,537	0,996	1,000						
Saturação de alumínio	0,974	0,319	0,341	1,000					
Saturação de bases	0,577	0,649	0,706	0,429	1,000				
Carbono orgânico	0,618	0,959	0,950	0,462	0,526	1,000			
Matéria orgânica	0,618	0,958	0,950	0,463	0,525	1,000	1,000		
Fósforo	0,474	0,989	0,985	0,265	0,680	0,909	0,909	1,000	
Índice vazios	0,805	0,805	0,803	0,717	0,453	0,930	0,931	0,725	1,000
Saturação	-0,827	-0,850	-0,859	-0,719	-0,599	-0,939	-0,939	-0,783	-0,985
Umidade	0,805	0,522	0,517	0,805	0,199	0,733	0,734	0,412	0,925
Peso específico	-0,963	-0,651	-0,662	-0,915	-0,521	-0,779	-0,780	-0,587	-0,933
% finos	-0,274	0,274	0,238	-0,302	-0,369	0,394	0,394	0,175	0,316
% Argilas	0,543	0,692	0,678	0,482	0,179	0,861	0,861	0,578	0,917
T.A (%)	0,160	-0,224	-0,239	0,307	-0,507	0,054	0,055	-0,364	0,315
Atividade Skempton	0,841	0,576	0,633	0,763	0,890	0,580	0,580	0,552	0,669
Atividade EMBRAPA	0,465	0,943	0,952	0,251	0,799	0,819	0,818	0,976	0,622
A.T (%)	0,541	0,684	0,670	0,483	0,171	0,855	0,855	0,569	0,915
wL	0,843	0,623	0,660	0,794	0,635	0,741	0,741	0,536	0,880
Ip	0,854	0,740	0,775	0,766	0,740	0,814	0,814	0,674	0,897

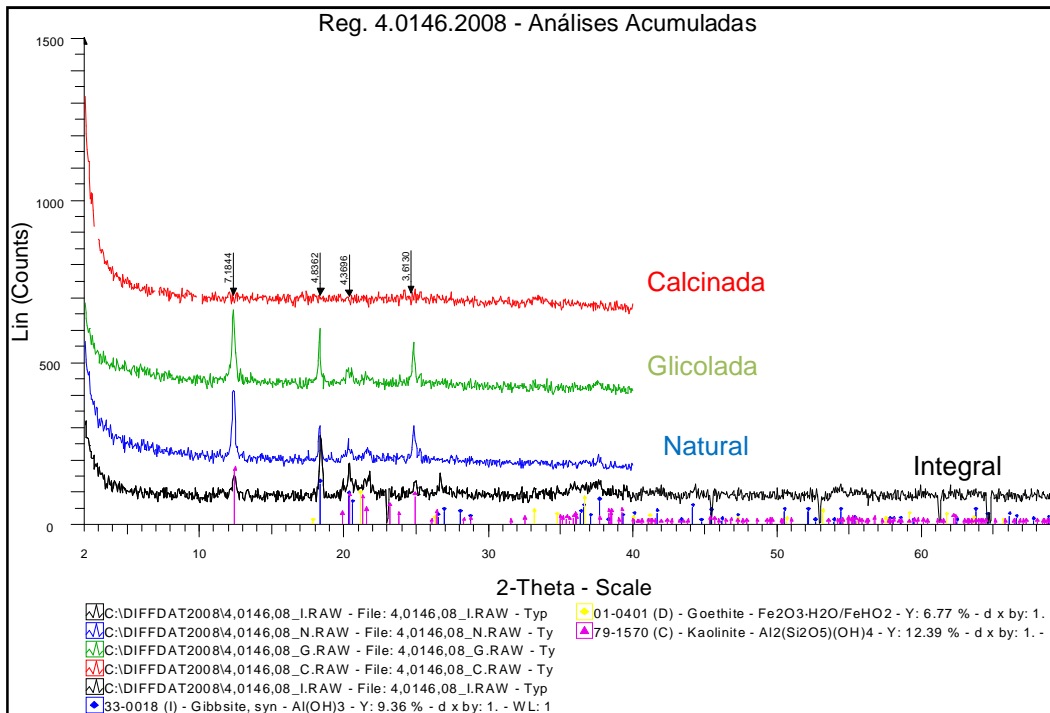
Propriedade S.N.	Saturação	Umidade	Peso específico	% finos	% Argilas	T.A (%)	Atividade Skempton	Atividade EMBRAPA	A.T (%)	wL	Ip
Saturação	1,000										
Umidade	-0,868	1,000									
Peso específico	0,934	-0,913	1,000								
% finos	-0,223	0,319	0,012	1,000							
% Argilas	-0,862	0,893	-0,746	0,656	1,000						
T.A (%)	-0,188	0,614	-0,271	0,547	0,548	1,000					
Atividade Skempton	-0,770	0,556	-0,791	-0,309	0,411	-0,101	1,000				
Atividade EMBRAPA	-0,714	0,285	-0,530	-0,001	0,423	-0,519	0,622	1,000			
A.T (%)	-0,858	0,895	-0,744	0,659	1,000	0,558	0,407	0,413	1,000		
wL	-0,913	0,847	-0,900	0,116	0,769	0,323	0,879	0,504	0,767	1,000	
Ip	-0,949	0,797	-0,908	0,062	0,742	0,153	0,916	0,658	0,739	0,981	1,000

Propriedade C.N.	pH (água)	pH (KCL)	ΔpH	Cálcio + Magnésio	Cálcio	Magnésio	Potássio	Sódio	Valor S
pH (água)	1,000								
pH (KCL)	0,980	1,000							
ΔpH	-0,789	-0,652	1,000						
Cálcio + Magnésio	0,718	0,702	-0,573	1,000					
Cálcio	0,722	0,700	-0,596	0,999	1,000				
Magnésio	-0,603	-0,461	0,881	-0,717	-0,741	1,000			
Potássio	0,857	0,939	-0,367	0,684	0,670	-0,218	1,000		
Sódio	0,563	0,694	0,000	0,502	0,484	0,000	0,845	1,000	
Valor S	0,745	0,738	-0,564	0,998	0,996	-0,695	0,727	0,557	1,000
Alumínio	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Acidez Total	-0,251	-0,211	0,305	0,322	0,305	0,106	-0,023	-0,137	0,286
Valor C.T.C	0,633	0,635	-0,455	0,985	0,980	-0,617	0,664	0,484	0,980
Saturação de alumínio	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Saturação de bases	0,898	0,877	-0,719	0,829	0,836	-0,731	0,773	0,664	0,854
Carbono orgânico	0,368	0,421	-0,102	0,783	0,765	-0,224	0,569	0,371	0,773
Matéria orgânica	0,366	0,419	-0,102	0,783	0,766	-0,225	0,567	0,370	0,773
Fósforo	0,558	0,428	-0,814	0,110	0,138	-0,644	0,112	-0,051	0,118
Índice vazios	0,394	0,473	-0,038	0,738	0,716	-0,113	0,650	0,469	0,737
Saturação	-0,178	-0,210	0,030	-0,652	-0,636	0,165	-0,350	-0,119	-0,627
Umidade	0,464	0,565	-0,021	0,709	0,685	-0,043	0,756	0,596	0,721
Peso específico	-0,370	-0,452	0,013	-0,652	-0,629	0,026	-0,630	-0,403	-0,651
% finos	0,627	0,670	-0,320	0,739	0,724	-0,235	0,750	0,400	0,741
% Argilas	0,331	0,387	-0,067	0,530	0,511	0,001	0,522	0,188	0,521
T.A (%)	0,395	0,448	-0,120	0,575	0,556	-0,046	0,572	0,230	0,568
Atividade Skempton	-0,458	-0,411	0,481	0,174	0,167	0,016	-0,240	0,167	0,162
Atividade EMBRAPA	0,146	0,081	-0,309	0,137	0,157	-0,507	-0,071	0,209	0,149
A.T (%)	0,333	0,389	-0,067	0,533	0,514	0,000	0,525	0,192	0,524
wL	0,170	0,237	0,086	0,485	0,463	0,079	0,414	0,153	0,471
Ip	0,207	0,265	0,031	0,659	0,640	-0,096	0,438	0,247	0,643

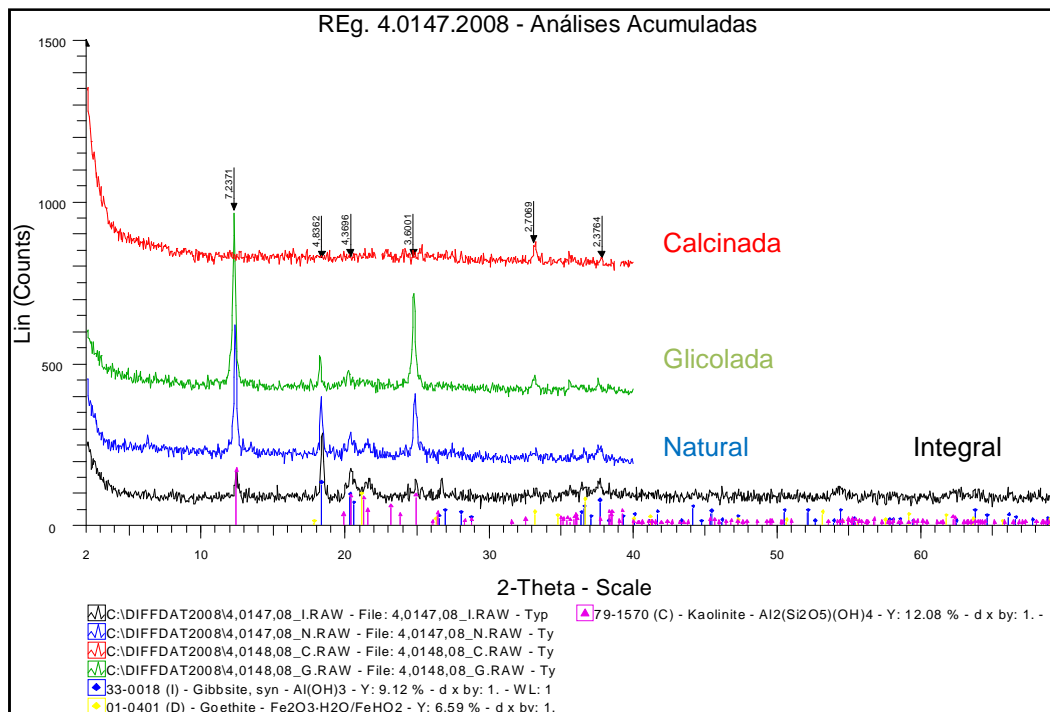
Propriedade C.N.	Alumínio	Acidez Total	Valor C.T.C	Saturação de alumínio	Saturação de bases	Carbono orgânico	Matéria orgânica	Fósforo	Índice vazios
Alumínio	1,000								
Acidez Total	-	1,000							
Valor C.T.C	-	0,471	1,000						
Saturação de alumínio	-	-	-	1,000					
Saturação de bases	-	-0,254	0,733	-	1,000				
Carbono orgânico	-	0,787	0,875	-	0,363	1,000			
Matéria orgânica	-	0,788	0,875	-	0,362	1,000	1,000		
Fósforo	-	-0,784	-0,054	-	0,529	-0,469	-0,470	1,000	
Índice vazios	-	0,742	0,833	-	0,359	0,986	0,986	-0,502	1,000
Saturação	-	-0,907	-0,766	-	-0,145	-0,963	-0,964	0,556	-0,928
Umidade	-	0,633	0,795	-	0,407	0,942	0,941	-0,468	0,983
Peso específico	-	-0,755	-0,756	-	-0,267	-0,963	-0,962	0,525	-0,987
% finos	-	0,563	0,799	-	0,461	0,903	0,902	-0,220	0,923
% Argilas	-	0,763	0,638	-	0,130	0,894	0,893	-0,477	0,911
T.A (%)	-	0,729	0,675	-	0,196	0,903	0,902	-0,428	0,921
Atividade Skempton	-	0,380	0,228	-	-0,056	0,218	0,220	-0,508	0,165
Atividade EMBRAPA	-	-0,641	0,004	-	0,477	-0,440	-0,439	0,602	-0,487
A.T (%)	-	0,763	0,641	-	0,133	0,896	0,895	-0,478	0,913
wL	-	0,866	0,614	-	0,022	0,911	0,910	-0,625	0,920
Ip	-	0,884	0,776	-	0,179	0,982	0,982	-0,598	0,966

Propriedade C.N.	Saturação	Umidade	Peso específico	% finos	% Argilas	T.A (%)	Atividade Skempton	Atividade EMBRAPA	A.T (%)	wL	Ip
Saturação	1,000										
Umidade	-0,847	1,000									
Peso específico	0,925	-0,975	1,000								
% finos	-0,838	0,923	-0,942	1,000							
% Argilas	-0,909	0,885	-0,961	0,938	1,000						
T.A (%)	-0,902	0,900	-0,966	0,960	0,998	1,000					
Atividade Skempton	-0,215	0,099	-0,048	-0,209	-0,153	-0,171	1,000				
Atividade EMBRAPA	0,565	-0,472	0,614	-0,535	-0,765	-0,729	0,347	1,000			
A.T (%)	-0,910	0,887	-0,962	0,939	1,000	0,998	-0,150	-0,763	1,000		
wL	-0,947	0,878	-0,961	0,875	0,981	0,968	0,016	-0,771	0,981	1,000	
Ip	-0,989	0,908	-0,961	0,860	0,918	0,914	0,237	-0,562	0,920	0,957	1,000

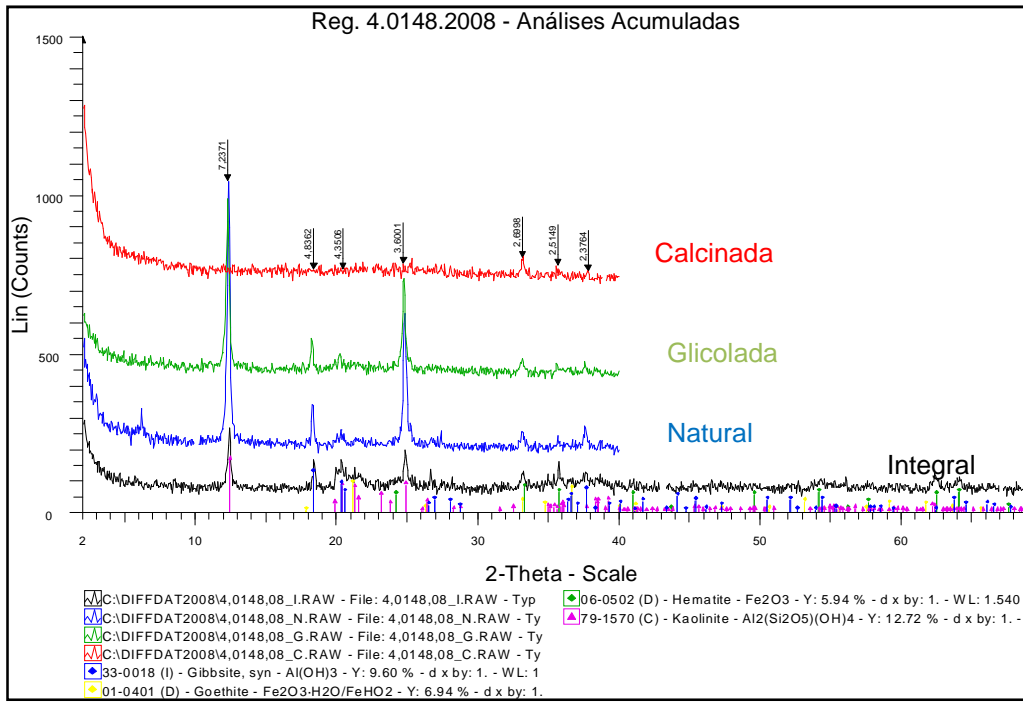
ANEXO 2



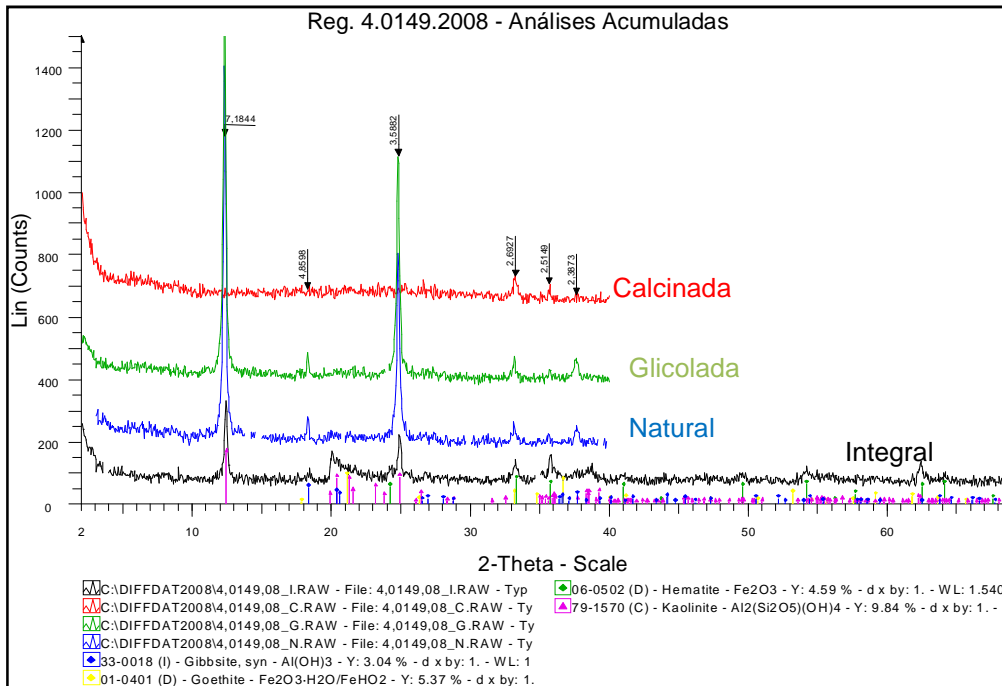
Difratograma de raios X acumulado para 1m Sem nutriente.



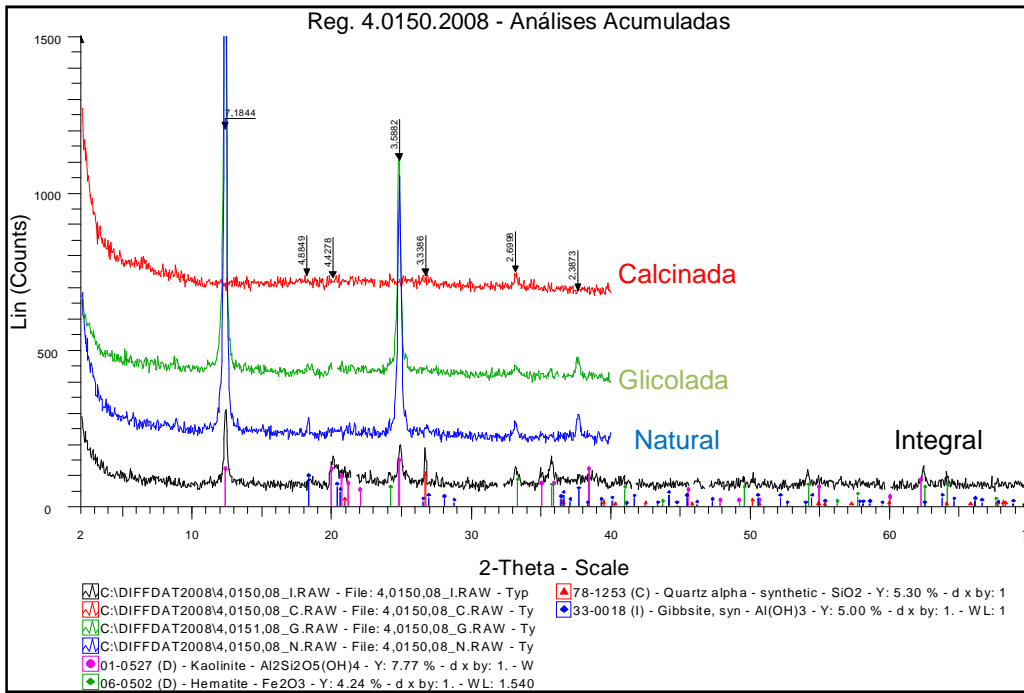
Difratograma de raios X acumulado para 2m Sem nutriente.



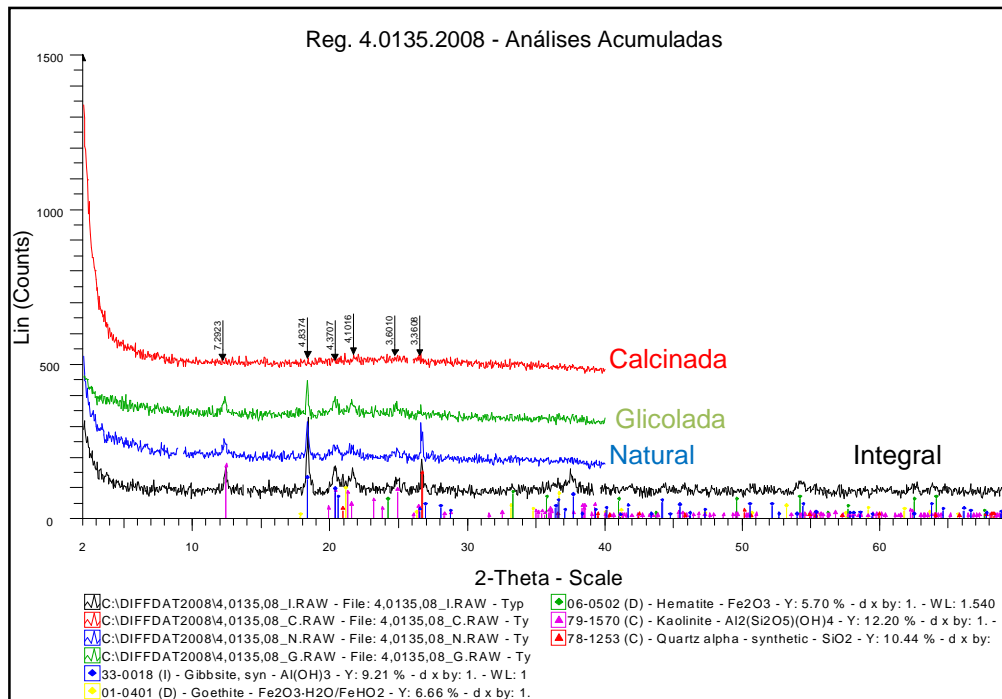
Difratograma de raios X acumulado para 3m Sem nutriente.



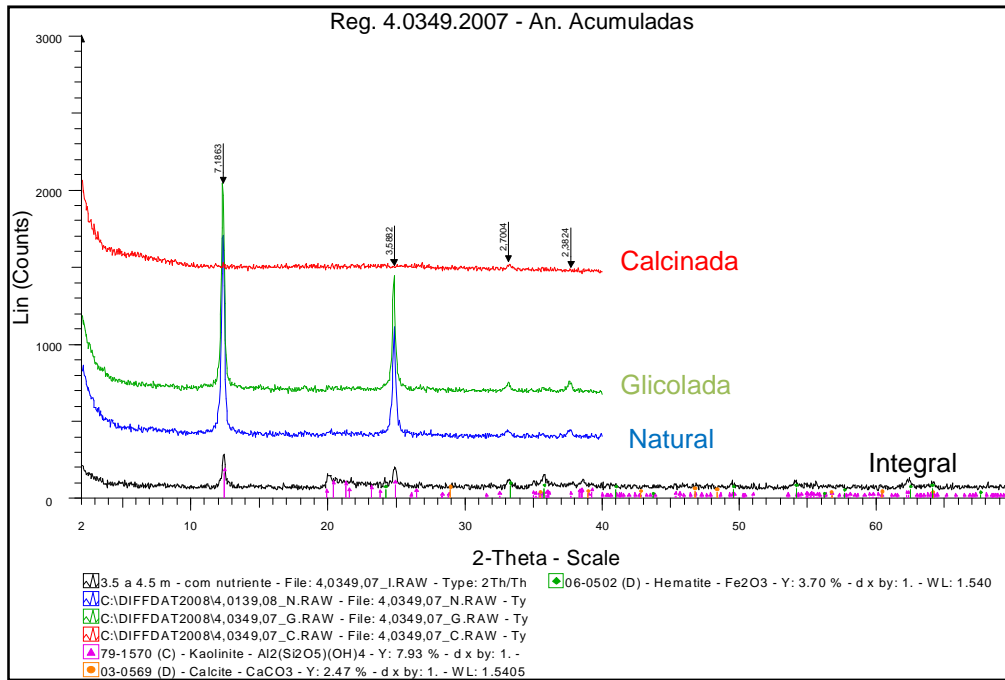
Difratograma de raios X acumulado para 4m Sem nutriente.



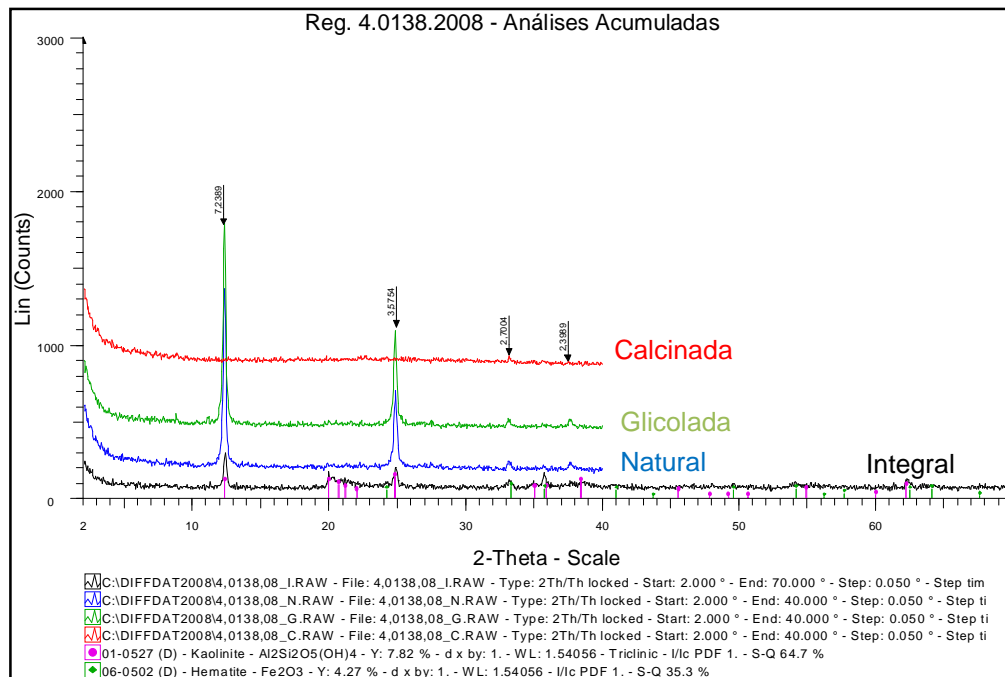
Difratograma de raios X acumulado para 5m Sem nutriente



Difratograma de raios X acumulado para 1m Com nutriente

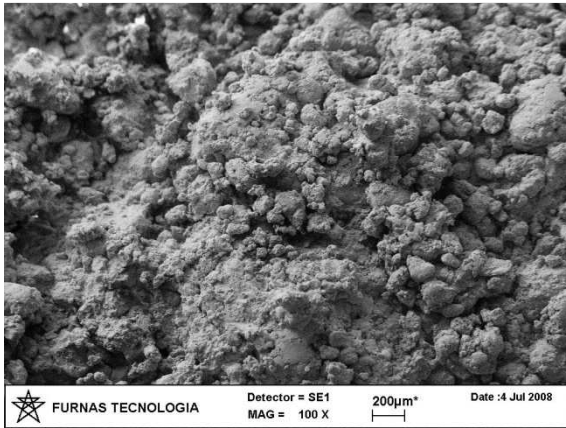


Difratograma de raios X acumulado para 4m Com nutriente.

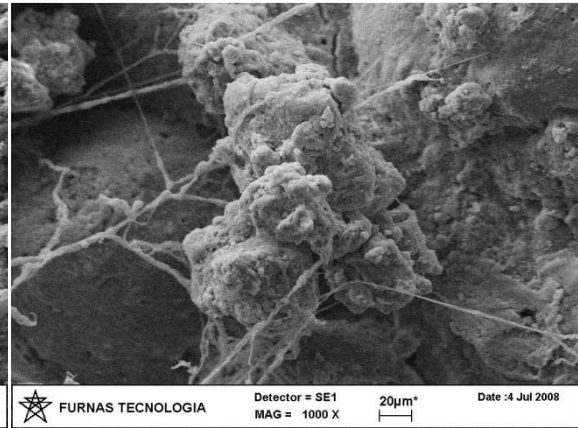


Difratograma de raios X acumulado para 5m Com nutriente.

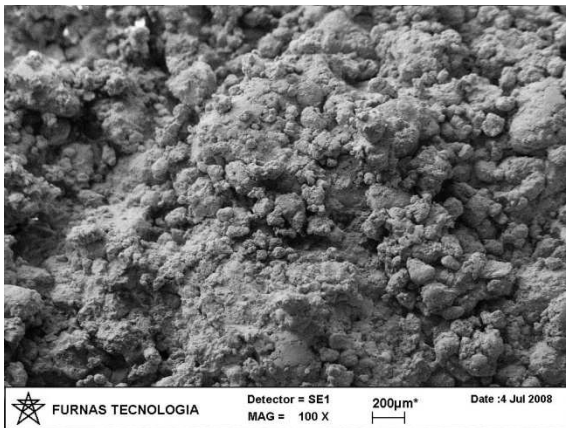
ANEXO 3



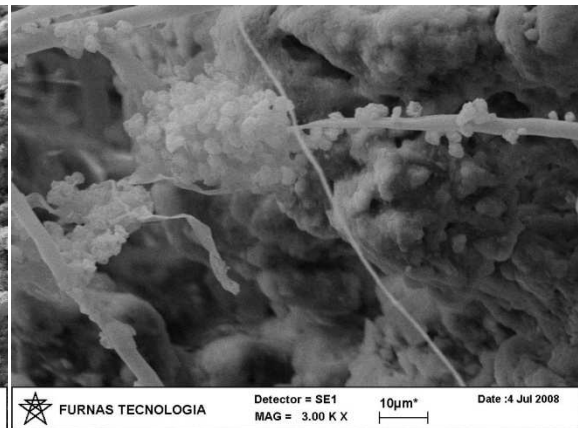
MEV para 1m Sem nutriente.



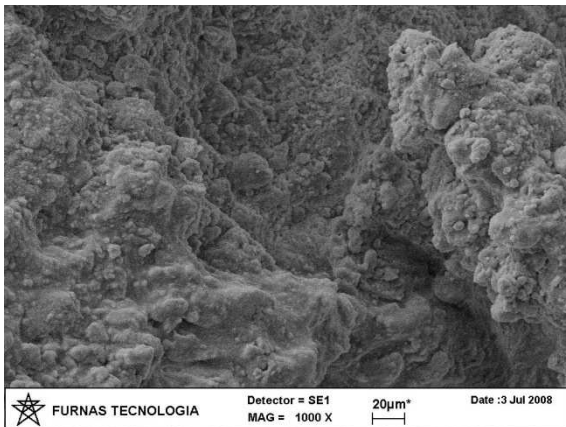
MEV para 1m Com nutriente.



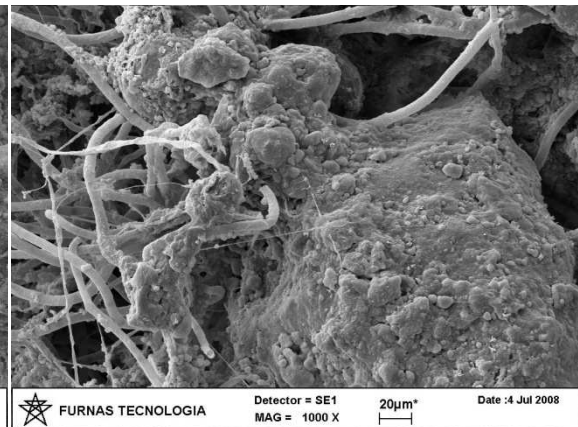
MEV para 2m Sem nutriente.



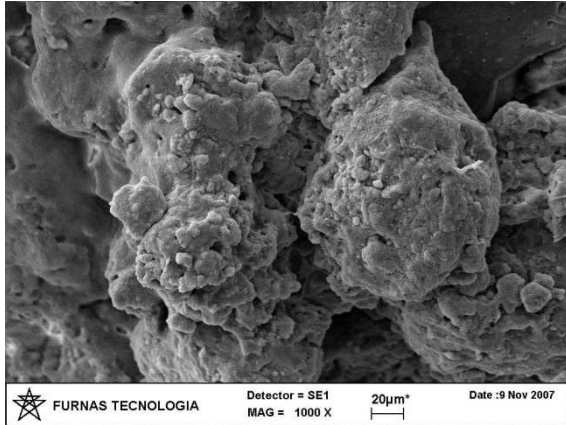
MEV para 2m Com nutriente.



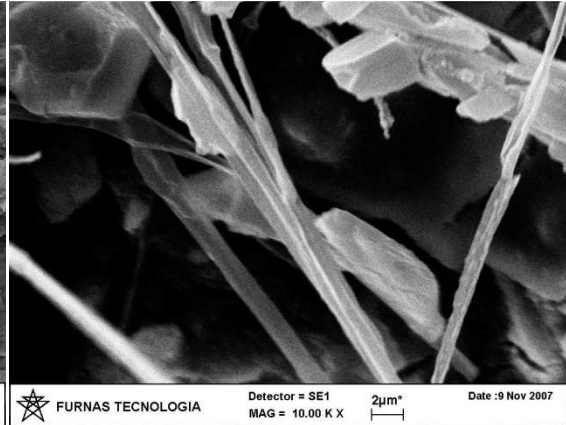
MEV para 3m Sem nutriente.



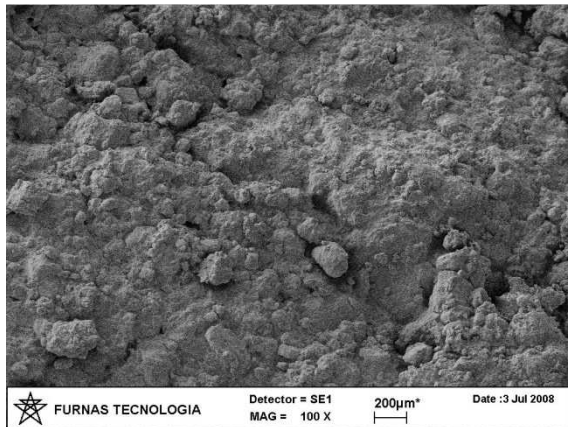
MEV para 3m Com nutriente.



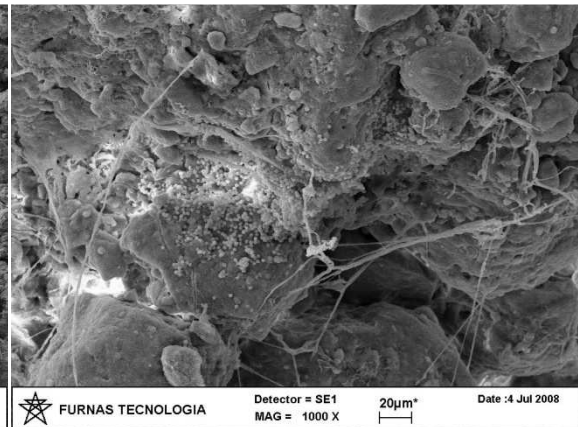
MEV para 4m Sem nutriente.



MEV para 4m Com nutriente.



MEV para 5m Sem nutriente.



MEV para 5m Com nutriente.