



**Gricel Alcira Portillo Miranda**

**Avaliação da Efetividade da Adição de  
Substância Húmica na Redução da  
Erodibilidade de um Material de Desmonte  
Oriundo da Mineração de Pedra Miracema**

**Tese de Doutorado**

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção  
do título de Doutor pelo Programa de Pós-Graduação  
em Engenharia Civil da PUC-Rio.

Orientador: Prof. José Tavares Araruna Júnior  
Co- Orientador: Prof. Eduardo Albuquerque Brocchi

Rio de Janeiro  
Abril de 2015



**Gricel Alcira Portillo Miranda**

**Avaliação da Efetividade da Adição de  
Substância Húmica na Redução da  
Erodibilidade de um Material de Desmonte  
Oriundo da Mineração de Pedra Miracema**

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Doutor pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Civil do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Prof. José Tavares Araruna Júnior**

Orientador

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

**Prof. Eduardo Albuquerque Brocchi**

Co-Orientador

Departamento de Engenharia de Materiais - PUC-Rio

**Prof. Pedricto Rocha Filho**

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

**Prof. Sergio Tibana**

Universidade do Norte Fluminense

**Prof. Fernando Saboya Albuquerque Junior**

Universidade do Norte Fluminense

**Prof. Carlos Cesar Peiter**

Centro de tecnologia mineral

**Prof. José Eugenio Leal**

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro 13 de abril 2015

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, da autora e do orientador.

### **Gricel Alcira Portillo Miranda**

Graduou-se em Engenharia Civil pela Universidade Mayor de San Andrés. Obteve grau de Mestre em Engenharia Civil pela PUC-Rio e em Engenharia Ambiental pela Universidade Estadual do Rio de Janeiro. Trabalhou na instituição “Autoridad Binacional del Lago Titicaca”.

#### Ficha catalográfica

Portillo Miranda, Gricel Alcira

Avaliação da Efetividade da Adição de Substância Húmica na Redução da Erodibilidade de um Material de Desmonte Oriundo da Mineração de Pedra Miracema / Gricel Alcira Portillo Miranda; orientador: José Tavares Araruna Júnior; co-orientador: Eduardo Albuquerque Brocchi – 2015.

183 f. il. (color.) ; 30 cm

Tese (doutorado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, 2015.

Inclui bibliografia

1. Engenharia civil – Teses. 2. Erosão. 3. Substâncias húmicas. 4. Erodibilidade. 5. Condicionadores de solo. I. Araruna Júnior, José Tavares. II. Brocchi, Eduardo Albuquerque III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. IV. Título.

CDD: 624

Aos meus pais  
Raúl e Alcira.



## Agradecimentos

À Deus porque tudo que conseguimos é graças a ele.

Aos meus pais Raúl Portillo e Alcira Miranda pelo amor incondicional, por estarem sempre do meu lado me apoiando e porque o seu exemplo sempre foi fundamental para me guiar.

Às minhas irmãs Mayra e Priscila pelo carinho e apoio incondicional, pelas brincadeiras e por estarem sempre presentes.

Ao meu esposo Fabricio pelo apoio constante nestes anos de doutorado. À minha pequena filha Malé que com cada sorriso me deu a força necessária para finalizar a tese.

Ao professor José Araruna pela orientação, e principalmente pela paciência, ensinamentos e apoio constante durante toda a tese.

Ao professor Eduardo Brocchi pela co-orientação, pelo acompanhamento de cada fase de minha tese, e ajuda financeira na compra de alguns equipamentos usados nos ensaios.

Ao professor Franklin Antunes, que me ajudou muito com seus ensinamentos, tempo brindado e paciência que foi fundamental no decorrer da tese.

Aos professores do Departamento de Engenharia Civil por todos os ensinamentos em cada disciplina.

Ao Renzon Cosme que me proporcionou a substância húmica proveniente do rejeito de carvão que fez parte da sua tese de doutorado e me ajudou também com as análises químicas.

À equipe do Laboratório de Geotecnia, Edson, Amauri, Victor, Elisânio, Alex e principalmente à Rogério e Josué que me ajudaram muito na amostragem e realização dos ensaios.

À Ana Luiza de Almeida Stauffer que me ajudou com a realização de ensaios de laboratório e Guilherme Almeida que também participou na realização de alguns ensaios da metodologia MCT.

Ao Lorenzo Visentin do Departamento de Engenharia Química e de Materiais e da Empresa Nano Bussines que me ajudou com o ensaio de Difração e Fluorescência de Raio X e ao Rodrigo de Souza que me ajudou com a análise de microscopia eletrônica.

Aos meus amigos da PUC: Sandra Rosero, Miriam Escalaya,,Carlos Aguilar, Thais Abreu, Jackeline Castañeda, Fatima Zuleta e Marcelo Molina.

À secretária Rita de Cássia do Nascimento Leite por estar sempre prestes a ajudar a todos os alunos da pós-graduação.

Ao Brasil e ao CNPq pelo auxílio financeiro.

## Resumo

Miranda, Gricel Alcira Portillo; Araruna Júnior, José Tavares; Brocchi, Eduardo Albuquerque. **Avaliação da Efetividade da Adição de Substância Húmica na Redução da Erodibilidade de um Material de Desmonte Oriundo da Mineração de Pedra Miracema**. Rio de Janeiro, 2015. 183p. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O presente estudo visa a avaliar a efetividade da adição de substâncias húmicas obtidas a partir da destilação de um rejeito de carvão mineral na redução da erodibilidade de um material de desmonte oriundo da mineração de Pedra Miracema. O material de Desmonte empregado no referido estudo é oriundo da extração de rochas ornamentais no município de Santo Antônio de Pádua, situado na região Noroeste do Estado do Rio de Janeiro. O material de desmonte tem textura arenosa e apresenta um teor de argila inferior a 10% e o teor de matéria orgânica praticamente nulo, sendo classificado pelo SUCS como uma areia siltosa, o que lhe confere uma condição de elevada erodibilidade. A fim de reduzir a sua erodibilidade, foram adicionadas diferentes porcentagens de substância húmica proveniente do rejeito de carvão mineral (0%, 0,5%, 1%, 3%, 5%). Adicionalmente, para efeito de comparação se aplicou também 1% de uma substância húmica disponível comercialmente. A erodibilidade da mistura material de desmonte - substâncias húmicas foi avaliada através de um programa de ensaios laboratoriais que incluiu a realização de ensaios de desagregação, ensaios de compressão diametral e ensaios de furo de agulha. Paralelamente, foram realizados com as diferentes misturas ensaios de capacidade de troca catiônica, determinação de teor de matéria orgânica, microscopia ótica e microscopia de eletrônica de varredura a fim de justificar os resultados dos ensaios de avaliação da erodibilidade. Os resultados do programa experimental permitiram sugerir que a incorporação de substâncias húmicas a matriz terrosa do material de desmonte reduz o seu potencial de erodibilidade. Verificou-se ainda que uma maior eficácia do tratamento com o passar do tempo.

## Palavras-chave

Erosão; Substâncias húmicas; Erodibilidade; Condicionadores de solo.

## Abstract

Miranda, Grisel Alcira Portillo; Araruna Júnior, José Tavares (Advisor); Brocchi, Eduardo Albuquerque (Co-Advisor). **An Assessment on the Effectiveness of Humic Substances in Reducing the Erodibility of a Quarring Waste Material from Pedra Miracema Mining.** Rio de Janeiro, 2015. 183p. D.Sc. Thesis – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This study assessed the effectiveness of humic substances in reducing the erodibility of a quarring waste material from pedra miracema mining. The quarring waste is highly erodible since it possesses a sandy texture, a clay content less than 10% and an organic content close to zero. The humic substance used in the experimental program was obtained from coal waste and it was incorporated to the tailing at the following contents: 0,5%, 1%, 3% and 5%. It was also used a commercial product at 1% content to evaluate the coal was performance. Erodibility was assessed through the use of degradation tests, Brazilian test and pinhole test. Additionally, in order to foster the discussions of the experimental program results, microscopy tests (both optical and electronic), cation exchange capacity and organic matter determinations were performed. The results have shown that the erodibility of the tailing can be reduced by the addition of humic substances. The higher the content the higher the reduction. It was also observed that the performance of humic substances in reducing erodibility increases with time.

## Keywords

Erosion; Humic; Substances; Erodibility; soil conditioners.

# Sumário

1 Introdução	20
1.1. Objetivo	25
1.2. Organização do trabalho	26
2 . Processos erosivos	28
2.1. Erodibilidade dos solos	30
2.2. Fatores que interferem na erodibilidade dos solos.	31
2.2.1. Composição química do meio	31
2.2.2. Textura e estrutura do solo	32
2.2.3. Presença de Cátions	34
2.2.4. Teor de matéria orgânica	35
2.2.5. Teor de umidade	35
2.3. Ensaio de laboratório para avaliação da erodibilidade	36
2.3.1. Ensaio “Crumb test”	36
2.3.2. Ensaio de desagregação	38
2.3.3. Metodologia MCT para avaliação indireta da erodibilidade	39
2.3.4. Ensaio de resistência à tração indireta	41
2.3.5. Ensaio furo de agulha – “Pinhole test”	42
2.3.6. Ensaio Inderbitzen	44
3 Substâncias Húmicas	46
3.1. Definição	46
3.2. Divisão das substâncias húmicas e origem	46
3.3. Aplicações das substâncias húmicas	50
3.4. Benefício das substâncias húmicas em relação à erosão	52
3.4.1. Complexos substância húmica – argila	55
4 Materiais e Métodos	58

4.1. Amostragem e caracterização geotécnica	58
4.1.1. Caracterização geotécnica	61
4.2. Análise mineralógica	62
4.3. Características das substâncias húmicas utilizadas e ensaios de laboratório para avaliar o potencial de erodibilidade do material de desmonte oriundo de mineração de pedra Miracema	63
4.3.1. Substância Húmica PUC-Rio	63
4.3.2. Substância húmica comercial	64
4.3.3. Ensaio de desagregação	66
4.3.4. Ensaios da metodologia MCT	72
4.3.5. Ensaio de compressão diametral	76
4.3.6. Ensaio furo de agulha – “Pinhole”	78
4.4. Ensaios complementares	83
4.4.1. Determinação da capacidade de troca catiônica	83
4.4.2. Determinação de matéria orgânica	83
4.4.3. Ensaios de microscopia	84
4.4.4. Ensaios microbiológicos	86
4.4.5. Limite de plasticidade	88
5 . Apresentação e Discussão dos Resultados	89
5.1. Caracterização Geotécnica	89
5.2. Caracterização Mineralógica	90
5.3. Ensaios de laboratório para avaliar a erodibilidade	93
5.3.1. Ensaio de desagregação	93
5.3.2. Ensaios de classificação da metodologia MCT	100
5.3.3. Ensaios de compressão diametral	103
5.3.4. Ensaios de furo de agulha – “Pinhole”	107
5.4. Ensaios complementares	113
5.4.1. Capacidade de troca catiônica	113
5.4.2. Determinação da matéria orgânica	114
5.4.3. Microscopia	118
5.4.4. Ensaios microbiológicos	127
5.4.5. Limite de plasticidade.	130

6 . Conclusões e Sugestões	131
6.1. Conclusões	131
6.2. Sugestões para trabalhos futuros	133
Referências Bibliográficas	135
Anexo 1.   Medições dos corpos de prova	148
Anexo 2 .   Lâminas observadas na microscopia ótica	166

## Lista de figuras

Figura 1.1 Processos Erosivos na área rural do Município de Santo Antônio de Pádua	23
Figura 1.2 Feições erosivas causadas pela extração de rocha ornamental no município de Santo Antônio de Pádua.	24
Figura 1.3 Extração de rocha ornamental no município de Santo Antônio de Pádua	24
Figura 1.4 Pilha de material de desmonte	25
Figura 2.1. Diagrama esquemático das forças que agem sobre as partículas na superfície do solo (Araujo, 2009).	29
Figura 2.2 Imagem de microscopia eletrônica do solo ALGB aumento de 407 x (Bastos 1999)	33
Figura 2.3. Imagem de microscopia eletrônica do solo ALGC aumento de 1292x (Bastos 1999)	33
Figura 2.4 Esquema do ensaio de compressão diametral	41
Figura 2.5. Esquema do equipamento Inderbitzen (adaptado de Bastos, 1999)	44
Figura 3.1 Mecanismos de formação das substancias húmicas do solo. (Adaptado de Sparks, 1995)	47
Figura 3.2 Estrutura-modelo para os ácidos húmicos (adaptado de Schulten e Schnitzer, 1993)	49
Figura 3.3 Modelo tridimensional para os ácidos húmicos evidenciando os átomos de carbono (em azul), hidrogênio (em branco), oxigênio (em vermelho), e nitrogênio (em azul escuro). As letras A, B, C representam os espaços vazios da estrutura (adaptado de Schulten e Schnitzer, 1997)	49
Figura 3.4. Modelo conceitual de Monnier (adaptado de Abiven et al., 2009)	55
Figura 4.1 Município de Santo Antônio de Pádua na região Noroeste do Estado do Rio de Janeiro. Fonte: Site oficial da Fundação Centro Estadual de Estatísticas, Pesquisas e Formação de Servidores Públicos (CEPERJ).	58
Figura 4.2 Amostragem do material a ser utilizado	59



Figura 4.3 Anel metálico preenchido com solo dentro da capsula	60
Figura 4.4 Balança portátil utilizada na medição de parâmetros no local da amostragem	60
Figura 4.5 Substância húmica precipitada	64
Figura 4.6 (a) Substância húmica comercial (b) Consistência das substancia húmica comercial	65
Figura 4.7 (a) Substância húmica, água e solo a ser misturados	66
Figura 4.8 Molde para realizar os corpos de prova cilíndricos	68
Figura 4.9 Prensa utilizada para realizar os corpos de prova cilíndricos	68
Figura 4.10 Corpos de prova armazenados	70
Figura 4.11 - Moldagem dos corpos de prova cúbicos	71
Figura 4.12 Corpos de prova prontos para ser ensaiados	72
Figura 4.13 Ilustração do ensaio de comportamento a imersão (Villibor e Nogami, 2009)	74
Figura 4.14 Exemplo de curva de deformabilidade do ensaio Mini MCV	75
Figura 4.15 Exemplo da curva de compactação correspondente a 12 golpes, para determinação do coeficiente $d'$	76
Figura 4.16 Ábaco classificatório MCT	77
Figura 4.17 Prensa utilizada para preparar os corpos de prova	78
Figura 4.18 Preparação e extração dos corpos de prova	78
Figura 4.19. Esquema do ensaio de compressão diametral	79
Figura 4.20 Procedimento de moldagem do corpo de prova	80
Figura 4.21 (a) Realização do furo no corpos de prova (b) Malha milimétrica colocada na montagem do ensaio	81
Figura 4.22 Cilindro de PVC preenchido pronto para realizar o ensaio	82
Figura 4.23 Montagem do ensaio	82
Figura 4.24 Microscópio ótico utilizado	86
Figura 4.25 Microscópio eletrônico de varredura utilizado	87
Figura 5.1 Curva de distribuição granulométrica do resíduo	89
Figura 5.2 Difratoograma do material de desmonte passante na peneira N° 200	91
Figura 5.3 Difratoograma do material de desmonte passante na peneira N° 400	91

Figura 5.4. Esquema de repetições do ensaio de desagregação.	94
Figura 5.5 (a)Corpo de prova após da armazenagem ainda com o papel filme (b) corpo de prova apresentado fungos na superfície do solo.	95
Figura 5.6 . Ensaio de desagregação com corpos de prova armazenados durante dois meses.	97
Figura 5.7. Ensaio de desagregação após 10 minutos de ter começado o ensaio corpos de prova com 2 meses de armazenamento	98
Figura 5.8. Ensaio de desagregação após 10 minutos de ter começado o ensaio corpos de prova com 5 meses de armazenamento.	99
Figura 5.9 Ensaio de desagregação após 10 minutos de ter começado o ensaio corpos de prova com 12 meses de armazenamento.	99
Figura 5.10 Classificação MCT	102
Figura 5.11. Esquema da repetição de um grupo de ensaios	104
Figura 5.12 Representação gráfica da resistência a tração dos diferentes corpos de prova	105
Figura 5.13 Capacidade de troca catiônica para corpos de prova em função de diferentes quantidades de substância húmica.	114
Figura 5.14 Teor de matéria orgânica no material de desmonte	115
Figura 5.15 Estrutura vertical do corpo de prova sem SH com armazenamento de dois meses, aumento 50x.	118
Figura 5.16 Estrutura horizontal do corpo de prova sem SH com dois meses de armazenamento, aumento 50x	119
Figura 5.17Estrutura vertical do corpo de prova com 5%SH PUC-Rio com dois meses de armazenamento, aumento 50x.	120
Figura 5.18 Estrutura horizontal do corpo de prova com 5%SH PUC-Rio com dois meses de armazenamento aumento 50x.	120
Figura 5.19 Estrutura vertical do corpo de prova com 5%SH PUC-Rio com cinco meses de armazenamento , aumento 50x	121
Figura 5.20 Estrutura horizontal do corpo de prova com 5%SH PUC-Rio com cinco meses de armazenamento , aumento 50x.	121

Figura 5.21 Estrutura vertical do corpo de prova com 5%SH PUC-Rio com um ano de armazenamento, aumento 50x.	12
Figura 5.22 Estrutura horizontal do corpo de prova com 5%SH PUC-Rio com um ano de armazenamento, aumento 50x.	122
Figura 5.23 Fitas adesivas do porta amostras do microscópio eletrônico de varredura que foram utilizadas no ensaio.	124
Figura 5.24 Imagem do material de desmonte com microscópio eletrônico de varredura com aumento de 1500x.	124
Figura 5.25 Imagem do material de desmonte com composto húmico utilizando microscópio de varredura eletrônica com aumento de 1500x	125
Figura 5.26 Contagem de microrganismos onde podem ser observadas colônias de fungos e bactérias	128
Figura 6.1 Equipamentos para avaliação de erodibilidade em escala piloto da Universidade de Missouri em Columbia.	133

## Lista de tabelas

Tabela 2.1– Escala de Erodibilidade em Solos segundo o Sistema Unificado de Classificação de Solos	29
Tabela 3.1- Composição das substâncias húmicas de diferentes lugares do mundo (adaptado de Dick et al., 2010)	46
Tabela 4.1- Características da substância húmica PUC-Rio	62
Tabela 4.2- Composição elementar da substância húmica PUC-R	62
Tabela 4.3- Composição elementar da substância húmica comercial	64
Tabela 4.4- Características dos corpos de prova	67
Tabela 5.1- Parâmetros do solo no local da amostragem	86
Tabela 5.2- Caracterização geotécnica	87
Tabela 5.3 - Minerais presentes no solo em forma de óxidos	90
Tabela 5.4- Porcentagem de cada elemento presente no solo	90
Tabela 5.5- Parâmetros dos corpos de prova do ensaio de desagregação.	92
Tabela 5.6- Composição química elementar das substâncias húmicas	94
Tabela 5.7- Coeficientes do solo com 2 meses de armazenamento	99
Tabela 5.8- Coeficientes do solo com 5 meses de armazenamento	99
Tabela 5.9- Coeficientes do solo com 12 meses de armazenamento	99
Tabela 5.10- Resumo da classificação do solo segundo a classificação da metodologia MCT	101
Tabela 5.11- Peso específico dos corpos de prova	102
Tabela 5.12- Teor de umidade dos corpos de prova	103
Tabela 5.13- Resistência à tração	106
Tabela 5.14- Peso específico	106
Tabela 5.15- Umidade dos corpos de prova	107
Tabela 5.16- Resultados dos corpos de prova armazenados durante 2 meses.	108
Tabela 5.17 - Resultados dos corpos de prova armazenados durante 5 meses.	109

Tabela 5.18- Resultados dos corpos de prova armazenados durante 12 meses.	111
Tabela 5.19- Valores de CTC do solo armazenado durante 2, 5 e 12 meses	113
Tabela 5.20- Teor de matéria orgânica no material de desmonte	114
Tabela 5.21- Composição elementar do material de desmonte	115
Tabela 5.22- Comparação do material de desmonte sem adição de compostos húmicos sem tempo de armazenamento e com 24 meses de armazenamento	123
Tabela 5.23- Elementos químicos presentes no material de desmonte sem composto húmico	125
Tabela 5.24- Elementos químicos presentes no material de desmonte com composto húmico	126
Tabela 5.25- Resultados do ensaio microbiológico mediante a técnica dos tubos múltiplos	127
Tabela 5.26- Resultados da contagem de colônias de microrganismos	128
Tabela 5.27- Valores do Limite de plasticidade de amostras com diferente quantidade de substância húmica	129

## Lista de símbolos

$\sigma_t$	Resistencia a tração
P	Carga máxima de compressão
H	Comprimento da amostra
H	Hidrogênio
O	Oxigênio
C	Carbono
N	Nitrogênio
SH	Substância húmica
w	Teor de umidade
Gs	Densidade dos grãos
$\gamma$	Peso específico
w <sub>L</sub>	Limite de liquidez
w <sub>P</sub>	Limite de plasticidade
MO	Matéria orgânica
TOC	Teor de carbono orgânico
HNO <sub>3</sub>	Ácido nítrico
NaOH	Hidróxido de sódio
P <sub>i</sub>	Perdida por imersão
Me	Massa seca de parte extraída do corpo de prova
Md	Massa seca desprendida
Fc	Fator de correção
e'	Coeficiente de laterização
c'	Coeficiente de deformabilidade
d'	Coeficiente de compactação
CTC	Capacidade de troca de cátions
V	Volume

Wa	Peso da amostra seca
Ct	caulinita
Q	quartzo
Ft	feldspato
I/M	Ilita / mica
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Oxido de ferro

# 1

## Introdução

O presente trabalho faz parte de um dos projetos da rede de pesquisa e desenvolvimento da “Rede Carvão”, que recebe o apoio financeiro da CAPES, CNPq e FINEP, que trabalha com o objetivo de dar suporte à cadeia produtiva do carvão mineral com vistas ao seu uso sustentável no Brasil. A contribuição deste trabalho no âmbito do projeto será proporcionar uma alternativa para a utilização de uma substância húmica proveniente de um rejeito da extração do carvão. Adicionalmente, o trabalho também faz parte do Projeto intitulado “Obtenção de substância húmica e suas aplicações no desenvolvimento sustentável e saneamento ambiental: tratamento de resíduos e recuperação de áreas degradadas”, apoiado pela FAPERJ dentro do edital “Prioridade Rio”, que busca minimizar o impacto ambiental gerado pela exploração de rochas ornamentais na Região Noroeste do Estado do Rio de Janeiro.

A presente pesquisa foi realizada de forma paralelo ao programa experimental realizado por Cosme (2013), que visou desenvolver tecnologias para a obtenção de ácidos húmicos a partir do rejeito de carvão mineral. No Brasil, o carvão é uma importante fonte geradora de energia, porém seu uso gera graves impactos ao meio ambiente. O impacto ambiental proveniente da extração de carvão pode incluir contaminação dos lençóis freáticos, alteração de corpos d’água, modificações no relevo e na paisagem, e processos erosivos. Na região sul de Santa Catarina apesar de ter ocorrido um impacto positivo no desenvolvimento econômico, os danos ambientais assumiram grandes proporções (Citadini-Zanette, 1999; Kopezhinski, 2000; Belolli, 2002; Martins, 2005).

Segundo Cosme (*op. cit.*), os problemas ambientais vêm sendo agravados ainda mais devido ao alto grau de impurezas do carvão catarinense, posto que para 100% de matéria prima bruta, há uma média de 25% de carvão aproveitável e 75%



de rejeito. Os rejeitos da mineração do carvão, são minerais ricos em sulfeto de ferro ( $\text{FeS}_2$ ) que oxidam-se em presença do ar, da água e da ação de bactérias *Thiobacillus ferrooxidans*, formando grandes quantidades de ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) desencadeando a acidificação de cursos d'água.

Com o aumento de sua exploração, são geradas elevadas quantidades de rejeito com elevado teor de enxofre (pirita) e metais pesados (Pb, Zn, Cu, e Si). A estocagem de rejeito a céu aberto causa drenagem ácida gerando acidificação do solo e aumento de cátions básicos e metais traços (Al, Fe, Pb entre outros) em sua solução. A toxicidade do meio acarreta em mortandade da flora existente e dificulta a recuperação da área degradada.

A recuperação de áreas degradadas por processos de mineração, agricultura e pecuária vem empregando técnicas de bioengenharia como relatam Guerra e Jorge (2013), Hooke (1988), Fullen e Catt (2004) e Fullen *et al.* (2011). Os autores sugerem que projetos que incorporem a revegetação auxiliam na fixação de matéria orgânica do solo enquanto que a área em questão se torna esteticamente mais atrativa e com uma maior biodiversidade.

Segundo Guerra e Jorge (*op. cit.*), novos materiais incluindo os geotêxteis com fibras vegetais têm mostrado resultados satisfatórios na recuperação de áreas degradadas, conservação de solos e, produção vegetal sustentável, além de uma boa relação custo benefício. Estes materiais utilizam-se do geotêxtil como uma manta antierosiva que é colocada sobre o solo, confeccionada por diversos materiais, e uma série de materiais biodegradáveis como, por exemplo, folhas de palmáceas (Leão *et al.*, 2012; Bezerra, 2011).

A proteção à erosão consiste essencialmente em diminuir as forças de tração ou de arrasto, para isso pode se utilizar diferentes soluções, como diminuir a velocidade do fluxo de água sobre a superfície ou aumentar a resistência do solo à erosão, através de proteção da superfície com uma cobertura adequada ou através do aumento da força de ligação entre as partículas na melhora da erodibilidade do solo.

Experimentos como os realizados por Coelho *et al.* (2001) reforçam esta afirmativa. Os autores realizaram ensaios simulando chuva em solos com vegetação e outro sem vegetação, e observaram que o solo com cobertura vegetal apresentou menor erodibilidade, pois a biomassa existente reduziu na perda de solo.

Visando o controle da erosão em taludes, Glazewski e Eymontt (2005) propuseram a implementação de métodos de bioengenharia de reforço em proteções de solo. A metodologia do processo desenvolvido por esses autores consiste na seleção das plantas mais apropriadas para o solo existente, na preparação do talude, e na composição da hidrossemeadura. O estudo contemplou testes de laboratório e experimentos de campo e os resultados da pesquisa sugerem que a revegetação de taludes por hidrossemeadura contribui de grande forma na redução do processo de erosão. Cabe ressaltar que dentro desta técnica muitas vezes é utilizada substância húmica para garantir melhores resultados, devido a que estes compostos estimulam a ação do sistema radicular (Couto et al. 2010).

A importância do controle dos processos erosivos também foi mencionada no trabalho de Guang Jin e Engle (2009) que avaliaram quantitativamente medidas de controle de erosão em uma área de um empreendimento residencial no Estado de Louisiana (EUA). Os autores sugerem o uso de mantas realizadas com fibras para controlar a erosão em encostas, sendo que a relação custo-benefício utilizando este material se vê favorecida.

O presente trabalho procura avaliar uma nova vertente para combater à erosão: a utilização de substâncias húmicas para combater as forças de arrasto causadas pela precipitação da chuva e para aumentar a resistência à tração do solo.

Os solos presentes nesta região apresentam uma elevada vulnerabilidade aos processos erosivos. A reduzida cobertura vegetal aliada à existência de práticas inadequadas de manejo de solo conduziram à região a uma situação bastante grave no que se refere à degradação ambiental conforme afirmam Carvalho *et al.* (2000). Verifica-se no Noroeste Fluminense a ocorrência de feições erosivas do tipo laminar, incluindo a presença de sulcos, ravinas e voçorocas como mostra a Figura 1.1.



Figura 1.1 Processos Erosivos na área rural do Município de Santo Antônio de Pádua

A degradação química do solo no Noroeste Fluminense foi causada, segundo Calderano (2005) pelo progressivo desmatamento da Mata Atlântica para implantação de lavouras de café, o que provocou com o tempo a perda da fertilidade natural.

Mais recentemente, a degradação vem sendo causada pelas atividades de pecuária, posto que o pisoteio de animais compacta o solo e dificulta a infiltração de água de chuva ocasionando um maior escoamento superficial e consequentemente erosão.

De acordo com Silva e Margueron (2002), a partir da década de 80, a atividade de mineração ganhou um forte impulso nas Cidades de Santo Antônio de Pádua e Miracema transformando-se na principal fonte de renda e empregos. A atividade de mineração na região se refere principalmente à exploração de rochas ornamentais que vem causando degradação adicional ao meio ambiente como as vistas na Figura 1.2.



Figura 1.2 Feições erosivas causadas pela extração de rocha ornamental no município de Santo Antônio de Pádua

De acordo com Medina *et al.* (2003), a rocha ornamental explorada na Região Noroeste Fluminense é um granulito milonitizado. As suas variedades locais são conhecidas como: *pedra olho de pombo* (a mais comum e comercializada), o *granito pinta rosa*, o *granito fino* na cor cinza, e a *pedra madeira*. Elas receberam a denominação comercial de “Pedra Miracema” e mais recentemente de “Pedra Paduana”. Em todos os casos a extração dos blocos é com maior frequência realizada em locais íngremes, como o ilustrado na Figura 1.3, onde são encontradas as maiores incidências de maciços fraturados.



Figura 1.3 Extração de rocha ornamental no município de Santo Antônio de Pádua



A extração de rocha ornamental causa uma intensa alteração do ambiente face à necessidade de remoção da capa de solo. O solo removido torna-se um material de desmonte oriundo de mineração e perde as suas características originais como a sua estrutura e o teor de matéria orgânica (Franco *et al.*, 1994; Williamson and Johnson, 1994; Carneiro *et al.*, 2008). O material de desmonte é geralmente disposto em pilhas como a ilustrada na Figura 1.4 e suscetível à erosão.



Figura 1.4 Pilha de material de desmonte

### 1.1. Objetivo

O objetivo do presente trabalho é avaliar a eficácia da incorporação de substâncias húmicas na redução da erodibilidade de um material de desmonte oriundo de mineração de *Pedra Miracema*.

A erodibilidade de um solo, isto é a sua susceptibilidade à erosão, depende de uma série de parâmetros incluindo a sua distribuição granulométrica, a sua composição química e mineralógica, a presença de matéria orgânica, e seu teor de umidade.

É importante salientar a importância do estudo da erodibilidade como fator que afeta diretamente os problemas relativos às áreas degradadas. Segundo, Sun *et al.* (2013), a degradação de uma área está diretamente correlacionada com o regime chuvoso e a erodibilidade do material presente em superfície.

Em geral o aumento da fração argila e do conteúdo de matéria orgânica de um solo reduz a sua erodibilidade, razão pela qual o presente trabalho optou pela incorporação de substâncias húmicas para minimizar os problemas de erosão existentes em Santo Antônio de Pádua.

Já existem no mercado algumas substâncias húmicas utilizadas no controle da erosão. De acordo com Brunetti *et al.* (2007) e Eyruguibel *et al.* (2008), os compostos húmicos ajudam no crescimento das plantas, aumentam a biodisponibilidade de nutrientes além de aumentar as forças de coesão das partículas muito finas do solo.

Em áreas degradadas as substâncias húmicas podem ser aplicadas em projetos de recuperação ambiental através de hidro-semeadura. Segundo Albaladejo *et al.* (2000) e Cerdà (2007) os compostos húmicos são ideais para o cultivo em taludes íngremes, bermas de estrada, para taludes de mineração e aterros sanitários.

Face à participação no Projeto Carvão, optou-se por realizar a avaliação empregando as substâncias húmicas obtidas a partir da destilação do carvão mineral de Santa Catarina obedecendo ao processo desenvolvido na PUC-Rio por Cosme (2013). Como controle dos experimentos, optou-se por empregar uma substância húmica comercial.

## **1.2. Organização do trabalho**

O capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica sobre erodibilidade de solos, dando ênfase na relação da composição química mineralógica nos processos erosivos além de estar-se apresentando uma revisão sobre ensaios de laboratório para avaliação indireta da erodibilidade.

No capítulo 3 apresenta-se uma revisão sobre substâncias húmicas, definição, classificação e aplicações dentro da área ambiental descrevendo a interação da substância húmica com o solo. O Capítulo apresenta também as características das substâncias húmicas utilizadas no presente trabalho.

O capítulo 4 trata dos materiais e métodos utilizados, descrevendo em detalhe o programa experimental realizado. O Capítulo inicia pelo processo de amostragem do material de desmonte, seguida de sua caracterização geotécnica, dos ensaios químicos e mineralógicos, dos ensaios de laboratório para avaliação da

erodibilidade dos solos, e finalmente os ensaios complementares que se referem aos ensaios de capacidade de troca catiônica, ensaios de determinação de teor de matéria orgânica, composição elementar da matéria orgânica do solo e microscopia ótica e eletrônica de varredura.

O capítulo 5 apresenta e discute os resultados obtidos no programa experimental tanto na avaliação indireta da erodibilidade como nos ensaios complementares para o entendimento do comportamento de agregação das partículas.

O capítulo 6 apresenta as conclusões e as sugestões para trabalhos futuros.

Os Anexos apresentam os dados referentes as medições realizadas nos corpos de prova dos ensaios da avaliação indireta da erodibilidade como também as imagens das lâminas delgadas preparadas com os corpos de prova com diferentes tempos de armazenamento e diferentes quantidades de substância húmica.

## 2. Processos erosivos

Os riscos de erosão dependem tanto das condições naturais quanto do uso do solo. Nas condições naturais os fatores preponderantes são o clima, a topografia, a cobertura vegetal e as características do solo. Com respeito ao uso do solo, qualquer atividade humana que exija a remoção da cobertura vegetal protetora pode promover a erosão (Araujo *et al.*, 2009).

Na erosão ocorre a deformação do terreno em grande ou pequeno porte, a água escoada pode causar a formação de ravinas (isto é, pequenos sulcos que ainda podem ser facilmente recuperados) e voçorocas (canais mais profundos causados pelo fluxo de água subterrânea, sendo difíceis de serem recuperados (Guerra *et al.*, 2003).

No solo pode ocorrer também uma deterioração química, que se refere à perda de nutrientes ou matéria orgânica, parte destes nutrientes também podem ter-se perdido através da erosão; já que, segundo Li *et al.* (2013), na ocorrência de chuvas intensas vários nutrientes são lavados especialmente em solos não protegidos.

De acordo com Araujo *et al.* (*op.cit.*), os processos geológicos e a exploração inadequada dos recursos naturais em diversas atividades mineradoras, agrícolas, pecuárias, industriais e obras de construção civil em geral contribuem do surgimento de áreas degradadas modificando as características originais do solo.

A erosão é um processo de desgaste e pode ser classificada quanto à origem em geológica e antrópica. A erosão geológica refere-se àquela oriunda da atividade geológica (água, vento e gelo) sobre a superfície terrestre, correspondendo a um processo natural, sem a interferência do homem e a erosão antrópica refere-se àquela oriunda da interferência do homem sobre o ambiente, intensificando a ação da água da chuva e/ou vento sobre o solo (Guerra *et al.*, 2003; Guerra & Jorge, 2013).

Os mecanismos de erosão consideram três processos fundamentais: desagregação, transporte e deposição das partículas do solo (Araujo *et al.*, 2009):



- 1) A desagregação ocorre devido ao impacto das gotas de chuva sobre a superfície do solo sem cobertura vegetal. A cobertura que pode ter sido retirada seja para o uso do solo em atividades como mineração ou criação de gado ou para alguns cultivos que degradam o solo, provocando o selamento superficial dos primeiros centímetros do solo, a redução da infiltração da água e o escoamento superficial.
- 2) Posteriormente a desagregação das partículas. O transporte das partículas ocorre devido ao escoamento superficial da água que não infiltrou no solo. Dependendo da intensidade de escoamento o arraste do solo pode ocorrer superficialmente no terreno (erosão laminar), em canais pouco a medianamente profundos, abertos pela força da enxurrada (erosão em sulcos), ou através de grandes sulcos, os quais concentram grande quantidade do fluxo de água subterrânea (erosão em voçorocas).
- 3) O processo de deposição consiste no armazenamento do solo erodido em rios, lagos, represas, açudes, terraços, que provoca diversos impactos ambientais.

As forças que agem sobre as partículas próximas à superfície no evento de escoamento superficial estão ilustradas esquematicamente na Figura 2.1. A Figura mostra que as forças que resistem às forças de arrasto ou de tração exercidas pela água (*i.e.*, à erosão) são as forças de inércia ou coesão entre as partículas.



Figura 2.1. Diagrama esquemático das forças que agem sobre as partículas na superfície do solo (Araujo, 2009).

Segundo Camapum de Carvalho *et al.* (2009), as forças de arrasto produzidas por água, vento ou gelo, são função da velocidade do fluxo, descargas produzidas no solo, forma e rugosidade dos grãos. Por outro lado, a erosão é contida por forças de atrito ou de coesão que estão em função das propriedades do solo, estrutura do solo e interações físico-químicas.

## 2.1. Erodibilidade dos solos

Segundo Fragassi (2001), a erodibilidade é uma característica do solo que está intimamente associada à desagregação e transporte das partículas de solo. Veiga (1988) indica que a erodibilidade de um solo como sendo a maior ou menor susceptibilidade destes erodirem em diferentes taxas, devido somente às diferenças em suas propriedades. Segundo Santos (1997), a resistência à erosão depende não só de características intrínsecas do solo mas também de fatores, como ciclo de secagem e umedecimento e da composição química da água presente nos poros.

Diversos autores como Vargas (1977), Fácio (1991) e Santos (1997), afirmaram serem os solos mais erodíveis aqueles que apresentam um comportamento granular, com partículas da ordem de areia fina ou silte e pouca quantidade de argila.

De acordo com Vargas (*op. cit.*), a erodibilidade para os solos arenosos é tanto maior quanto mais uniforme for sua granulometria e para os solos argilosos, o fenômeno complica-se, intervindo a estrutura, o teor de umidade, o grau de saturação e a expansibilidade do solo. A resistência à erosão das argilas é grande nas argilas saturadas e pequena nas argilas não saturadas ou ressecadas. Segundo Fácio (*op. cit.*), um efeito adicional que reduz a resistência à erosão é a saturação acompanhada de expansão de solos argilosos, que durante o processo, perdem em grande parte a sua coesão.

Vargas (*op. cit.*) também menciona que em solos argilosos os esforço de tração diminui com o aumento na adsorção de sódio, concordando com o fato do sódio adsorvido aumentar a camada de água adsorvida e, conseqüentemente, diminuir a força trativa entre as partículas, tornando possível que elas se separem da matriz.

Qian *et al.* (2002), apresenta uma relação da erodibilidade do solo em função da sua classificação conforme mostra a tabela 2.1.

Tabela 2.1– Escala de Erodibilidade em Solos segundo o Sistema Unificado de Classificação de Solos (adaptado de Qian *et al.*, *op. cit.*)

<b>Mais erodível</b> <b>(Em ordem decrescente)</b>		<b>Menos erodível</b> <b>(Em ordem decrescente)</b>
Silte		Argila pouco plástica
Areia Siltosa	>>	Argila de alta plasticidade
Areia Mal graduada		Pedregulho siltoso
Areia bem graduada		Pedregulho mal graduado
Areia argilosa		Pedregulho bem graduado

## 2.2.

### Fatores que interferem na erodibilidade dos solos.

#### 2.2.1.

##### Composição química do meio

A erosão do solo está diretamente relacionada com o a composição química mineralógica do solo e a composição química do meio em que se encontra, por esse motivo é importante destacar a relação direta da erosão com mudanças químicas do meio como as que ocorrem provenientes do escoamento superficial e/ou infiltração das águas de diversas origens, como por exemplo, águas provenientes de esgoto ou industriais que tem características que podem influir na erodibilidade do solo (Camapum de Carvalho *et al.*, 2009).

Em relação à dispersão do solo, Camapum de Carvalho *et al.* (1987) apontam que ela pode ser influenciada pelo tipo de líquido percolante. Os mesmos autores afirmam que líquidos com pH ácido são capazes de agir sobre o óxido de ferro, material que atua como cimento nos solos lateríticos, tornando o solo com comportamento dispersivo.

Com o objetivo de demonstrar a influência do líquido percolante como fator importante no comportamento do solo, Nogueira (2005) analisou, a partir de blocos de amostras indeformadas e da utilização de um modelo físico de laboratório, a

alteração das propriedades e do comportamento do solo ao ser submetido a fluxo capilar de três tipos de fluido: água, solução de NaCl na diluição 1:10 em água destilada e solução de cal hidratada. Os resultados obtidos mostraram alterações físico-químicas e de comportamento mecânico no solo estudado.

### 2.2.2.

#### Textura e estrutura do solo

A estrutura do solo está composta por o arranjo de partículas e o sistema de forças entre elas, que refletem todas as facetas da composição do solo, do passado, do estado atual e ambiental dele. (Mitchell, 1993).

A textura do solo pode ser um indicativo na erodibilidade de um solo, as partículas finas de silte e argila são leves e uma vez que a força da água vence a coesão atribuída pela composição química destas elas são deslocadas (Camapum de Carvalho *et al.* (*op. cit.*)). Já as partículas maiores, como areia grossa, pedregulho e matações tendem a se acumular sobre a superfície devido a que a massa delas é responsável pela maior ou menor força de atrito que resiste ao processo erosivo.

Ainda quanto à textura, os solos com teores consideráveis de silte geralmente concorrem para uma elevada erodibilidade. Essa característica associa-se a solos residuais jovens segundo mencionam Camapum de Carvalho *et al.* (2009).

As argilas como partículas isoladas se organizam em estruturas floculadas e em estruturas orientadas ou dispersas (Santos, 1975). A floclada resulta de interações face-bordo combinando cargas negativas com positivas, o que lhes confere coesão e maior resistência à erosão. Nas argilas de estruturas orientadas, predominam interações face-face e bordo-bordo e, portanto, interações de cargas semelhantes, contribuindo para a atuação de forças repulsivas. Essas estruturas, no entanto, são comuns em regiões tropicais e nos solos residuais jovens conforme sugere Camapum de Carvalho (*op. cit.*)

De acordo com Guerra *et al.* (2010), os solos siltosos e arenosos normalmente apresentam estruturas simples ou alveolares, estruturas menos favoráveis à erosão.

Bastos (1999) realizou uma análise microestrutural de solos lateríticos e saprolíticos através de microscopia eletrônica para avaliar a agregabilidade das partículas de solo. As imagens obtidas de agregados naturais dos solos permitiram observar algumas características microestruturais destes materiais.

Segundo Bastos (1999), o solo da Figura 2.2 denominado pelo autor como ALGB mostra o padrão microestrutural típico dos solos lateríticos, que apresentam melhor comportamento a erosão, com agregações de partículas argilosas e presença de óxidos de ferro, com a formação de macroporos.

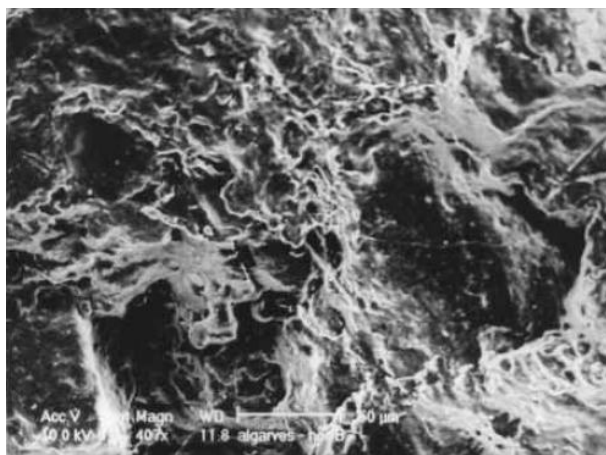


Figura 2.2 Imagem de microscopia eletrônica do solo ALGB aumento de 407 x (Bastos 1999)

Por outro lado, a imagem do solo saprolítico vista na Figura 2.3 e denominado pelo autor como ALGC mostra uma estrutura onde é marcante a presença de partículas de mica laminar em arranjo de pacotes. Estes arranjos dispostos caoticamente determinam à estrutura um aspecto de fragilidade figurado como um “castelo de cartas”, esta suposta fragilidade é confirmada por testes físicos em agregados deste solo conduzidos por Bastos (*op. cit.*).



Figura 2.3. Imagem de microscopia eletrônica do solo ALGC aumento de 1292x (Bastos 1999)

Segundo Portocarrero (2009), a resistência à erosão depende da natureza do cimento formado entre os agregados. A aderência das partículas é provocado por substâncias que têm a propriedade de ligar as partículas umas às outras. Dentro deste conjunto de substâncias estão a matéria orgânica e as substâncias minerais, como óxidos de ferro e os argilominerais que atuam no solo conferindo-lhe maior agregação e maior estabilidade estrutural, tornando-o menos erodível (Lepsch, 2002).

Ávila *et al.* (2010) realizaram ensaios de avaliação direta e indireta da erodibilidade de alguns solos, e mencionam a importância do agente cimentante relacionando a elevada erodibilidade de um solo estudado com a fragilidade do agente cimentante das partículas.

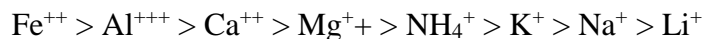
### **2.2.3. Presença de Cátions**

Existem opiniões diversas sobre o papel dos cátions na contribuição da melhor forma na agregação das partículas contribuindo na diminuição de erodibilidade do solo. Em um estudo sobre fatores físicos e químicos relacionados com a agregação de um latossolo roxo distrófico Roth *et al.* (apud Portocarrero, 2009) destacaram a importância do teor de Al e Ca trocável. De acordo com Oades (1984), os cátions normalmente considerados na agregação dos solos são: Ca, Mg, Al e Fe apesar da ocorrência de outros em menores quantidades como Mn, Zn e Cu. Para Silva e Mielniesuk (1998) os óxidos de ferro e manganês são agentes cimentantes de elevada importância na estabilização de agregados de solos.

Ressaltando a importância dos agentes cimentantes, Lima (2003) na análise de solos próximos aos taludes de voçorocas verificou o comportamento mecânico destes solos através de ensaios de cisalhamento direto, relacionando os parâmetros de resistência com o comportamento do solo em relação a erosão. Os ensaios de cisalhamento direto apresentaram valores elevados de ângulo de atrito e de coesão em solos onde se esperava valores menores por conta da porosidade e mineralogia, o autor atribuiu estes resultados a ação dos agentes cimentantes do solo.

Tomé Jr. (1997) reforça o papel do cátion H, considerando que a ponte deste cátion participa ativamente na agregação das partículas de solo. Segundo Fácio (1991), os tipos de cátions existentes em um solo podem influenciar em suas

características físico-químicas e mineralógicas. De acordo com o autor, as propriedades influenciadas incluem a floculação e a plasticidade. O autor cita ainda que o poder de floculação dos cátions está categorizado da seguinte maneira:



#### 2.2.4.

#### Teor de matéria orgânica

Um dos principais agentes envolvidos na erosão é o teor de matéria orgânica. Os óxidos de ferro, óxidos de alumínio (amorfo) e a matéria orgânica exercem influência marcante na formação de microagregados (principalmente em solos ricos nestes óxidos). Segundo Barreto (1986), o mecanismo de combinação de óxidos de ferro e alumínio com a matéria orgânica e argilominerais para formação de microagregados pode ser expresso conforme mostrado na equação 2.1.

$$\text{MA} = \text{A} - \text{MP} - \text{MO} \quad (2.1)$$

Onde :

“MA” é o microagregado formado a partir de

“A” é o mineral de argila

“MP” é o metal polivalente que geralmente são óxidos de ferro ou alumínio amorfo

“MO” é matéria orgânica.

Autores como Wendling *et al.* (2005), Bastos *et al.* (2005), Ronquim (2010) e Borgues (2013) ressaltam a importância dada ao teor de matéria orgânica no solo em relação à sua erodibilidade.

Adicionalmente, conforme mencionam Haynes e Francis (1993), os processos microbiológicos na matéria orgânica que ocorrem na matriz do solo podem produzir substâncias que auxiliem na agregação das partículas no solo.

#### 2.2.5.

#### Teor de umidade

Um parâmetro importante ante a erodibilidade do solo é o teor de umidade a que ele se encontra. De acordo como Mortari (1994), no Distrito Federal nas áreas afetadas por processos de voçorocamento, as tensões de sucção têm um efeito importante na resistência dos solos não saturados e as frentes de saturação geram,

nesses solos, redução significativa da resistência, resultando em processos de instabilização de taludes das ravinas e voçorocas.

Visando a analisar este efeito, Ávila *et al.* (2010) realizaram uma avaliação qualitativa da erodibilidade analisando o comportamento de amostras indeformadas frente à ascensão capilar. Os resultados do estudo mostraram que a presença de matéria orgânica, raízes e óxido de ferro tendem a estabilizar os agregados. Os autores também concluíram que os teores de umidade, tanto do solo quanto da rocha sedimentar estudada, são decisivos para o comportamento do material frente à ação erosiva da água. Em períodos de estiagem, as camadas expostas perdem umidade para atmosfera, sendo facilmente erodidas em um evento de chuva torrencial.

No estudo do processo evolutivo de algumas voçorocas realizado por Lima (2003), o autor afirma o teor de umidade exerce uma influência marcante no processo de erosão, baseado tanto na avaliação dos processos erosivos em campo em períodos de chuva e estiagem e em ensaios de laboratório em solos em condições saturadas e não saturadas.

### **2.3.**

#### **Ensaio de laboratório para avaliação da erodibilidade**

Os ensaios para a avaliação da erodibilidade de um solo em sua maioria realizam uma avaliação indireta com exceção do ensaio Inderbitzen e o ensaio Furo de agulha.

#### **2.3.1.**

##### **Ensaio “Crumb test”**

O ensaio “Crumb test” ou ensaio do torrão normalmente é realizado na avaliação da dispersibilidade de solos argilosos. O referido ensaio está regido pela norma NBR 13601/1996 e consiste em visualizar o comportamento do solo imerso em água destilada e classificar ele segundo o grau de dispersibilidade. O grau 1 é o solo não dispersivo, o grau 2 corresponde ao comportamento quase dispersivo, grau 3 ao comportamento moderadamente dispersivo e o grau 4 corresponde ao comportamento fortemente dispersivo.



Este ensaio pode ser realizado a partir de amostras indeformadas ou corpos de prova compactados, talhando três torrões de formato aproximadamente esférico, com diâmetro compreendido entre 6mm e 10 mm.. Os torrões são colocados em três diferentes beakers e observado o comportamento deles.

Por outra parte, o ensaio pode ser realizado também em solução de hidróxido de Sódio (0,001 normal) obtida a partir da dissolução de 0,04 g de hidróxido de sódio anidro em 1000mL de água destilada. Porém os autores Sherard, *et al.*(1976) sugerem que esta condição pode contribuir na dispersão do solo.

Segundo a norma NBR 13601/1996, este ensaio é recomendado somente para investigações preliminares, para comprovações mais conclusivas a norma recomenda o ensaio sedimentométrico comparativo, ensaios químicos da água intersticial ou o ensaio de furo de agulha (pinhole).

Segundo Ramidam (2003) que realizou um estudo de um processo de voçorocamento, este ensaio não apresentou uma boa correlação com os outros ensaios realizados na avaliação da erodibilidade e as observações em campo. Bastos (2004) também utilizou o ensaio como uma ferramenta na avaliação inicial de solos alternativos para pavimentação econômica.

Outras variações do ensaio “*crumb tests*” foram propostas. Entre as mais conhecidas, encontra-se a desenvolvida por Pham *et al.* (2008). Os autores desenvolveram um ensaio denominado “*enhanced crumb test*” que da mesma forma que o ensaio de desagregação tenta avaliar a agregação das partículas de solo (ou estabilidade dos agregados). Esse ensaio utiliza corpos de prova confeccionados em um molde cilíndrico padrão de 1,5 cm de diâmetro e 2 cm de altura e um teor de umidade ótimo.

A escolha do meio líquido onde as amostras de solo são submersas é importante já que existe uma interação com o meio, a argila e a matéria orgânica, que pode interferir nos resultados.

É importante padronizar os ensaios de maneira de manter as mesmas características do meio em todos os ensaios. Alterar a solução em que o solo está imerso pode ter um efeito significativo sobre os resultados conforme sugere Maharaj (2011).

### 2.3.2. Ensaio de desagregação

O ensaio de desagregação evoluiu do ensaio chamado “*crumb test*”, ensaio realizado para a identificação de solos dispersivos através da imersão de agregados de solo em água (Fonseca, 1981; Bastos, 1999). Entretanto, o objetivo maior deste ensaio é a verificação da desagregação das partículas de uma amostra de solo cúbica ou cilíndrica, independentemente da dispersão do material.

No ensaio de desagregação a avaliação da erodibilidade é feita a partir da observação do comportamento do material terroso imerso em água. A literatura apresenta duas metodologias para o ensaio de desagregação. Na primeira metodologia colocam-se os corpos de prova cúbicos parcialmente submersos com nível da água equivalente a  $\frac{1}{3}$  de sua altura em um recipiente e aumenta-se progressivamente a altura de água até que os corpos de prova fiquem totalmente submersos (Bastos, 1999; Ramidan, 2003; Brant, 2005). Uma segunda metodologia sugere colocar os corpos de prova imersos totalmente em um recipiente desde o princípio e observar o que ocorre *a posteriori* (Araújo, 2000). A metodologia deste ensaio utilizada no presente trabalho está descrita no capítulo 4.

O tamanho dos corpos de prova normalmente empregados situam-se entre 5 e 6 cm de aresta. Alguns autores, incluindo Araújo (2000) realizaram o ensaio com corpos de prova com 6 cm de aresta enquanto outros, incluindo Ramidan (2003), empregou corpos de prova com 5 cm de aresta.

Segundo Ferreira, *apud* Bastos (1999), a aplicação do ensaio de desagregação para fins geotécnicos foi idealizado pela engenheira Anna Margarida Fonseca ao estudar solos para projetos de fundação de edificações durante a construção de Brasília.

Bastos (1999) ainda menciona que na pesquisa IPR/COPPE/TRAFECON (1975-1978) o ensaio de desagregação foi indicado como critério qualitativo na investigação da erodibilidade de solos em taludes de estradas. O ensaio proposto consistia em colocar amostras indeformadas de forma cúbica com cerca de 6 cm de aresta em um recipiente com água de tal forma que ficassem submersas  $\frac{1}{3}$  de sua altura. No decorrer do ensaio são determinados o: a) tempo de aparente saturação das amostras, b) o tempo de início de sua fissuração e c) o tempo para desagregação total ou parcial.

Um outro estudo que empregou ensaios de desagregação para estudar o comportamento de solos oriundos de Goiânia foi realizado por Santos (1997). O autor interpretou os resultados dos ensaios aplicando a abordagem proposta por Holmgren e Flanagan (1977) para o *crumb test*. O autor identificou como principal mecanismo observado no decorrer do teste o desmoronamento provocado pelo processo de saturação das amostras, que anula a sucção matricial e gera poropressão positiva capaz de desestruturar o solo.

Autores como Rego (1978), Ferreira (1981), Santos (1997), Araújo (2000) e Ramidan (2003) afirmam que como indicador da erodibilidade dos solos, o ensaio de desagregação pode ser considerado bastante representativo. Os autores observaram uma boa correlação entre os resultados obtidos no ensaio de desagregação e as situações ocorridas em campo.

### **2.3.3.**

#### **Metodologia MCT para avaliação indireta da erodibilidade**

A classificação geotécnica MCT foi assim denominada pelo fato de se utilizar “corpos de prova Miniatura, Compactados e constituídos de solos Tropicais”. Segundo os autores, Villibor e Nogami (1981), a metodologia é baseada na determinação de algumas propriedades de natureza mecânica e hidráulica em corpos de prova com 50mm de diâmetro e 50 cm de altura. É apropriada apenas para materiais de granulação fina, ou seja, solos que passam na peneira de 2,0 mm.

A metodologia MCT envolve uma série de ensaios listados incluindo:

M1 - Ensaio de Compactação Mini-Proctor

M2 - Ensaio Mini-CBR e Expansão

M3 - Ensaio de Contração

M4 - Ensaio de Infiltrabilidade e Permeabilidade

M5 - Ensaio de Compactação mini-MCV

M6 - Ensaio de Penetração e Imprimadura Betuminosa

M7 - Ensaio Mini-CBR de Campo – Procedimento Dinâmico

M8- Ensaio de perda de massa por imersão

M9 -Classificação geotécnica MCT

Inicialmente estes ensaios foram utilizados com fins rodoviários, mas atualmente alguns dos seus ensaios auxiliam na determinação da erosão, principalmente o ensaio de compactação mini MCV e o ensaio de perda de massa por imersão. Estes ensaios possibilitam a classificação do solo dentro desta metodologia e estão descritos em detalhe no capítulo 4.

Pela classificação da metodologia MCT os solos tropicais podem ser catalogados como lateríticos ou não lateríticos, Considerando a diferença de comportamento desses dois tipos de solo quanto à erosão, a parte laterítica é mais resistente, em quanto a não laterítica é muito susceptível a ela.

Diferentes autores, entre eles Bastos (1999), Araújo (2000), Ramidam (2003), destacaram o potencial da Metodologia MCT na avaliação indireta da erodibilidade.

Segundo Bastos (1999) a avaliação indireta da erodibilidade deve iniciar pelo ensaio de desagregação, seguido da caracterização geotécnica convencional, dos ensaios que compõe a metodologia MCT e finalizando com o ensaio de resistência ao cisalhamento.

Ávila *et al.* (2010) afirmam que ensaios de desagregação e ensaios de infiltração e perda por imersão da metodologia MCT são métodos indiretos que fornecem bons resultados para avaliação da erodibilidade. Estes ensaios são simples, de baixo custo e podem ser utilizados para uma avaliação prévia do comportamento dos materiais frente à erosão hídrica.

Ao realizarem uma comparação entre os resultados da metodologia MCT em relação à erodibilidade com os demais ensaios propostos para avaliação da erodibilidade, Araújo (2000) e Ramidam (2003) também destacam o potencial da Metodologia MCT na avaliação indireta da erodibilidade.

Porém, há uma série de autores que discordam da opinião dos recém-mencionados. Burgos *et al.* (1999), por exemplo, sugerem que utilizar a classificação MCT de um solo, isoladamente, não é indicativo de sua erodibilidade. Segundo eles, a metodologia MCT apenas diferencia um solo laterítico de um não laterítico.

Na mesma linha Lima (1999), percebeu discrepâncias nos resultados da metodologia MCT quando os comparou com os resultados do ensaio de Interbitzen, realizando o estudo do processo evolutivo do processo evolutivo de voçorocas na área urbana de Manaus.

#### 2.3.4. Ensaio de resistência à tração indireta

O ensaio de compressão diametral consiste na aplicação de cargas de compressão em duas posições diametralmente opostas sobre um corpo de prova cilíndrico como pode ser observado na Figura 2.4. Este ensaio também foi empregado no programa experimental de Ramadan (2003) e Araújo (2002) e demonstrou uma boa relação entre os solos com maior erodibilidade e os que apresentaram uma menor resistência à tração.

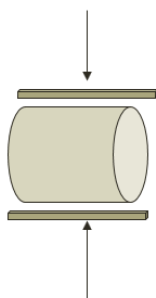


Figura 2.4 Esquema do ensaio de compressão diametral

O ensaio de compressão diametral permite obter a resistência de tração indireta que está dada pela equação:

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi h D} \quad (2.2)$$

onde P é a carga máxima de compressão, h é o comprimento da amostra e D é o seu diâmetro.

Maciel (1991) e Araújo (2000) sugerem que esta relação “não é rigorosamente adequada para materiais que apresentam diferentes módulos de elasticidade na compressão e na tração, como é o caso de materiais terrosos”.

O valor da resistência a tração do solo é muito baixo se comparado com a resistência a compressão ou ao cisalhamento, por este motivo pouca atenção tem se dado ao estudo dos mecanismos que controlam o comportamento de um solo em relação ao esforço de tração (Araujo, 2000; Villar *et al.*, 2007) .

A resistência à tração de solos e rochas vem sendo determinada pelo ensaio de resistência a tração indireta, denominado ensaio de compressão diametral ou *ensaio brasileiro*, que é normatizado pela ASTM D 3967-95a. Este ensaio foi desenvolvido inicialmente para avaliar a resistência à tração de concreto e só mais tarde o mesmo equipamento foi usado em rochas e solos cimentados ou compactados (Clough *et al.*, 1981; Maciel, 1991; Dass *et al.*, 1993; Araújo, 2000).

O ensaio consiste no carregamento de amostras cilíndricas colocadas entre duas placas rígidas paralelas, uma oposta à outra, no sentido do seu diâmetro. A ruptura é atingida ao longo do plano vertical diametral.

Segundo Villar *et al.* (*op cit*), o ensaio apresenta diversas vantagens, incluindo a facilidade na preparação dos corpos de prova e a utilização de um equipamento presente em grande parte dos laboratório de engenharia civil, a prensa de compressão simples.

A resistência à tração dos solos é influenciada pelo teor da fração argila presente no solo, da mesma forma que pelo tipo de argilomineral presente. Alguns autores, incluindo Dexter e Kroesbergen (1985) e Cusarano (1993), fazem referência a importância da estabilidade de agregados como indicativo da agregação das partículas posto que um solo propenso a dispersão terá uma baixa estabilidade de agregados, em outras palavras haverá pouca agregação nas partículas do solo.

Por outro lado, conforme mencionam Barzegar *et al.* (1995) e Rahimi *et al.* (2000), a resistência à tração também está relacionada com a concentração e a composição do fluido presente no solo, e com o teor de matéria orgânica no solo.

O ensaio de resistência a tração ou compressão diametral foi também utilizado por Villar *et al.* (2007) para determinar a relação entre a resistência a tração de um solo e a sua sucção. Os autores sugerem que a resistência à tração dos solos é derivada das ligações entre os agregados e ligações internas à estes agregados.

#### **2.3.5.** **Ensaio furo de agulha – “Pinhole test”**

Tradicionalmente o ensaio furo de agulha, ou *pinhole*, é utilizado com o interesse de identificar a dispersibilidade dos solos para obras de engenharia como barragens e canais de irrigação. No entanto, é possível verificar na literatura que o

ensaio furo de agulha também vem sendo empregado nas últimas décadas para avaliar a susceptibilidade de erosão sub superficial, conforme atestam os trabalhos de Botschek *et al.* (2002) e Ávila *et al.* (2010)

Morais *et al.* (2004), ao realizar a avaliação de erosão subsuperficial através de ensaios de furo de agulha, sugere que os solo saprolíticos mais susceptíveis à erosão por *piping* sejam os de textura siltosa pobres em minerais agregadores (*i.e.*, argilominerais). Esta hipótese é compartilhada por Umesh *et al.* (2011), que no referido trabalho mencionam os problemas associados a estabilidade de encostas e de estruturas de contenção em maciços que contém este tipo de solo.

Os referidos autores também refletem sobre a importância da identificação de dispersibilidade de um solo através do ensaio de furo de agulha. Para eles este ensaio apresenta uma grande utilidade posto que os ensaios de caracterização geotécnica convencionais não fornecem informações suficientes para diferenciar entre argilas dispersivas e argilas resistentes a erosão comum.

Umesh *et al.* (op. cit.) ainda indicam a utilização do ensaio de compressão simples como um indicador de dispersibilidade de solo. Em seu trabalho, os autores apresentam boas correlações entre a resistência à compressão simples e os resultados do ensaio de furo de agulha.

Por outro lado, há registros na literatura que o ensaio de furo de agulha deve ser tratado apenas como um mero indicador qualitativo da erodibilidade de um solo nos trabalhos apresentados por Acciardi (1982) e Jeremy e Walker (1999), citados em Nadal Romero *et al.* (2011). No entanto os últimos autores discordaram em parte dos argumentos apresentados por Acciardi e por Jeremy e Walker. Segundo eles, os resultados do ensaio de furo de agulha devem ser encarados como semi-qualitativos por considerarem fatores como vazão, turbidez do efluente e tamanho do furo após o ensaio.

Nadal Romero *et al.* (op. cit.) recomendam a utilização deste ensaio por tratar-se de um ensaio de simples execução, rápido, utilizar de uma pequena quantidade de solo para ser executado e apresentar baixo custo.

O procedimento detalhado deste ensaio está descrito no capítulo 4.

### 2.3.6. Ensaio Inderbitzen

Originalmente proposto por Inderbitzen (1961), o ensaio é realizado na avaliação direta da erodibilidade através de um fluxo de água superficial. O equipamento consiste em uma rampa dotada de um orifício central, onde é introduzido um anel metálico contendo uma amostra de solo, instalado de uma forma em que a superfície do solo coincida com o fundo da rampa.

A rampa permite a variação de sua inclinação e o solo erodido é coletado através de peneiras colocadas na parte superior de um recipiente que recebe a água no final da rampa, como pode ser observado na Figura 2.5 que mostra o esquema o equipamento utilizado por Bastos (1999).

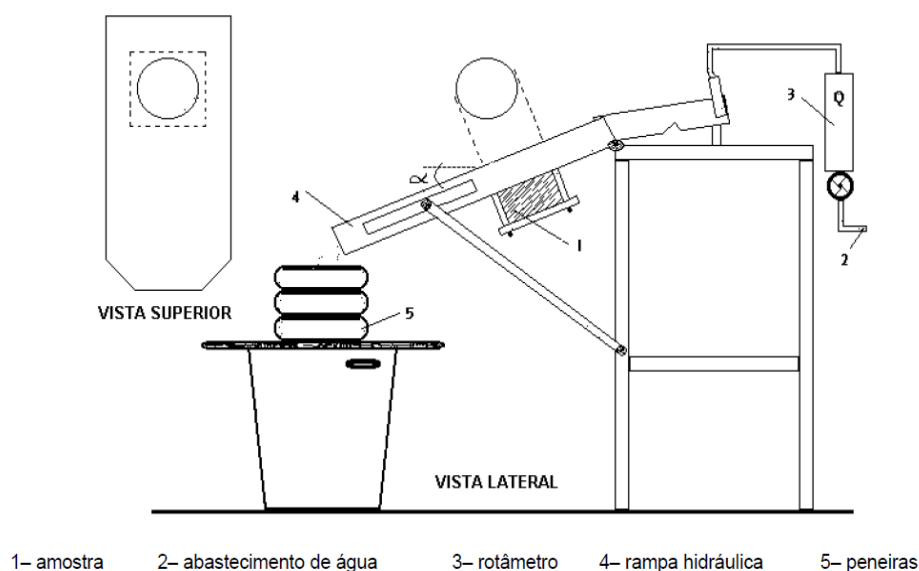


Figura 2.5. Esquema do equipamento Inderbitzen (adaptado de Bastos, 1999)

O ensaio Inderbitzen realiza uma simulação do escoamento superficial sobre a rampa, permitindo observar e comparar o processo erosivo em uma amostra de solo. Determinando a quantidade de solo erodido em uma determinada área de solo. Segundo Bastos (*op. cit.*) resultados são expressos como gráficos de perda de solo em relação ao tempo.

Diferentes autores recomendam o uso do equipamento na determinação da erodibilidade dos solos entre eles Fonseca (1981), Ferreira (1981), Fácio (1991) e Santos (1997). Uma das vantagens do ensaio é a possibilidade de determinar a erodibilidade em solos com diferentes teores de umidade (Bastos, 1999; Chamecki



e Silva, 2003). O ensaio também permite o emprego de amostras indeformadas conforme relatam Lemos *et al.* (2007).

### **3**

## **Substâncias Húmicas**

### **3.1.**

#### **Definição**

Segundo Sparks (1995), da mesma forma que os componentes inorgânicos do solo, a matéria orgânica presente participa ativamente de seus processos químicos. Diversos autores, incluindo Lepsch (2002) e Stevenson (1994), descrevem as substâncias húmicas como sendo uma categoria de materiais encontrada em solos, sedimentos e águas naturais, oriundas da decomposição de resíduos vegetais e animais.

No processo de decomposição da matéria orgânica no solo duas frações principais podem ser distinguidas em função de sua complexidade conforme explicado por Stevenson (1994) e Sparks (1995):

- 1) As substâncias não húmicas que são compostas por substâncias orgânicas de estruturas simples, forma molecular e características conhecidas. Essas substâncias são facilmente descompostas no solo e seu tempo de permanência no meio é da ordem de dias ou alguns meses.
- 2) A fração das substâncias húmicas, que não apresenta fórmula molecular definida, contém os principais grupos funcionais de carbono e comporta-se como compostos macromoleculares. Esta fração apresenta um tempo de residência nos solos de centenas de anos.

### **3.2.**

#### **Divisão das substâncias húmicas e origem**

Segundo Stevenson (1994), as substâncias húmicas usualmente são separadas em três frações, segundo sua solubilidade na água: ácido húmico, ácido fúlvico e huminas.

- 1) Ácido Húmico - Fração solúvel em água com pH neutro ou alcalino.

2) Ácido Fúlvico - Fração que se mantém solúvel em água independente do pH.

3)- Humina - Fração insolúvel em água. Trata-se de moléculas de difícil degradação e que apresentam uma forte interação com os componentes inorgânicos.

No que se refere a origem das substâncias húmicas do solo, Sparks (1995) faz referência a quatro mecanismos de formação através da degradação química e biológica de resíduos orgânicos como pode ser observado na Figura 3.1.



Figura 3.1 Mecanismos de formação das substâncias húmicas do solo. (Adaptado de Sparks, 1995)

A teoria clássica de formação das substâncias húmicas, também chamada teoria das ligninas modificadas está representada pelo mecanismo (4) da Figura 3.1. Nesta teoria, as substâncias húmicas são formadas pelo ataque de microrganismos que degradam as ligninas. No mecanismo (2), os polifenóis resultam da degradação microbiológica, seguida de uma oxidação enzimática que gera quinonas que posteriormente se transformam em substâncias húmicas. O mecanismo (3), por sua vez, é parecido com o mecanismo (2) onde microrganismos geram produtos da decomposição da lignina que posteriormente passam a ser quinonas e posteriormente substâncias húmicas. Já o mecanismo (1) considera a formação das substâncias húmicas a partir de açúcares.

Sparks (1995) e Stevenson (1994) afirmam que os quatro mecanismos interferem em maior ou menor grau na formação das substâncias húmicas do solo já que este processo depende das condições climáticas do lugar.

Dentro das substâncias húmicas, o ácido húmico e o ácido fúlvico são os mais estudados. Uma vez que as substâncias húmicas não apresentam fórmula molecular definida, as razões atômicas H/C e O/C são índices úteis para a avaliação e comparação de sua composição química. Para caracterizar os ácidos húmicos, ácidos fúlvicos e huminas realiza-se a degradação da estrutura em compostos elementares (Stevenson, 1994).

Dick *et al.* (2010) apresenta características da composição elementar de solos de diferentes lugares do mundo, além das relações C/N, H/C, O/C. Estes valores estão mostrados na Tabela 3.1. Dentro destas características podemos observar que o teor de carbono é maior nas huminas do que nas outras frações. Por outro lado, o valor de nitrogênio é mais elevado nos ácidos húmicos.

Tabela 3.1- Composição das substâncias húmicas de diferentes lugares do mundo (adaptado de Dick *et al.*, 2010)

Substância húmica	C	H	O	N	C/N	H/C	O/C
Ácido húmico	50 a 59	3,9 a 6,2	32 a 40	3,1 a 5,0	10 a 17	0,80 a 1,2	0,42 a 0,57
Ácido fúlvico	41 a 51	4,3 a 7,0	40 a 53	0,9 a 3,3	18 a 38	0,93 a 1,4	0,65 a 1,00
Humina	57 a 59	4,5 a 5,5	33,a 35	2,7 a 3,0	19,22	0,92 a 2,1	0,42 a 0,46

Observa-se que a relação O/C (utilizada para avaliar o grau de oxidação da substância húmica) é menor nos ácidos húmicos que nos ácidos fúlvicos. Nas huminas esta relação chega a ser menor que nas outras frações.

Sparks (1995) sugere que a capacidade de troca catiônica das substâncias húmicas depende dos grupos funcionais presentes, sendo as carboxilas (COOH) e hidroxilas fenólicas (OH<sup>-</sup>) responsáveis por esta característica.

A estrutura das substâncias húmicas contém espaços vazios de diferentes tamanhos onde podem se alojar outros compostos orgânicos ou inorgânicos, conforme comenta Sparks (*op. cit.*).

Uma possível visualização da estrutura do ácido húmico foi sugerida por Schulten e Schnitzer (1993). De acordo com os autores, a estrutura consiste de um extenso esqueleto de carbono com átomos de O, H e N conforme mostra a Figura 3.2.

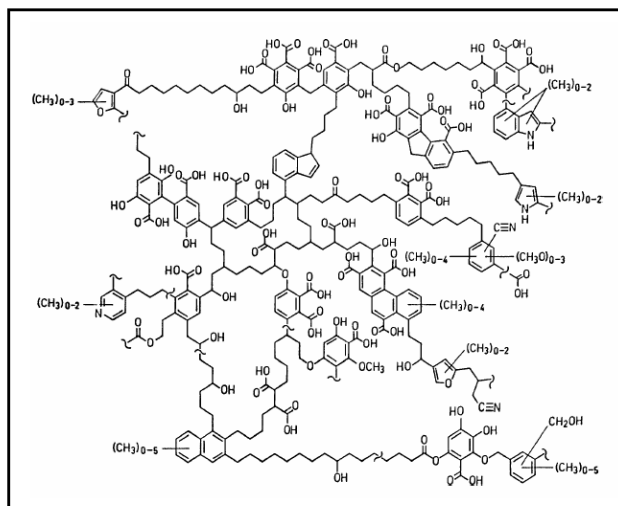


Figura 3.2 Estrutura-modelo para os ácidos húmicos (adaptado de Schulten e Schnitzer, 1993)

Em um estudo posterior, Schulten e Schnitzer (1997), apresentaram um modelo tridimensional, visto na Figura 3.3, onde se verifica a presença de espaços vazios de diferentes tamanhos, onde poderiam se alojar diferentes compostos sejam orgânicos como carboidratos, proteínas, lipídeos, agrotóxicos ou inorgânicos como argilominerais, óxidos, hidróxidos e metais.

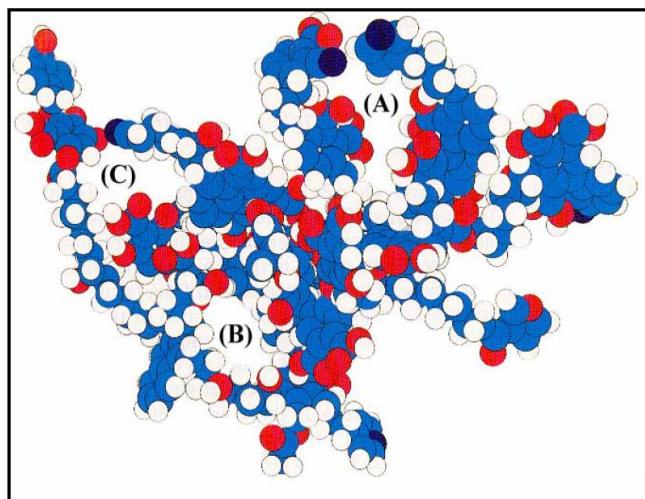


Figura 3.3 Modelo tridimensional para os ácidos húmicos evidenciando os átomos de carbono (em azul), hidrogênio (em branco), oxigênio (em vermelho), e nitrogênio (em azul escuro). As letras A, B, C representam os espaços vazios da estrutura (adaptado de Schulten e Schnitzer, 1997)

Piccolo *et al.*(*op.cit.*) afirmam ainda que as substâncias húmicas são consideradas supramoleculares (substâncias com grande complexidade que resultam da dissociação de duas ou mais espécies mantidas unidas por forças intramoleculares). Dentro delas, os ácidos fúlvicos são associações de pequenas

moléculas hidrofílicas que são grupos funcionais ácidos que permitem que os grupos de sua estrutura sejam dispersos em solução a qualquer pH. Já os ácidos húmicos são constituídos por associações de moléculas hidrofóbicas que são estabilizadas num pH neutro por forças dispersivas hidrofóbicas e apresentam crescimento até flocular em baixo pH.

Virgolino da Silva (2002) afirma que a solubilidade das substâncias húmicas no solo além de dependerem do pH do meio, dependem da associação com partículas de argila, silte e areia, como também, com sais solúveis, formando estruturas bi ou tridimensionais insolúveis evitando a perda de nutrientes por lixiviação em solos arenosos. Esta é uma das características da estabilidade dessas substâncias no solo.

### **3.3. Aplicações das substâncias húmicas**

Segundo diversos autores, entre eles Brunetti *et al.* (2007), Lepsch (1995) e Guerra, 2010), as substâncias húmicas presentes na matéria orgânica do solo são universalmente reconhecidas por serem os componentes essenciais em solos produtivos. Entre as várias funções agronômicas e ambientais está a retenção de água, a retenção de contaminantes e a contribuição na resistência a erosão do solo.

Com o incremento da população no mundo, a quantidade de rejeitos produzidos pela criação de gado, produção de alimentos e resíduos sólidos urbanos aumentou bastante. Brunetti *et al.*(*op. cit.*) propõe utilizar estes resíduos para extrair ácidos húmicos e aplicá-los nos solos a fim de melhorar as suas condições ambientais.

Ao longo das últimas décadas, muito se tem estudado sobre a importância das substâncias húmicas na agricultura. Sabe-se hoje que estas substâncias influenciam os seus parâmetros físicos, químicos e biológicos. Com relação aos parâmetros físicos, pode-se mencionar que as substâncias húmicas influenciam a capacidade na retenção de água no solo. Em relação aos parâmetros químicos, é possível citar a capacidade do colóide húmico de reter nutrientes como potássio, cálcio e magnésio. Com relação aos biológicos, a matéria orgânica disponibiliza a maior parte do alimento para a comunidade de organismos do solo.

Segundo o trabalho de Mauricio *et al.* (*apud* Faller, 2006) onde um concentrado húmico mineral foi aplicado a um solo argilo-arenoso contaminado com compostos orgânicos de óleo bruto, a descontaminação do solo se mostrou eficiente, havendo inclusive a observação de aumento das qualidades agrícolas na presença do concentrado húmico. Da mesma forma foi utilizado um concentrado húmico mineral comercial a um resíduo sólido da companhia produtora de zinco INGÁ, onde se observou uma redução da toxicidade do resíduo e um aumento das qualidades agrícolas.

No trabalho realizado por Faller (*op.cit.*) foram utilizadas substâncias húmicas para tratamento de água de produção de petróleo com resultados positivos para a aplicação das substâncias húmicas na área ambiental.

Em relação ao alumínio no crescimento de plantas, em solos com baixo pH pode ocorrer uma complexação da matéria orgânica do solo com o alumínio o que pode evitar o efeito nocivo deste metal no crescimento da vegetação (Dick *et al.*, 2010.).

As substâncias húmicas influenciam nos parâmetros do solo conferindo características de retenção de umidade e elevada capacidade de troca catiônica (CTC), o que favorece as interações físico-químicas. Ronquim (2010) e Borgues *et al.* (2013) afirmam que além desses parâmetros as substâncias húmicas estão relacionadas com a fertilidade do solo, melhorando a capacidade de penetração de raízes e infiltração de água, retenção de metais pesados, além da agregação do solo, característica também mencionada por Wendling *et al.*(2005) e Bastos *et al.*(2005).

Outra vantagem que pode ser mencionada relacionada com o uso de compostos húmicos na agricultura é o aumento da porosidade do solo que consequentemente diminui a densidade aparente dos solos devido à grande estabilidade dos complexos argilo-húmicos e sua característica de floculação das partículas no solo.

Dentro da agricultura o tamanho dos poros do solo adquire grande importância. Os agregados de solo-substância húmica proporcionam ao solo determinada porosidade, a qual, dependendo do seu tamanho, realiza funções específicas. Segundo Virgolino da Silva (2002), existe uma indicação na literatura que os poros de 50µm são os responsáveis por grande parte do armazenamento de água e nutrientes para as plantas. Os poros que vão de 50 a 500µm, denominados de transmissão, são importantes para o movimento da água, trocas gasosas do solo

e para o crescimento das raízes. Já os poros maiores que 500µm são considerados fissuras. Uma porcentagem elevada de fissuras é um indicador de um solo desagregado. Virgolino da Silva (*op. cit.*) sugere que um solo com um índice alto de poros menores que 50 µm possa estar relacionado como sendo de um solo compactado com baixa condutividade hidráulica.

### 3.4.

#### **Benefício das substâncias húmicas em relação à erosão**

As substâncias húmicas e as partículas de argila formam compostos que contribuem na agregação de partículas diminuindo a erodibilidade dos solos (Guerra *et al.*, 2010).

A estrutura das substâncias húmicas contém espaços vazios de diferentes tamanhos onde podem alojar-se outros compostos orgânicos ou inorgânicos. Nesse sentido substâncias húmicas podem contribuir de diferentes maneiras com relação com a erodibilidade do solo, através da interação com os metais, na retenção de outras substâncias orgânicas e mediante complexos estáveis substâncias húmicas – argila que favorecem a agregação das partículas.

Segundo Kiehl (1985) a agregação do solo é influenciada pelo conteúdo de substância húmica do solo. Esta agregação é definida como sendo o resultado da união das partículas primárias: areia, silte e argila, e outros componentes do solo, como a matéria orgânica e os carbonatos de cálcio e magnésio, originando massas distintas com agregados estáveis.

Segundo Mortensen & Himes (1964), citados por Kiehl (1985), as substâncias húmicas mostram-se mais eficientes que as argilas na formação de agregados com areia. Lopez *et al.* (2006) também apresentam um trabalho com uma análise do comportamento das substâncias húmicas nas propriedades de um solo silto-argiloso e concluem que estas substâncias aumentam a porosidade e estabilizaram os agregados do solo.

É importante mencionar que a adsorção de substâncias húmicas no solo é limitada. Hassink (1997) afirma que há um limite no qual a quantidade de carbono e nitrogênio que pode ser associado a partículas de argila e silte. Aparentemente o argilomineral presente na fração argila não afeta este valor, mas a temperatura e a umidade podem influenciar esta adsorção. Segundo o autor, baixas precipitações e



temperatura elevada levam a solos adsorver uma quantidade menor de carbono e nitrogênio.

As substâncias húmicas têm imensa capacidade de reter água no solo. Kiehl (1985) cita que a matéria orgânica fresca, tem capacidade de retenção de água em torno de 80% do seu peso; e à medida que vai sendo humificada, essa capacidade se eleva para cifras médias de 160%. A matéria orgânica bem humificada, rica em coloides, como as turfas e os solos orgânicos, podem ter de 300 a 400% de capacidade de retenção, enquanto que as substâncias húmicas puras podem alcançar de 600 a 800% de capacidade de reter água, ou seja, de 6 a 8 vezes o seu peso.

De acordo com Herrera *et al.* (2013), a diferenciação dos grupos orgânicos presentes nos compostos húmicos pode ser útil na avaliação da erodibilidade. Os autores sugerem a utilização de relações quantitativas entre os componentes das substâncias húmicas (ácido húmico (AH), ácido fúlvico (AF) e huminas (HU)) como indicativo do potencial de erodibilidade de solos.

As relações propostas por Herrera *et al.* (2013) que podem ser utilizadas como indicadores de erosão são:

- C-HA/ C-FA que se refere a relação de carbono presente no ácido húmico e o carbono no ácido fúlvico;
- C-FA/TOC que é a taxa de carbono presente no ácido fúlvico e o teor de carbono orgânico total (TOC), e
- Cp /TOC que se refere a relação do carbono extraído com pirofosfato de sódio (Cp) e o carbono orgânico total

A relação entre substâncias orgânicas e a estabilidade dos agregados no solo também foi estudada por diferentes autores, incluindo Le Bissonnais (1996), Kay (1998), Amezketa (1999) e Bronick e Lal (2005). Os estudos sugerem que a agregação das partículas é um fator importante em problemas ambientais face à resistência dos agregados aos esforços de tração ser um dos principais indicativos da erodibilidade de solos.

Abiven *et al.* (2009) indicam que há uma dinâmica na agregação das partículas face às condições climáticas, às práticas de cultivo e decomposição de matéria orgânica.

Monnier (1965), citado no trabalho de Abiven *et al.* (2009), apresentou um modelo conceitual que descreve o efeito de diferentes produtos orgânicos

adicionados ao solo. Segundo o modelo proposto, a estabilidade dos agregados varia em diferentes escalas após a incorporação destes produtos; podendo variar entre semanas, meses ou anos após sua incorporação no solo.

O modelo de Monnier sugere que a matéria orgânica fresca apresenta um intenso efeito após um mês de ter sido incorporada. Por outro lado, a matéria orgânica decomposta tem um efeito muito baixo neste período, mas que a sua eficácia aumenta com o tempo. Para melhor entendimento dos processos o autor apresenta o esquema visto na Figura 3.4 onde são observadas três zonas: A, B e C.

A zona A corresponde as semanas iniciais após a incorporação da matéria orgânica fresca. Durante esta fase a máxima intensidade de estabilidade de agregados é exibida em torno de 1 mês após a aplicação da substância. Este efeito vai decrescendo e em poucas semanas retorna ao ponto inicial no que se refere à estabilidade dos agregados. O autor associa este comportamento à atividade dos microrganismos.

Na zona B o efeito na estabilização de agregados é decorrente da ação das substâncias parcialmente decompostas (substâncias pre-húmicas). Na zona C verifica-se um pequeno efeito inicial na estabilidade dos agregados e que, com o decorrer do tempo, o efeito vai se intensificando até atingir um valor máximo após vários meses de aplicação. Este efeito é atribuído à substâncias húmicas oriundas da matéria orgânica decomposta.

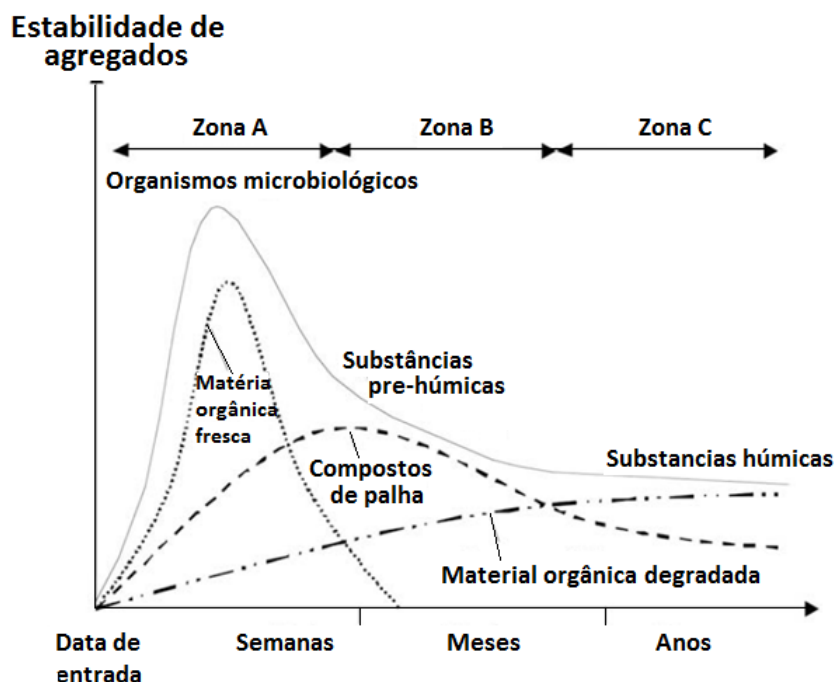


Figura 3.4. Modelo conceitual de Monnier (adaptado de Abiven *et al.*, 2009)

### 3.4.1. Complexos substância húmica – argila

As argilas, face a dimensão de suas partículas, são influenciadas pela adsorção e troca iônica (Santos, 1975; da Costa, 1979). Para melhor entendimento do mecanismo de adsorção é importante ressaltar a diferença entre os conceitos de adsorção e absorção. Na adsorção as moléculas ou íons de uma substância ficam retidos na superfície de uma substância adsorvente. Já na absorção esta molécula ou íon se infiltra na substância que o absorve.

A adsorção da argila refere-se quando na camada difusa do argilomineral (*i.e.*, camada dupla) alguns íons e moléculas de água (água adsorvida) ficam fortemente fixados à superfície. Já na troca iônica ocorre um intercâmbio iônico entre os íons presentes na camada difusa das argilas e a solução em que se encontra. Os íons trocáveis podem ser orgânicos e inorgânicos. Estes mecanismos influenciam na agregação de partículas em solos, posto que um cátion pode agir como uma ponte para manter as partículas de argilas unidas, ou para limitar a sua distância de separação.

Segundo autores, como da Costa (1975) e Sparks (1995), os mecanismos envolvendo matéria orgânica do solo e argila também incluem:

- adsorção pelas forças Van der Walls,
- interações eletrostáticas de intercâmbio catiônico e aniônico,
- adsorção química e ligação  $H^+$ .

Sparks (*op. cit.*) menciona que dois ou mais destes mecanismos podem ocorrer simultaneamente a depender do tipo do material orgânico, da natureza do intercâmbio iônico na superfície do argilomineral, da acidez da superfície e do teor de umidade.

As retenções através de forças de Van der Walls são ligações fracas e resultam de forças de atração e repulsão entre moléculas. Já as ligações eletrostáticas por intercâmbio de cátions ou ânions, são pontes de cátions e ânions feitas por metais polivalentes em forma de ponte entre as moléculas orgânicas e superfícies inorgânicas.

Sparks (*op. cit.*) também menciona que estes dois mecanismos (*e.g.*, as retenções via forças de Van der Walls e ligações eletrostáticas por intercâmbio de cátions ou ânions) são dependentes das características básicas das moléculas orgânicas, do pH do sistema, das propriedades dos cátions, do comprimento da cadeia e dos tipos de cátions presentes na camada difusa da argila.

O autor ainda menciona que a sorção de substâncias húmicas com carga negativa ocorre quando cátions metálicos polivalentes como  $Al^{3+}$ ,  $Fe^{3+}$ , e  $Ca^{2+}$  estão presentes em certas posições da estrutura da argila. Neste caso, eles podem neutralizar a carga negativa líquida da argila e a carga no grupo orgânico deprotonado por exemplo o  $COO^-$ . Sparks (*op. cit.*) sugere que este possa ser provavelmente um dos mecanismos pelos quais os ácidos húmicos e ácidos fúlvicos são retidos no solo.

As ligações de hidrogênio resultam de ligações entre dois átomos eletronegativos através de ligações com um único  $H^+$ . Por exemplo, um átomo de hidrogênio é capaz de se unir com dois átomos de oxigênio. A ligação de hidrogênio é mais fraca que a ligação iônica ou covalente, mas é mais forte que as forças de Van Der Walls conforme afirmam da Costa, (1979), Stevenson (1994) e Sparks (1995).

Os complexos matéria orgânica-minerais são formados devido a presença de argila que se une com grupos funcionais de substâncias húmicas por meio de cátions bi ou polivalentes. Os cátions atuam como pontes entre os compostos inorgânicos

e orgânicos. Estes complexos formam partículas de maiores dimensões constituindo os microagregados.

## 4

## Materiais e Métodos

### 4.1.

#### Amostragem e caracterização geotécnica

A coleta de amostras do material de desmonte oriunda de mineração foi realizada no município de Santo Antônio de Pádua, situado no Noroeste do Estado do Rio de Janeiro, que está localizado a 256 km da cidade do Rio de Janeiro, cuja localização pode ser vista na Figura 4.1.

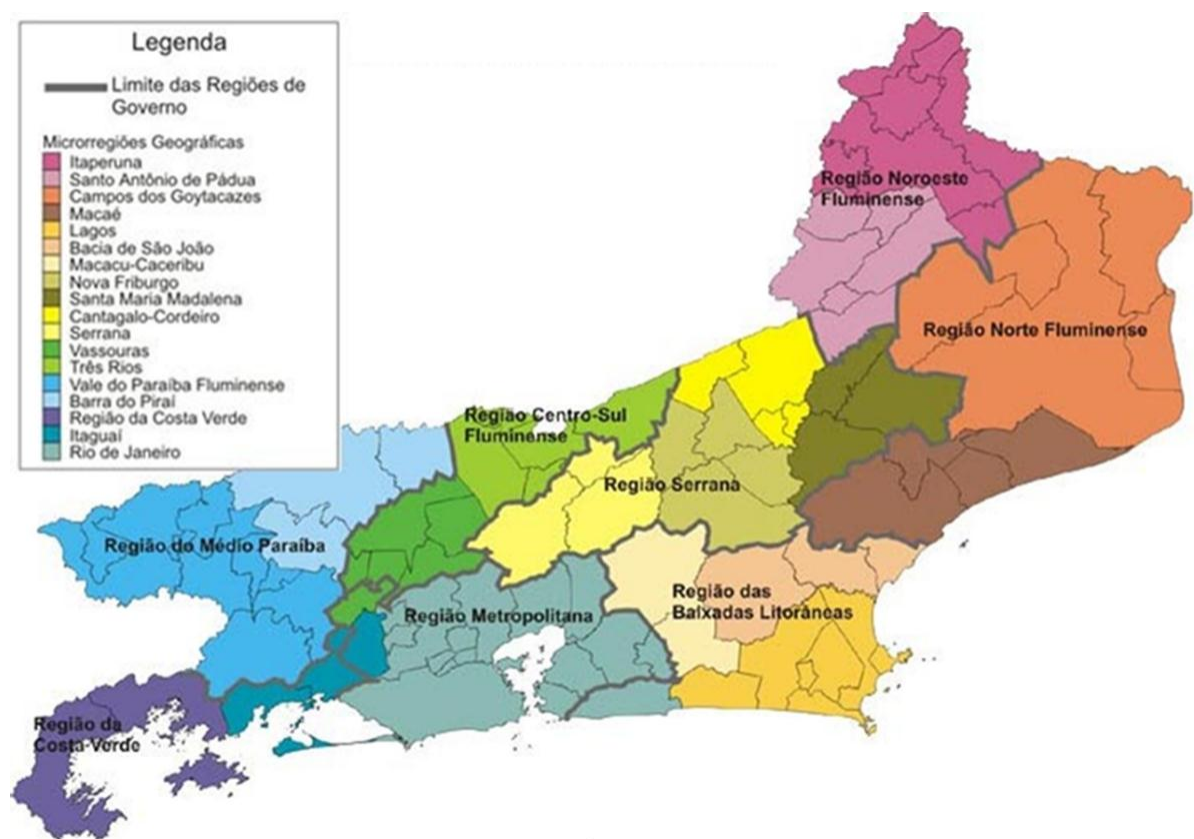


Figura 4.1 Município de Santo Antônio de Pádua na região Noroeste do Estado do Rio de Janeiro. Fonte: Site oficial da Fundação Centro Estadual de Estatísticas, Pesquisas e Formação de Servidores Públicos (CEPERJ).

A coleta do solo foi realizada na Fazenda São Raphael LTDA. que tem como principal atividade a extração de rocha ornamental. Na área do município de

Santo Antônio de Pádua são encontradas formações gnaiss-migmatito-granulito, de alto grau de metamorfismo típico de terrenos arqueanos (Departamento de Recursos Minerais, 1992).

O tipo fundamental de rochas encontradas é composto de gnaisses e migmatitos com intercalações de quartzitos, sendo que os granulitos encontrados, quando milonitizados, deslocam através de planos bem definidos, facilitando bastante seu desmonte (Peiter, 2001).

A fim de atingir a rocha de interesse, as operações de extração de rocha ornamental removem uma quantidade considerável de solo. O material de desmonte é disposto em pilhas em locais próximos dentro da mesma fazenda, mas compactado sem o devido controle. As pilhas de material de desmonte apresentam feições erosivas em seus taludes, conforme pode ser observado na Figura 4.2.



Figura 4.2 Amostragem do material a ser utilizado

O material deformado foi coletado através de pás e disposto em sacos plásticos, conforme pode ser visto na Figura 4.2. O peso específico e o teor de umidade do material de desmonte disposto foi determinado *in situ* utilizando-se de um anel cilíndrico metálico, uma espátula, um paquímetro e uma balança de precisão de 2 casas decimais. Já o teor de umidade foi determinado através do



processo gravimétrico, onde a massa da amostra do material de desmonte foi determinada *in situ* e a sua massa seca foi determinada em laboratório após secagem em estufa a 105°C. As Figura 4.3 e 4.4 apresentam fotos das operações realizadas em campo.



Figura 4.3 Anel metálico preenchido com solo dentro da capsula



Figura 4.4 Balança portátil utilizada na medição de parâmetros no local da amostragem



#### **4.1.1. Caracterização geotécnica**

Os ensaios de caracterização foram realizados nas dependências do Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente do Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio.

##### **Determinação do Teor de umidade ( $\omega$ )**

A determinação do teor de umidade foi realizada através da coleta de porções de amostras, que foram levadas à estufa a uma temperatura entre 105°C e 110°C o tempo necessário para que a massa fosse constante, conforme estabelece a NBR 6457.

##### **Determinação da Densidade dos Grãos ( $G_s$ )**

O valor da densidade dos grãos ( $G_s$ ) foi obtido pela média dessas determinações de acordo com o estabelecido na norma NBR 6508.

##### **Análise granulométrica**

O ensaio de peneiramento e sedimentação foram realizados seguindo os procedimentos estabelecidos na norma NBR 7181.

##### **Determinação dos Índices de Consistência**

O ensaio para determinar o limite de Liquidez ( $\omega_L$ ) foi realizado de acordo com a NBR 6459 e o limite de Plasticidade ( $\omega_P$ ) seguindo os procedimentos estabelecidos na norma NBR 7180.

##### **Determinação de teor de matéria orgânica**

Como o intuito de determinar o valor do teor da matéria orgânica do solo, o ensaio de determinação de carbono orgânico foi realizado no Laboratório de Estudos Marinhos e Ambientais do Departamento de Química da PUC-Rio utilizando o equipo TOC 5000A de marca SHIMADZU.

De acordo com os procedimentos estabelecidos no manual da EMBRAPA (1997), o teor de matéria orgânica (MO) pode ser determinado em função do teor de carbono orgânico (TOC), admitindo que:

$$MO (\%) = TOC \times 1,724 \quad (4.1)$$

### **Composição elementar da matéria orgânica (CNH)**

A composição elementar da matéria orgânica foi realizada com o intuito de determinar o teor de carbono, nitrogênio e hidrogênio presente no material de desmonte oriundo de mineração. A determinação seguiu os procedimentos estabelecidos na norma ASTM D5291. As análises foram realizadas nas dependências do Laboratório de Análise e Caracterização Química, do departamento de Química da PUC-Rio.

## **4.2.**

### **Análise mineralógica**

A identificação dos minerais presentes na amostra do material de desmonte oriundo foi realizada pela utilização da difração de Raios X empregando o método de Bragg (Klein & Hurlbut Jr., 1993). As análises foram realizadas nas dependências do Laboratório de Difractometria do Departamento de Engenharia de Materiais e processos Químicos da PUC-Rio empregando um difratômetro da marca Siemens, modelo D5000.

As análises foram realizadas em duas amostras processadas do material de desmonte secadas ao ar. A primeira foi obtida com o material passante na peneira #200 enquanto que a segunda foi obtida com o material passante na peneira #400.

A fim de auxiliar na interpretação dos resultados dos difratogramas obtidos, foi realizada em paralelo, nas dependências do Laboratório da Empresa Nano-Business pertencente ao Instituto Gênesis da PUC-Rio, análises de fluorescência de Raios X empregando um Espectrômetro de Fluorescência de Raios X por Energia Dispersiva. O equipamento da marca Bruker, modelo S2 Ranger, utilizou com detector X-Flash com o programa S2 GUI Client, realizando análises qualitativas e semi-quantitativas através do programa Espectra EDX. As análises foram conduzidas em amostras processadas do material de desmonte secadas ao ar com o material passante na peneira #200.

### **4.3. Características das substâncias húmicas utilizadas e ensaios de laboratório para avaliar o potencial de erodibilidade do material de desmonte oriundo de mineração de pedra Miracema**

Os ensaios que serão descritos neste subitem serão empregados na avaliação da erodibilidade do material de desmonte oriundo de mineração de rocha ornamental a partir da incorporação de duas substâncias húmicas. A primeira substância foi extraída no Laboratório de Processos Químicos e Metalúrgicos do Departamento de Engenharia Química e de Materiais e da PUC-Rio a partir de um rejeito de carvão mineral. No presente trabalho, esta substância será denominada doravante como substância húmica PUC-Rio. Já a segunda substância húmica é um produto disponível comercialmente.

A substância húmica extraída no rejeito de carvão mineral será adicionada ao material de desmonte em diferentes porcentagens, enquanto que a substância húmica comercial somente será adicionada em uma única porcentagem para controle dos experimentos.

#### **4.3.1. Substância Húmica PUC-Rio**

A Substância Húmica PUC-Rio foi concedida pelo Laboratório de Processamento Químico do Departamento de Engenharia de Materiais e Processos Químicos. A sua fabricação observou o procedimento estabelecido por Cosme (2013).

O rejeito de carvão mineral utilizado para a obtenção da substância húmica PUC-Rio utilizada na presente pesquisa foi fornecido pela empresa de produção de carvão mineral COPELMI, do Estado de Santa Catarina. A amostra de rejeito foi seca previamente a 60°C durante 24 horas e em seguida moída até que os seus grãos possuíssem um tamanho passante na peneira # 250 (*i.e.*, 63µm).

A oxidação do rejeito foi realizada por um processo químico, utilizando HNO<sub>3</sub> a 40%, realizando uma separação por decantação onde o sobrenadante é a solução com impurezas (posteriormente descartada) e o precipitado contém substâncias húmicas. Posteriormente foi realizada uma agitação com uma solução contendo NaOH 0,1 M obtendo assim uma substância que contém ácido húmico, ácido fúlvico e huminas junto com alguns compostos inertes.

A substância húmica proveniente do rejeito de carvão mineral utilizada nos ensaios, vista na Figura 4.5, consta de uma parte líquida e outra parte precipitada. O sobrenadante contém principalmente ácido húmico e o precipitado ácido fúlvico, humina e outras substâncias inertes.



Figura 4.5 Substância húmica precipitada

As Tabelas 4.1 e 4.2 apresentam as características básicas da substância húmica PUC-Rio.

Tabela 4.1- Características da substância húmica PUC-Rio

Concentração	Densidade	pH
13%	1,1 Kg/L	8

Tabela 4.2- Composição elementar da substância húmica PUC-Rio

C	N	H
11,6%	1,8%	1,3%

#### 4.3.2. Substância húmica comercial

A substância húmica comercial utilizada no presente trabalho apresenta uma consistência pastosa que pode ser observada na Figura 4.6. Esta substância consiste em um produto comercial da companhia russa *Electrophysical and Acoustical Technologies (EPHAT Ltd.)* obtida a partir de carvão mineral, que foi testada por

Faller (2006) junto com outras duas substâncias com o objetivo de avaliar aspectos da tratabilidade da água de produção de petróleo pelo uso de substâncias húmicas.

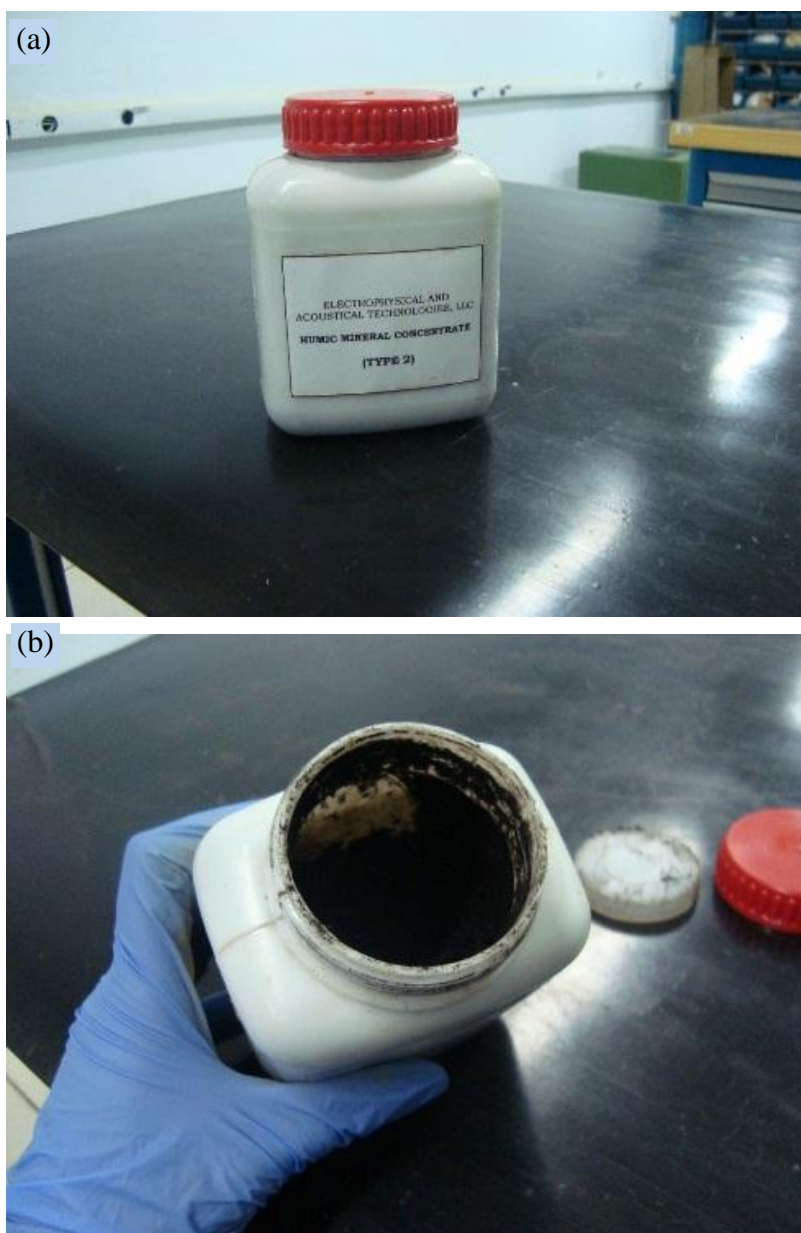


Figura 4.6 (a)Substância húmica comercial (b) Consistência das substancia húmica comercial

Os resultados apresentados por Faller (2006) mostraram ser factível o uso de substâncias húmicas em tratamentos que envolvam uma etapa de coagulação/floculação e confirmam a capacidade destas substâncias de reter espécies metálicas como o bário.

Faller (*op.cit*) afirma que pela análise da composição elementar presente na Tabela 4.3 é possível observar que a substância comercial mencionada apresenta composição elementar típica de um ácido húmico extraído de solos.

Tabela 4.3- Composição elementar da substância húmica comercial

<b>C</b>	<b>N</b>	<b>H</b>
55,25%	0,95%	3,93%

**4.3.3.****Ensaio de desagregação**

A amostra do material de desmonte foi inicialmente seca a 60°C em estufa até que se atingisse constância de massa. Posteriormente a amostra foi destorroada.

A amostra controle dos experimentos foi obtida adicionando-se uma quantidade de água necessária a atingir o teor de umidade determinado em campo (*i.e.*, 23%). Em seguida, a amostra era misturada manualmente até se atingir uma massa com teor de umidade uniforme.

A incorporação das substâncias húmicas ao material de desmonte foi realizada a partir do material seco e destorroado. A incorporação teve base gravimétrica. Uma solução com a concentração desejada de substâncias húmicas era adicionada ao material seco e a mistura era homogeneizada manualmente. A Figura 4. ilustra o procedimento realizado.



Figura 4.7 (a) Substância húmica, água e solo a ser misturados



Figura 4.7 (b) Mistura da substância húmica e água aplicada no solo

A escolha dos teores de substância húmica a ser adicionados no solo foram escolhidos em base a Picollo *et. al* (1997) que utilizou (0, 0.05, 0.10, 0.50 e 1.00 g de ácido húmico/kg) para reduzir a erodibilidade de um solo.

Em relação a homogeneidade da mistura do solo com os compostos húmicos adicionados pode se afirmar que após adicionada a substância húmica ao solo se misturou com uma espátula durante 5 minutos até observar a ausência de torrões de material seco, uniformizando desta forma a umidade e a distribuição da substância húmica no corpo de prova confeccionado.

Observada uniformidade na umidade da mistura, o material era colocado em um molde metálico cilíndrico com 10 cm de diâmetro e 6 cm de altura, como mostra na Figura 4.8 . Em seguida o molde era posicionado na prensa manual mini-CBR, vide Figura 4.9, onde era compactado até o corpo de prova apresentar um peso específico igual ao peso específico determinado em campo. O procedimento foi baseado na metodologia usada por Pacheco (2010) que utiliza o mesmo tipo de prensa e na norma NBR 12007.





Figura 4.8 Molde para realizar os corpos de prova cilíndricos



Figura 4.9 Prensa utilizada para realizar os corpos de prova cilíndricos

Ao todo foram confeccionados 54 corpos de prova cilíndricos com 10 cm de diâmetro e 6 cm de altura com incorporações distintas de substâncias húmicas. As características dos corpos de prova estão descritas na Tabela 4.4.



Tabela 4.4- Características dos corpos de prova

Número de CP	Diâmetro (cm)	Altura (cm)	Massa (g)	% SH	Origem SH
1	9,98	6,20	846,16	0	Rejeito de carvão
2	9,99	6,30	837,38	0,5	Rejeito de carvão
3	10,13	6,25	832,97	1	Rejeito de carvão
4	10,10	6,20	833,40	3	Rejeito de carvão
5	9,98	6,20	839,02	5	Rejeito de carvão
6	10,11	6,19	830,00	1	Comercial
7	10,13	6,50	830,80	0	Rejeito de carvão
8	10,07	6,20	833,89	0,5	Rejeito de carvão
9	10,12	6,24	832,93	1	Rejeito de carvão
10	10,07	6,20	836,71	3	Rejeito de carvão
11	10,03	6,20	839,53	5	Rejeito de carvão
12	9,98	6,19	847,80	1	Comercial
13	10,01	6,10	837,10	0	Rejeito de carvão

Tabela 4.4- (cont.) Características dos corpos de prova

Número de CP	Diâmetro (cm)	Altura (cm)	Massa (g)	% SH	Origem SH
14	10,14	6,24	835,70	0,5	Rejeito de carvão
15	10,11	6,23	834,99	1	Rejeito de carvão
16	10,11	6,12	836,61	3	Rejeito de carvão
17	10,12	6,15	838,10	5	Rejeito de carvão
18	10,13	6,15	835,90	1	Comercial
19	10,02	6,20	834,88	0	Rejeito de carvão
20	10,03	6,19	835,83	0,5	Rejeito de carvão
21	10,02	6,08	831,92	1	Rejeito de carvão
22	10,04	6,15	839,12	3	Rejeito de carvão
23	9,96	6,24	836,96	5	Rejeito de carvão
24	9,93	6,20	833,90	1	Comercial
25	10,07	6,20	837,54	0	Rejeito de carvão
26	10,01	6,17	835,86	0,5	Rejeito de carvão
27	10,01	6,13	834,48	1	Rejeito de carvão
28	9,95	6,21	835,69	3	Rejeito de carvão
29	9,97	6,02	840,17	5	Rejeito de carvão
30	10,05	6,25	830,50	1	Comercial
31	9,98	6,20	840,10	0	Rejeito de carvão
32	10,01	6,15	839,20	0,5	Rejeito de carvão
33	9,98	6,20	838,90	1	Rejeito de carvão
34	9,97	6,17	838,12	3	Rejeito de carvão
35	10,03	6,19	839,10	5	Rejeito de carvão
36	10,12	6,20	830,26	1	Comercial
37	10,01	6,21	838,45	0	Rejeito de carvão

38	10,01	6,27	839,99	0,5	Rejeito de carvão
39	10,01	6,17	837,32	1	Rejeito de carvão
40	9,99	6,19	839,99	3	Rejeito de carvão
41	9,99	6,12	834,09	5	Rejeito de carvão
42	10,03	6,24	830,11	1	Comercial
43	10,00	6,21	839,91	0	Rejeito de carvão
44	10,04	6,18	837,55	0,5	Rejeito de carvão
45	10,00	6,20	837,09	1	Rejeito de carvão
46	10,01	6,22	839,90	3	Rejeito de carvão
47	10,00	6,12	838,12	5	Rejeito de carvão
48	10,02	6,24	830,19	1	Comercial
49	10,01	6,12	831,99	0	Rejeito de carvão
50	9,98	6,12	837,16	0,5	Rejeito de carvão
51	9,98	6,13	839,22	1	Rejeito de carvão
52	9,97	6,14	837,49	3	Rejeito de carvão
53	9,99	6,11	834,96	5	Rejeito de carvão
54	10,11	6,20	833,10	1	Comercial

Os corpos de prova foram embalados com filme de PVC e estocados em isopores a fim de preservar as suas umidades, conforme ilustra a Figura 4.10. Eles foram agrupados em três diferentes isopores e armazenados durante dois, cinco e doze meses.



Figura 4.10 Corpos de prova armazenados

A escolha dos tempos de armazenamento foi realizada considerando os estudos de Monnier (1965). O autor sugere que na incorporação de substâncias húmicas a estabilidade dos agregados que representaria a melhor agregação das partículas se vê incrementada em função do tempo, como pode ser observado no

gráfico 3.4 do capítulo 3. Vários autores, incluindo, Guckert *et al.* (1975) e Skinner(1979), verificaram ser válidas as sugestões realizadas por Monnier (*op. cit.*).

Mais recentemente, Martens (2000) e Spaccini *et al.* (2004) discutiram aspectos relacionados ao tempo de armazenamento em suas respectivas publicações. Os autores adicionaram ao solo compostos como resíduos de plantas e lodo de esgoto (matéria orgânica parcialmente decomposta). Observou-se uma máxima agregação de partículas em um intervalo de tempo de um a três meses após a adição. Os estudos realizados por Fortun *et al.* (1989) e Albiach *et al.* (2001) com adição de substâncias húmicas verificaram que a estabilização de agregados máxima decorreu em períodos superiores a três meses.

Decorrido o tempo de estocagem, os corpos de prova eram retirados do isopor e o papel filme que o embalava era removido. A seguir, talhava-se com o auxílio de um estilete corpos de prova cúbicos com 5 cm de aresta e 5 cm de altura, utilizando-se de um molde metálico como gabarito. A Figura 4.11 apresenta o procedimento descrito enquanto que a Figura 4.12 mostra os corpos de prova obtidos através deste procedimento.



Figura 4.11 - Moldagem dos corpos de prova cúbicos



Figura 4.12 Corpos de prova prontos para ser ensaiados

Após a confecção do corpo de prova cúbico, este era imerso em uma solução com água deionizada contida em uma badeja metálica. A altura da coluna d'água correspondia à metade da altura do corpo de prova.

Os ensaios foram realizados em triplicata, sendo que as propriedades de cada corpo de prova, incluindo o seu peso específico e o seu teor de umidade, foram determinadas *a priori* para efeito comparativo.

#### **4.3.4. Ensaio da metodologia MCT**

##### **Preparação das Amostras**

As amostras para realização dos ensaios da Metodologia MCT foram previamente secas ao ar. Utilizou-se somente o material passante na peneira com abertura de 2 mm observando o recomendado em Villibor e Nogami, (2009) e na norma DNER - ME 258/94.

O material com um teor de umidade de 23% foi disposto em sacolas plásticas contendo 1,5 Kg. As amostras com e sem a adição de substâncias húmicas foram acondicionadas em caixas de isopor onde permaneceram por período de dois, cinco e doze meses.

##### **Ensaio de compactação Mini-MCV**

O ensaio de compactação mini-MCV objetiva a classificação geotécnica dos solos tropicais. A sua denominação é um acrônimo para *Moisture Condition Value* face ao ensaio ser realizado com porções de solo com diferentes teores de umidade.

O procedimento seguiu as recomendações contidas em Villibor & Nogami (*op. cit.*) e na norma DNER- ME 258/94.

### Ensaio de comportamento à imersão

O ensaio de comportamento à imersão é realizado com os corpos de prova resultantes do ensaio de compactação mini MCV. Os corpos de prova são extraídos parcialmente dos respectivos moldes deixando-os salientes em 1cm.

Em seguida, o cilindro e o corpo de prova são posicionados horizontalmente, como mostra a Figura 4.13, e submersos em uma bandeja contendo água tratada por um intervalo de 24 horas. Os materiais que se desprende do corpo de prova no decorrer do período de imersão é coletado em um pires. Este material é seco em estufa a uma temperatura entre 105 a 110°C, e posteriormente a sua massa seca é medida em uma balança analítica.

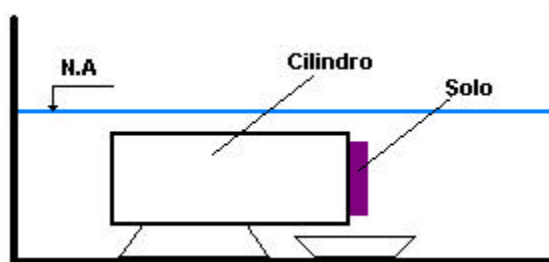


Figura 4.13 Ilustração do ensaio de comportamento a imersão (Villibor e Nogami, 2009)

A perda por imersão  $P_i$  é obtida através da seguinte equação:

$$P_i(\%) = \frac{F_c \times M_e}{M_d} \times 100 \quad (4.2)$$

Onde:

$M_e$  = Massa Seca da parte extrudada do corpo de prova [g].

$M_d$  = Massa Seca desprendida [g].

$F_c$  = 0,5 somente quando a parte desprendida é um monobloco.

$F_c$  = 1,0 para os outros casos.

Para a classificação do solo segundo a Metodologia MCT são realizados cálculos na determinação de coeficientes que auxiliam neste processo. O coeficiente  $c'$  é denominado coeficiente de deformabilidade, enquanto o coeficiente  $d'$  é

denominado coeficiente de compactação e o coeficiente  $e'$  é denominado índice de laterização.

Para a determinação do coeficiente  $c'$ , são obtidas as curvas de deformabilidade através do gráfico do número de golpes (abscissa) versus o recalque no processo de compactação dos corpos de prova (ordenada). A projeção no eixo x da interseção de cada curva de deformabilidade com a linha horizontal de equação  $y = 2 \text{ mm}$  fornece uma propriedade designada Mini-MCV, vide Figura 4.14, que pode ser expressa em golpes de soquete. Para fins classificatórios se utiliza o coeficiente angular dado pela inclinação da curva correspondente ao Mini MCV= 10. Villibor & Nogami (2009), recomendam que na impossibilidade de se conseguir a curva exata do Mini MCV= 10, utiliza-se uma interpolação para se obter o coeficiente angular.

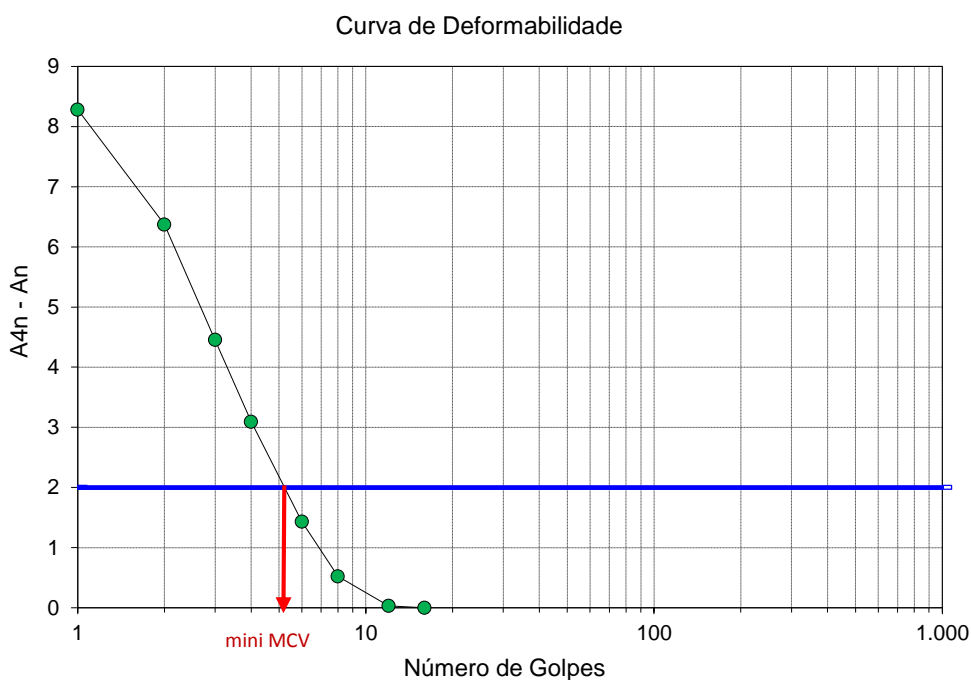


Figura 4.14 Exemplo de curva de deformabilidade do ensaio Mini MCV

Para determinação do coeficiente  $d'$ , faz-se necessário à obtenção da relação entre a massa específica aparente seca e o teor de umidade, correspondente a uma energia de 12 golpes (vide Figura 4.15). A inclinação da parte retilínea do gráfico fornece o parâmetro  $d'$ , que é definido por:

$$d' = \frac{\Delta Meas}{\Delta H} \quad (4.3)$$

Onde:

$\Delta Meas$  é a diferença de massa específica aparente seca

$\Delta H$  corresponde a variação de teor de umidade  $\Delta H$ .

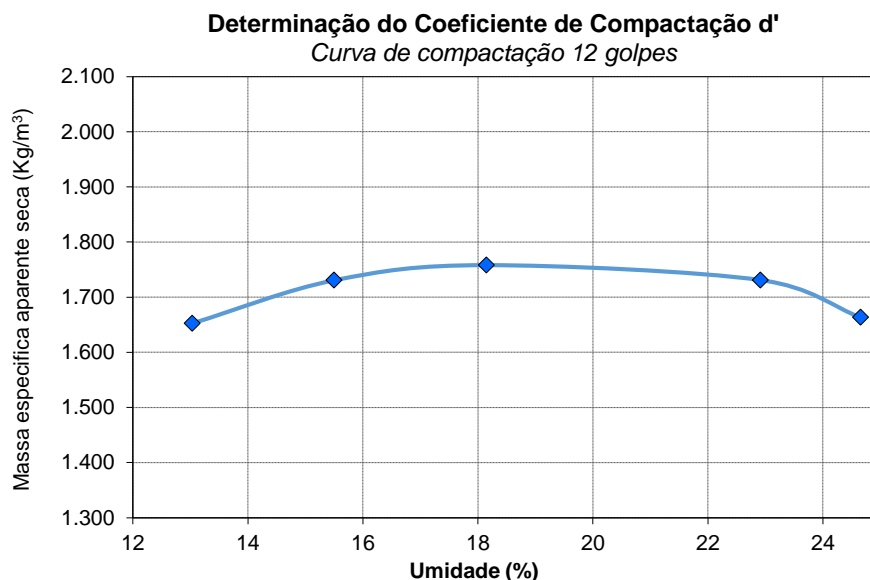


Figura 4.15 Exemplo da curva de compactação correspondente a 12 golpes, para determinação do coeficiente d'

Já o coeficiente de laterização,  $e'$ , é obtido a partir da equação 4.4, utilizando o valor do coeficiente  $Pi$ , denominado perda por imersão obtido através da equação 4.2, correspondente ao Mini MCV = 15 em casos de solos com alta densidade, quando a altura final do corpo de prova for maior a 48mm ou o Mini MCV= 10 quando a altura final do corpo de prova for menor a 48mm. Para determinar o coeficiente  $Pi$  adequado os autores do método recomendam realizar o gráfico  $Pi$  x Mini MCV de cada corpo de prova.

$$e' = \sqrt[3]{\frac{20}{d'} + \frac{Pi}{100}} \quad (4.4)$$

A distinção entre solos lateríticos e os não lateríticos, proposta por Villibor & Nogami (*op.cit.*), é realizada a partir da utilização do ábaco contido na Figura 4.16. O ábaco se utiliza dos valores dos parâmetros  $c'$  e  $e'$  para classificar um solo como

não-laterítico (N) e solo laterítico (L). De acordo com a textura do solo, os autores recomendam a utilização dos seguintes sufixos: A para areias, A' para solos arenosos, S' para solos siltsos e G' para solos argilosos.

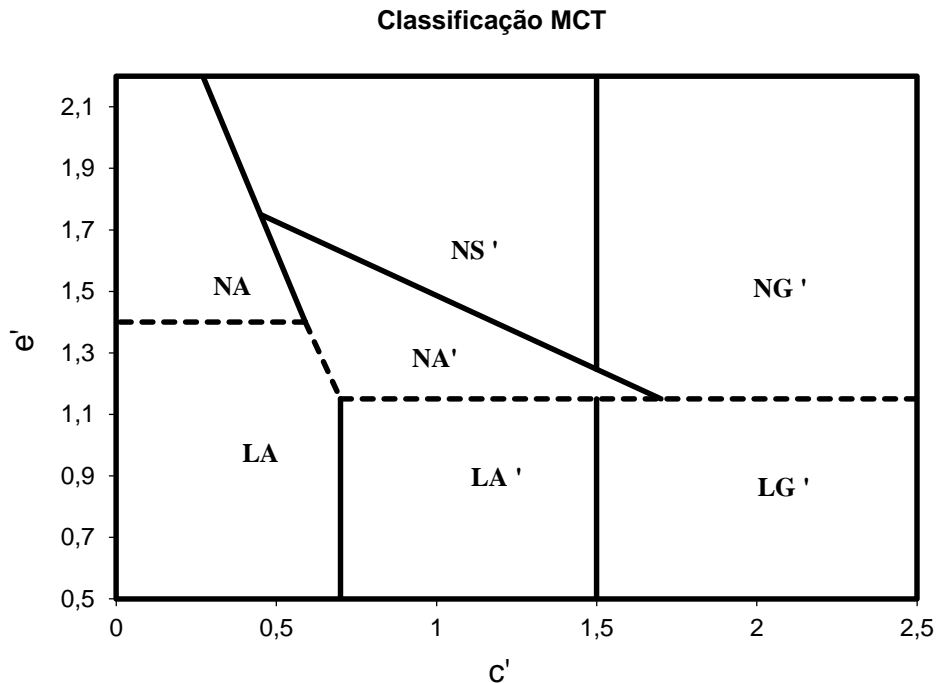


Figura 4.16 Ábaco classificatório MCT

#### 4.3.5. Ensaio de compressão diametral

Os corpos de prova com 5 cm de diâmetro e 5 cm de altura, foram confeccionados na prensa mini CBR manual vista na Figura 4.17. A confecção envolveu o uso de um cilindro de aço inoxidável, onde o material com teor de umidade 23% foi colocado e compactado *a posterior* no intuito de obtenção de um peso específico de 16,68 KN/m<sup>3</sup>. O material foi extraído com o uso de um pistão de PVC como mostra a Figura 4.18. Após a sua extração os corpos de prova tinham as suas dimensões determinadas por um paquímetro e a sua massa era medida em uma balança analítica.





Figura 4.17 Prensa utilizada para preparar os corpos de prova



Figura 4.18 Preparação e extração dos corpos de prova

Ao todo, foram confeccionados 54 corpos de prova a fim de obter um número suficiente para que os ensaios fossem realizados em triplicata observando o tempo de armazenamento e as concentrações de substância húmica. Os corpos de prova

foram embalados com filme de PVC e estocados em isopores durante dois, cinco e doze meses.

O ensaio foi realizado em uma prensa multitestes da marca Wykeham-Farrance, modelo WF 10071, do Laboratório de Geotecnia da PUC-Rio vista na Figura 4.19. A velocidade de deslocamento escolhida foi de 0,6 mm/min a fim de minimizar a perda de teor de umidade no decorrer do ensaio.

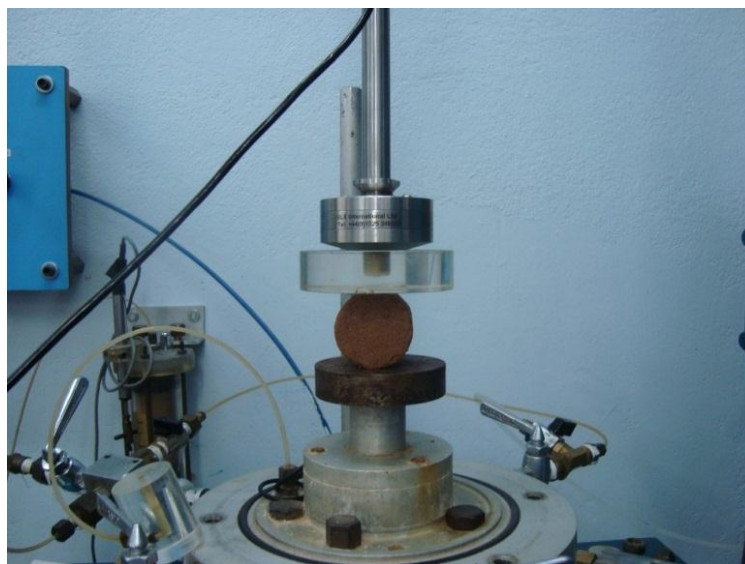


Figura 4.19. Esquema do ensaio de compressão diametral

#### **4.3.6. Ensaio furo de agulha – “Pinhole”**

Este ensaio foi realizado seguindo a norma NBR 14114 que permite observar a erodibilidade do solo, passando um fluxo de água destilada através de um pequeno furo realizado axialmente no corpo de prova. O ensaio é utilizado para classificar os solos argilosos respeito a sua dispersibilidade, seguindo a seguinte ordem, não dispersivo, incipientemente dispersivo, levemente dispersivo, moderadamente dispersivo, dispersivo e altamente dispersivo. Para isso é observada a cor do efluente e é medida a vazão dele. Em alguns casos é realizada a medição do furo após o termino do ensaio com o intuito de comparar a mudança do diâmetro. Essa medição pode ser útil também para a classificação do solo segundo a sua dispersão.

O ensaio é realizado com corpos de prova com 5 cm de diâmetro e 5 cm de altura, à semelhança dos corpos de prova empregados no ensaio de compressão diametral. O processo de confecção dos corpos de prova obedeceu à mesma metodologia descrita no item 4.45.

Foram confeccionados 54 corpos de prova e armazenados em caixas de isopor para realizar três grupos de ensaios. O primeiro grupo com os corpos de prova armazenados durante dois meses, um segundo grupo com corpos de prova armazenados por cinco meses e um terceiro grupo com corpos de prova armazenados por um ano.

Decorrido o tempo de armazenamento, o corpo de prova é retirado da caixa de isopor e o papel filme é removido com a ajuda de um estilete. O corpo de prova é então posicionado em uma bancada e talhado, com a ajuda de um estilete, no intuito de ser inserido no tubo cilíndrico de acrílico (Perspex®) com 35,7 mm de diâmetro e 100 cm de altura, conforme mostra a Figura 4.20.



Figura 4.20 Procedimento de moldagem do corpo de prova

Em seguida, realiza-se um furo com uma agulha de 1 mm de diâmetro, este furo é realizado na parte central do corpo de prova na parte central do corpo de prova, como mostra a Figura 4.21(a). Uma vez realizado o furo, insere-se duas malhas com abertura milimétrica em ambos os lados do corpo de prova como pode ser observado na Figura 4.21 (b). Após a colocação das malhas, preenche-se o tubo com a colocação de areia grossa com diâmetro de grãos variando entre 2 e 4,8 mm.

(a)



(b)

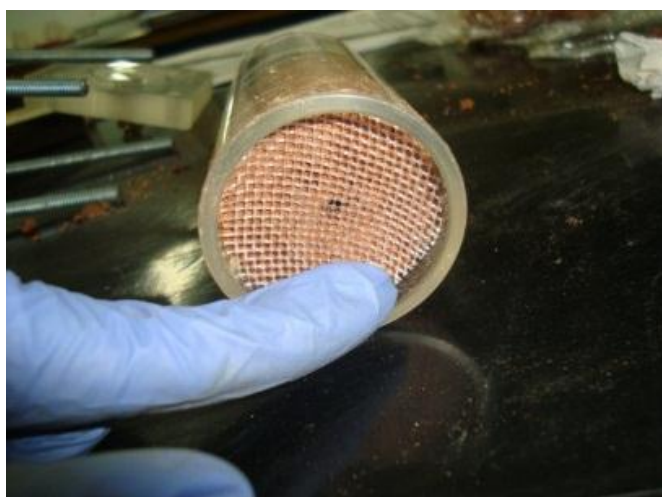


Figura 4.21 (a) Realização do furo no corpos de prova (b) Malha milimétrica colocada na montagem do ensaio

Em seguida duas placas de acrílico são fixadas ao tubo com o auxílio de quatro barras roscadas de  $\frac{1}{4}$ " de diâmetro de aço inoxidável. A fixação é realizada com porcas e arruelas conforme mostra a Figura 4.22. Cada placa possui em uma da sua extremidade um anel de vedação com 3mm de espessura para garantir estanqueidade ao conjunto.





Figura 4.22 Cilindro de PVC preenchido pronto para realizar o ensaio

No decorrer do ensaio, uma carga hidráulica constante é aplicada em uma das extremidades do corpo de prova e a vazão do efluente e a sua aparência são monitorados. A carga hidráulica constante é mantida através do emprego de um vaso de Mariotte. A NBR 14114 recomenda a aplicação de cargas de 50 mm, 180 mm, 380 mm e 1020 mm. A vazão do efluente é medida através de uma balança analítica conforme mostra a Figura 4.23.



Figura 4.23 Montagem do ensaio

O efluente é despejado em um Becker por intermédio de um tubo plástico. A massa do efluente medida pela balança é convertida em volume, assumindo que a densidade do efluente seja  $1 \text{ Mg/m}^3$ .

No decorrer do ensaio, observa-se a aparência do efluente que deve ser classificado como claro, moderadamente escuro ou escuro.

A carga aplicada inicialmente no ensaio é 50 mm, e a cada minuto calcula-se a vazão do efluente até que se atinja 5 minutos do ensaio. Decorridos 5 minutos é necessário classificar a aparência do efluente.

Caso o efluente esteja escuro, continua-se o ensaio até que se complete 10 minutos. Persistindo esta aparência, classifica-se o material altamente dispersivo. No caso do efluente ser moderadamente escuro, repete-se o procedimento até que se decorra 10 minutos. Caso o efluente persista com a mesma aparência a vazão. No caso da vazão ser inferior a  $0,8 \text{ cm}^3/\text{s}$  o material é considerado como moderadamente dispersivo e se caso seja superior a  $1 \text{ cm}^3/\text{s}$  é considerado dispersivo.

Caso a aparência do efluente seja claro com a carga de 50 mm e a vazão estiver entre  $0,3$  a  $0,5 \text{ cm}^3/\text{s}$ , a carga é incrementada para 180 mm durante 5 minutos. Decorrido este intervalo de tempo, e se a aparência do efluente for moderadamente escura ou escura o material é considerado levemente dispersivo.

Por outro lado, mesmo com uma carga de 180 mm o efluente continue claro, é necessário aumentá-la para 380 mm e verificar a aparência do efluente e medir a vazão por 5 minutos.

Decorrido este intervalo, se o efluente permanecer levemente escuro ou escuro, o material é considerado levemente dispersivo. Caso a sua aparência seja clara deve-se continuar o ensaio com uma carga a 1020 mm por 5 minutos.

Decorrido este intervalo, caso o efluente esteja levemente escuro ou escuro o material é considerado incipientemente dispersivo e caso o efluente continuar claro trata-se de um material não dispersivo.

#### **4.4.**

#### **Ensaio complementares**

##### **4.4.1.**

##### **Determinação da capacidade de troca catiônica**

A capacidade de troca catiônica (CTC) foi determinada empregando a técnica do azul de metileno estabelecida por Casanova (1986), que é baseada na norma ASTM C837-84. Os ensaios foram conduzidos nas dependências do Laboratório de Geotecnia do Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio.

O método emprega uma alíquota de 1 grama de material passado na peneira #40. Em seguida é adicionada uma solução tampão (50mL) para manter o pH neutro. A solução resultante é mantida em agitação por 5 minutos. Posteriormente é acrescentado o azul de metileno na concentração de 1 g/L, sempre com a solução em agitação (coloca-se 1mL agitando por 1 minuto).

Após esta homogeneização coleta-se um pouco da solução e coloca-se uma gota no papel filtro Whatman N° 40 verificando a formação de uma auréola.

É repetido o procedimento até formar a auréola azul claro ao redor da gota, e a partir do volume de azul de metileno gasto, é calculado o valor de CTC como mostra a equação 4.5.

$$CTC = \frac{C \times v}{W_a} \times 100 \quad 4.5$$

Onde CTC é a Capacidade de Troca de Cátions (meq/100g de solo), C é a Concentração do azul de metileno (1meq/L), v é o volume gasto (L) e Wa é o peso da amostra seca (g).

Este ensaio, da mesma forma dos ensaios de avaliação da erodibilidade, foi realizado em material de desmonte com diferentes porcentagens de substância húmica proveniente do rejeito de carvão mineral extraída no laboratório do departamento de engenharia de materiais da PUC-Rio, além de um solo com adição de uma substância húmica comercial proveniente do carvão.

#### **4.4.2. Determinação de matéria orgânica**

A determinação da matéria orgânica foi realizada seguindo os procedimentos estabelecidos na Norma NBR 13600, analisando o teor de matéria orgânica em corpos de prova armazenados durante dois, cinco e doze meses, com diferentes porcentagens de substância húmica PUC-Rio e comercial.

##### **4.4.2.1. Composição elementar da matéria orgânica das misturas substancia húmica- material de desmonte**

A composição elementar da matéria orgânica foi realizada com o intuito de determinar o teor de carbono, nitrogênio e hidrogênio presente na mistura substâncias húmicas- material de desmonte oriundo de mineração de rocha ornamental. A determinação seguiu os procedimentos estabelecidos na norma ASTM D5291. As análises foram realizadas nas dependências do Laboratório de Análise e Caracterização Química, do departamento de Química da PUC-Rio.

#### **4.4.3. Ensaio de microscopia**

##### **4.4.3.1.1. Microscopia ótica**

As lâminas empregadas nas análises de microscopia ótica foram confeccionadas no Departamento de Geologia do Instituto de Geociências da UFRJ. O procedimento consistiu no desbaste mecânico de amostras indeformadas previamente secas e lentamente impregnadas com Araldite e corante Azul de



Metileno resultando em uma espessura final de 30  $\mu\text{m}$ . O corante azul foi utilizado com o intuito de visualizar o espaço dos poros nas das lâminas

Foram confeccionadas 12 (doze) lâminas a partir de seis corpos de prova armazenados por dois meses, 12 (doze) lâminas a partir de seis corpos de prova armazenados por cinco meses e 12 (doze) lâminas a partir de seis corpos de prova armazenados por um ano. As lâminas forma confeccionadas no eixo vertical e no eixo horizontal de cada corpo de prova.

Empregou-se um microscópio ótico da marca Carl Zeiss, modelo Axio Scope A1, equipado com uma câmera microscópica de alta resolução AxioCam MRc Rev. 3 Fire Wire. O equipamento pertence ao Grupo de Tecnologia e Engenharia de Petróleo (GTEP) do Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio, e pode ser observado na Figura 4.24.

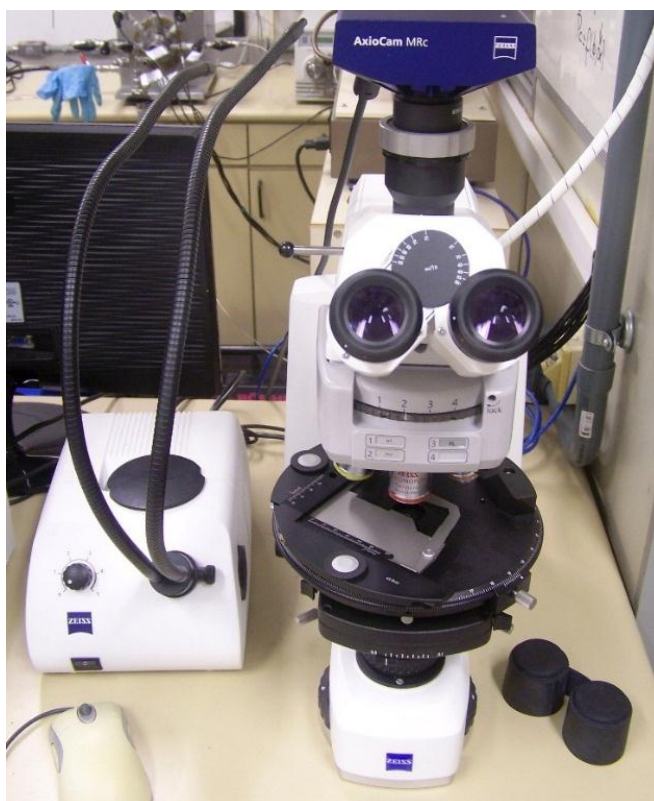


Figura 4.24 Microscópio ótico utilizado

#### 4.4.3.1.2.

##### Microscopia eletrônica de varredura

As análises de microscopia eletrônica foram realizadas em microscópio eletrônico de varredura da marca Hitachi, modelo TM 3000 acoplado a um EDS (espectrômetro por dispersão de energia) da marca Oxford modelo SwiftEDS<sup>+</sup>. O sistema pertence ao Laboratório de Processamento Químico do Departamento de Engenharia Química e de Materiais da PUC-Rio e pode ser observado na Figura 4.25.

Os corpos de prova utilizados nas análises de microscopia eletrônica de varredura possuíam formato cúbico com 1 cm de aresta.

Foram realizadas análises em uma amostra contendo 5% de substância húmica e outra que não continha substância húmica. Ambas foram armazenadas durante 20 meses.



Figura 4.25 Microscópio eletrônico de varredura utilizado

#### **4.4.4. Ensaio microbiológicos**

##### **4.4.4.1.**

#### **Técnica dos tubos múltiplos**

A técnica dos tubos múltiplos é um método probabilístico que permite determinar o número mais provável de microrganismos presentes na amostra de solo. O ensaio foi realizado no laboratório de microbiologia do laboratório de Geotecnia da PUC-Rio. A técnica se encontra estandardizada por a American Public Health Association (1999)

##### **4.4.4.2. Contagem de microrganismos em placa**

O ensaio foi realizado no laboratório de microbiologia do laboratório de Geotecnia da PUC-Rio. A contagem de microrganismos é feita através da técnica de derramamento em profundidade, onde uma amostra de solo (1g) é suspensa em água estéril e diluída sucessivamente ( diluições de até 10 vezes) . Uma alíquota de 0,1 ml de cada diluição foi colocada em uma placa Petri estéril com aproximadamente 20 mL de meio solido Tryptone Soya Agar ( TSA 10%) previamente fundido.

Foram feitas triplicatas para cada diluição e a pós uma semana de incubação a 25°C aproximadamente, as colônias de microrganismos foram contadas com auxílio de uma lupa acoplada a um transluminador.

Considerando que cada colônia deve ser oriunda da multiplicação de uma única célula, o número de colônias corresponde ao número original de microrganismos colocados no meio denominados Unidades Formadoras de Colônias. São considerados validos os resultados em placas com conteúdo entre 30 e 300 colônias.

#### **4.4.5. Limite de plasticidade**

Os ensaios para determinar o limite de Plasticidade ( $\omega_p$ ) em amostras de material de desmonte com adição de substâncias húmicas em diferentes porcentagens foram realizados para determinar se a substância húmica outorga plasticidade ao material. Foram seguidos os procedimentos estabelecidos na norma NBR 7180.

## 5. Apresentação e Discussão dos Resultados

### 5.1.Caracterização Geotécnica

O programa experimental buscou, na medida do possível, reproduzir as condições *in loco* do material de desmonte disposto na pilha. Assim sendo, a primeira preocupação foi obter os valores do peso específico e do teor de umidade *on site*. Estes valores estão dispostos na Tabela 5.1.

Tabela 5.1- Parâmetros do solo no local da amostragem

Parâmetro	Valor
Teor de Umidade Natural	23 %
Peso Específico Natural	16,68 KN/m <sup>3</sup>
Peso Específico Seco	13,55 KN/m <sup>3</sup>

As demais propriedades do material de desmonte foram obtidas a partir das amostras deformadas através dos ensaios laboratoriais indicados no Capítulo 4. A Curva de distribuição granulométrica do material de desmonte é vista na Figura 5.1, enquanto que os valores correspondentes ao teor de cada fração de solos que compõe o material, aos seus limites de consistência (*i.e.*, Atterberg), à densidade dos grãos e ao teor de matéria orgânica estão dispostos na Tabela 5.2.

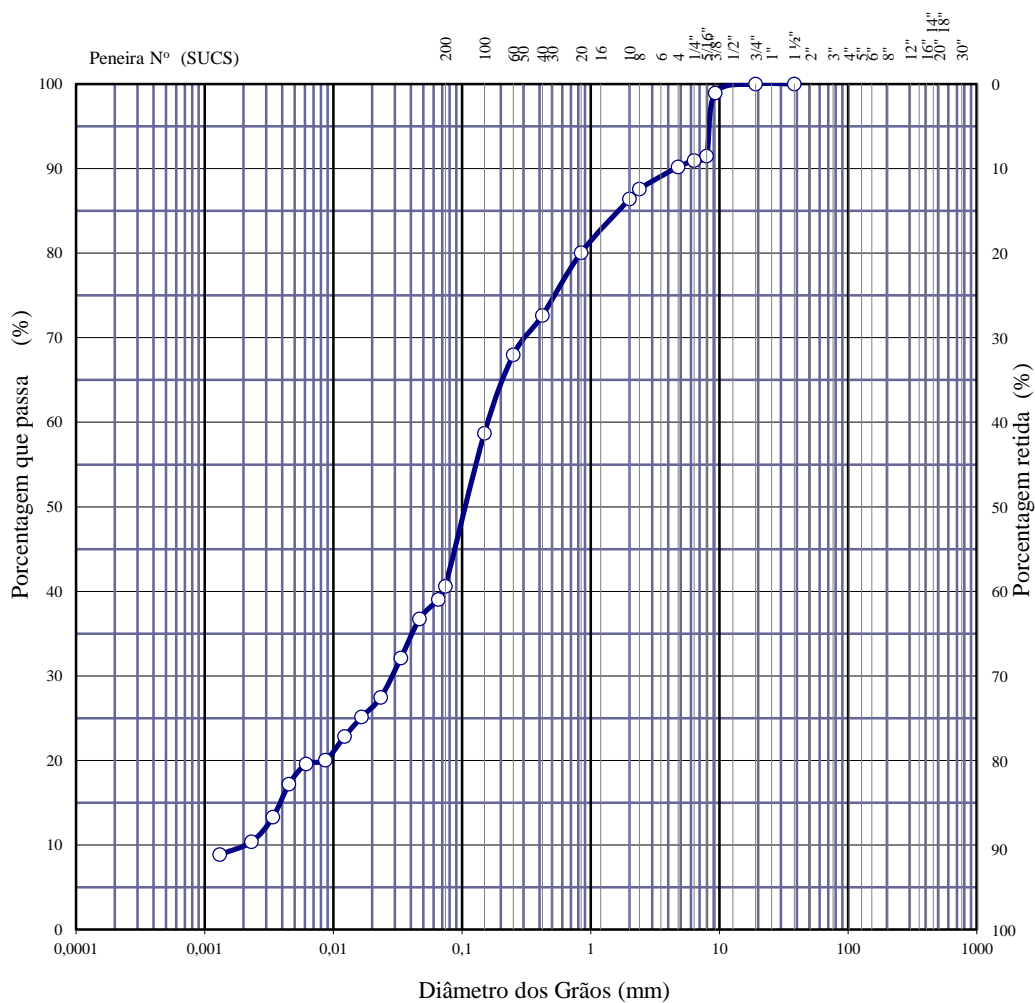


Figura 5.1 Curva de distribuição granulométrica do material de desmonte

Tabela 5.2- Caracterização geotécnica

<b>Distribuição Granulométrica</b>	Pedregulho médio 9,2% Pedregulho fino 4,4% Areia grossa 10,6% Areia média 12,4% Areia fina 25% Silte 28,5% Argila 9,9%
<b>Limites de consistência</b>	WL 32% WP não plástico
<b>Densidade das partículas</b>	2,68
<b>Teor de matéria orgânica</b>	0,31%

A partir dos resultados da análise de distribuição granulométrica e dos limites de Atterberg foi possível caracterizar o material de desmonte utilizando a Classificação Unificada de Solos presente na Norma ASTM 2488. Segundo a referida classificação o material de desmonte apresenta características típicas de uma areia siltosa.

A determinação do valor do teor de matéria orgânica foi realizada a partir da medição do teor de carbono orgânico (TOC) presente no material. Decidiu-se por não utilizar o método previsto na Norma Brasileira NBR 13600, que emprega a secagem prévia do material em estufa e o seu posterior aquecimento em forno mufla por temer que a aplicação de temperaturas superiores a 250°C possam alterar a mineralogia dos sólidos que compõe o material de desmonte. Esta alteração pode acarretar em perda de massa que possa vir a ser computada como uma possível matéria orgânica no cálculo do teor de matéria orgânica pelos procedimentos estabelecidos na NBR 13600.

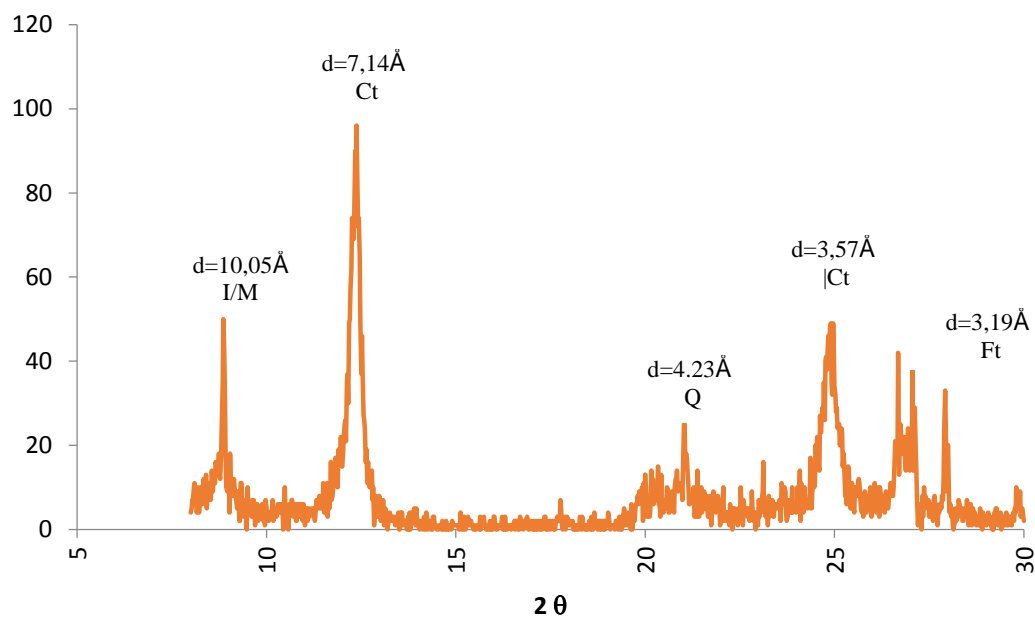
Aliás, a preocupação com a alteração da composição do material de desmonte com a temperatura foi objeto de cautela no programa experimental realizado. Na medida do possível, o material foi sempre seco ao ar evitando ao máximo a utilização de estufa. Esta, quando foi empregada, estava sempre fixada em 60°C para minimizar a queima de matéria orgânica. A exceção ocorreu no caso da determinação do teor de umidade gravimétrico, onde a Norma Brasileira NBR 6457 recomenda o emprego de temperaturas entre 105° a 110°C.

## **5.2.**

### **Caracterização Mineralógica**

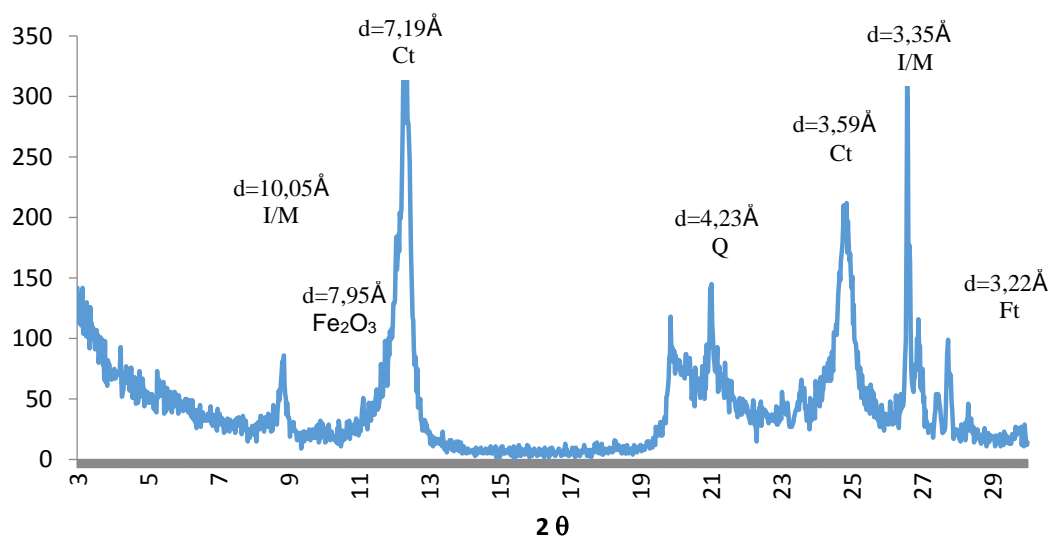
As Figura 5.2 e 5.3 apresentam os difratogramas relativos as análises realizadas nas amostras do material de desmonte passantes nas peneiras #200 e #400, respectivamente. A identificação dos minerais encontra-se nas legendas que foram posicionadas ao lado dos picos de maior destaque dos gráficos. Nestas legendas também foram adicionadas os valores da distância interplanar de cada mineral (d).

Foi possível perceber a presença de diferentes fases cristalinas, incluindo o quartzo (Q), o feldspato (Ft), a caulinita (Ct), e a ilita (I/M) proveniente da decomposição da mica, como também do óxido ferroso (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>).



Ct =Caulinita    Q=Quartzo    Ft= Feldspato    I/ M=Ilita / Mica

Figura 5.2 Difratoograma do material de desmonte passante na peneira N° 200



Ct =Caulinita    Q=Quartzo    Ft= Feldspato  
I/ M=Ilita / Mica     $\text{Fe}_2\text{O}_3$  = Óxido Ferroso

Figura 5.3 Difratoograma do material de desmonte passante na peneira N° 400

Os resultados das análises químicas, apresentados nas Tabelas 5.3e 5.4, foram fundamentais para a análise dos difratogramas. O óxido ferroso confere a coloração



avermelhada a amostra do material. O  $\text{SiO}_2$  é um indicativo da presença de quartzo no material.

Tabela 5.3 - Minerais presentes no solo em forma de óxidos

Óxido	%
$\text{SiO}_2$	52,7
$\text{Al}_2\text{O}_3$	30,9
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	8,35
$\text{K}_2\text{O}$	3,08
$\text{MgO}$	1,81
$\text{TiO}_2$	1,07
$\text{CaO}$	0,7
$\text{Na}_2\text{O}$	0,501
$\text{BaO}$	0,144

Tabela 5.4- Porcentagem de cada elemento presente no solo

Elemento	%
O	47,3
Si	24,6
Al	16,3
Fe	5,84
K	2,56
Mg	1,09
Ti	0,64
Ca	0,5
Na	0,371
Ba	0,129

Os feldspatos são formados quando o  $\text{Al}^{3+}$  substitui o  $\text{Si}^{2+}$  na estrutura cristalina do  $\text{SiO}_2$ . A composição da maioria dos feldspatos também possui K, Na e Ca. O Ba está presente nos feldspato barianos (*e.g.*, celsiano e hialofano).

O silício também está presente na estrutura de folhas de tetraedro do filosilicatos. Já o Al está presente nas folhas dos octaedros dos filosilicatos conforme indicam Klein e Dutrow (2012). Os autores também mencionam que o Mg e o Fe

são os cátions bivalentes presentes nestas folhas. A junção das folhas tetraédricas e octaédricas dão origem à geometria da caulinita.

Já o cátion monovalente K está presente na constituição dos filosilicatos do grupo das micas. Segundo Klein e Dutrow (*op. cit.*), ele pode estar presente no grupo das micas trioctaédricas, sendo o cátion interlamelar univalente, ou no grupo dioctaédrico. O Ti é um dos constituintes raros de algumas micas. Porém face à grande quantidade de K encontrado nas amostras, acredita-se que os picos encontrados nos difratogramas a uma distância interbasal de 10,05 Å, possa estar relacionado a um mineral deficiente em álcalis, como é o caso da illita. A baixa concentração de Na, Ca e Ba encontradas nas amostras corroboram com esta hipótese. Face à esta incerteza, resolveu-se denominar I / M (illita / mica) aos minerais encontrados nos picos com distância interbasal de 3,35 e 10,05 Å.

### 5.3.

#### **Ensaio de laboratório para avaliar a erodibilidade**

##### 5.3.1.

##### **Ensaio de desagregação**

Os ensaios de desagregação foram realizados submergindo os corpos de prova em água deionizada. A opção pela utilização de água deionizada foi feita visando a garantir uma melhor reprodutibilidade dos ensaios posto que ter-se-ia uma maior homogeneidade na solução aquosa empregada no programa experimental.

Ciente das preocupações expostas em Maharaj (2011) sobre o efeito da solução nos resultados do ensaio optou-se pelo uso da água deionizada face à pequena proporção da fração argila na massa do material. Ademais, a fração argila é composta por caulinita e illita, e embora a illita seja um argilomineral 2:1 a sua atividade é bem restrita quando em comparação a filosilicatos do grupo das esmectitas.

A avaliação foi realizada em corpos de prova com idades distintas (*e.g.*, dois, cinco e doze meses de armazenamento). Em cada faixa foram ensaiados cinco corpos de prova com diferentes porcentagens de substância húmica PUC-Rio (*e.g.*, 0%SH, 0,5%SH, 1%SH, 3%SH, 5%SH) e um corpo de prova com 1% da substância

húmica comercial. Os ensaios, em cada grupo, foram realizados em triplicata como mostrado no esquema da Figura 5.4.

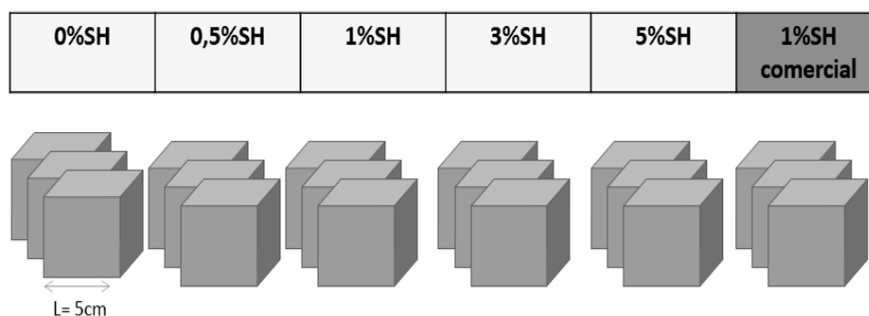


Figura 5.4. Esquema de repetições do ensaio de desagregação.

Decorrido o intervalo de armazenamento pretendido, os corpos de prova tiveram novamente as suas dimensões e massas medidas para efeito de controle. A Tabela 5.5 apresenta os resultados das medições.

Tabela 5.5- Parâmetros dos corpos de prova do ensaio de desagregação.

Tempo de Armazenamento	Parâmetro	0%SH	0,5%SH	1%SH	3%SH	5%SH	1%SH Comercial
2 meses	$\gamma$ (KN/m <sup>3</sup> )	16,58	16,48	16,28	16,58	16,78	16,68
	Teor de Umidade (%)	22,75	22,46	22,51	22,84	22,85	22,70
5 meses	$\gamma$ (KN/m <sup>3</sup> )	16,78	16,87	16,97	16,97	17,07	16,58
	Teor de Umidade (%)	22,7	23,07	22,26	22,3	22,04	21,74
12 meses	$\gamma$ (KN/m <sup>3</sup> )	16,87	16,87	16,97	16,97	17,07	16,48
	Teor de Umidade (%)	22,4	20,72	21,56	21,22	25,00	21,20

No decorrer do manuseio dos corpos de prova cilíndricos para a realização das referidas observações observou-se a presença de fungos em suas superfícies, conforme ilustra a Figura 5.5. Este fato a princípio foi motivo de preocupação face à sabida ação de fungos e subprodutos do metabolismo de outros microrganismos como elementos aglutinantes das partículas, conforme relataram Abiven *et al.* (2009).

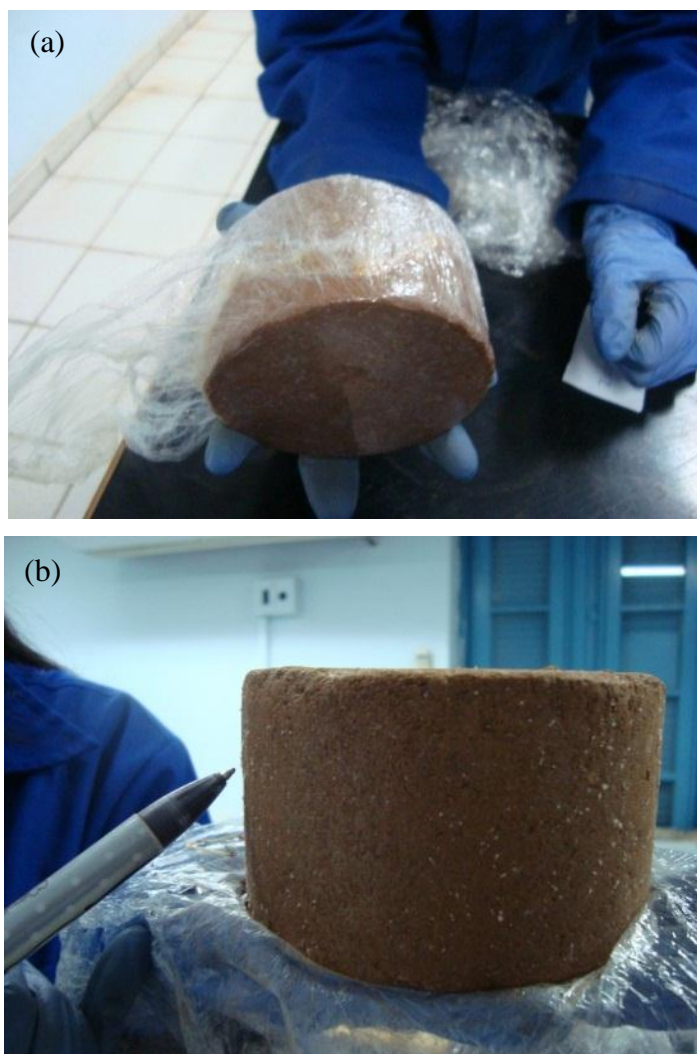


Figura 5.5 (a)Corpo de prova após da armazenagem ainda com o papel filme (b) corpo de prova apresentado fungos na superfície do solo.

No entanto, esta preocupação revelou-se desmerecida a partir das observações realizadas quando da confecção dos corpos de prova cúbicos a partir dos corpos de prova cilíndricos. As operações, descritas no Capítulo 4, não revelaram a presença de fungos nas aparas de corte. Acredita-se que os fungos foram originários a partir da exsudação de umidade no decorrer do processo de armazenamento e que eles se desenvolveram no contato entre a superfície do corpo de prova e o filme de PVC, um ambiente propício para o desenvolvimento dos microrganismos presentes no solo.

Após a confecção dos corpos de prova cúbicos, verificou-se uma pequena alteração da cor em razão da adição das substâncias húmicas nas diferentes concentrações.

Ao compararmos as cores dos corpos de prova com as matizes padrões de solo estabelecidas em Munsell (1975), verificou-se que os corpos de prova sem substância húmica e àqueles em que foram incorporadas menores quantidades da substância PUC-Rio (*i.e.*, 0,5%SH, 1%SH, 3%SH) podem ser caracterizados no tocante a cor como amarelo avermelhado (5YR 7/6 na classificação Munsell). Já os corpos de prova com conteúdo de 5%SH da substância PUC-Rio e 1% da substância com 1% do composto húmico comercial podem ser caracterizados no tocante a cor como avermelhado marrom (5YR 6/4 na classificação Munsell).

Verificou-se nos ensaios de desagregação realizados com os corpos de prova de diferentes idades de armazenamento uma relação inversamente proporcional entre a percentagem de incorporação de substância húmica e a erodibilidade. Esse fato pode ser observado na Figura 5.6 que mostra uma fotografia retirada decorridos sete minutos de ensaio com corpos de prova armazenados por um intervalo de dois meses com diferentes teores da substância PUC-Rio.

Quanto aos resultados dos ensaios realizados nos corpos de prova com a substância húmica PUC-Rio e a comercialmente disponível verificou-se uma semelhança no padrão de comportamento do corpo de prova com 5% substância húmica PUC-Rio e o corpo de prova da substância comercial. A razão de a substância comercial apresentar uma melhor eficácia pode estar relacionada com a sua composição química elementar, posto que ela apresenta uma maior percentagem de C, N, H conforme indica a tabela 5.6

Tabela 5.6- Composição química elementar das substâncias húmicas

<b>Substância</b>	<b>C</b>	<b>N</b>	<b>H</b>
PUC-Rio	11,6%	1,8%	1,3%
Comercial	55,25%	0,95%	3,93%

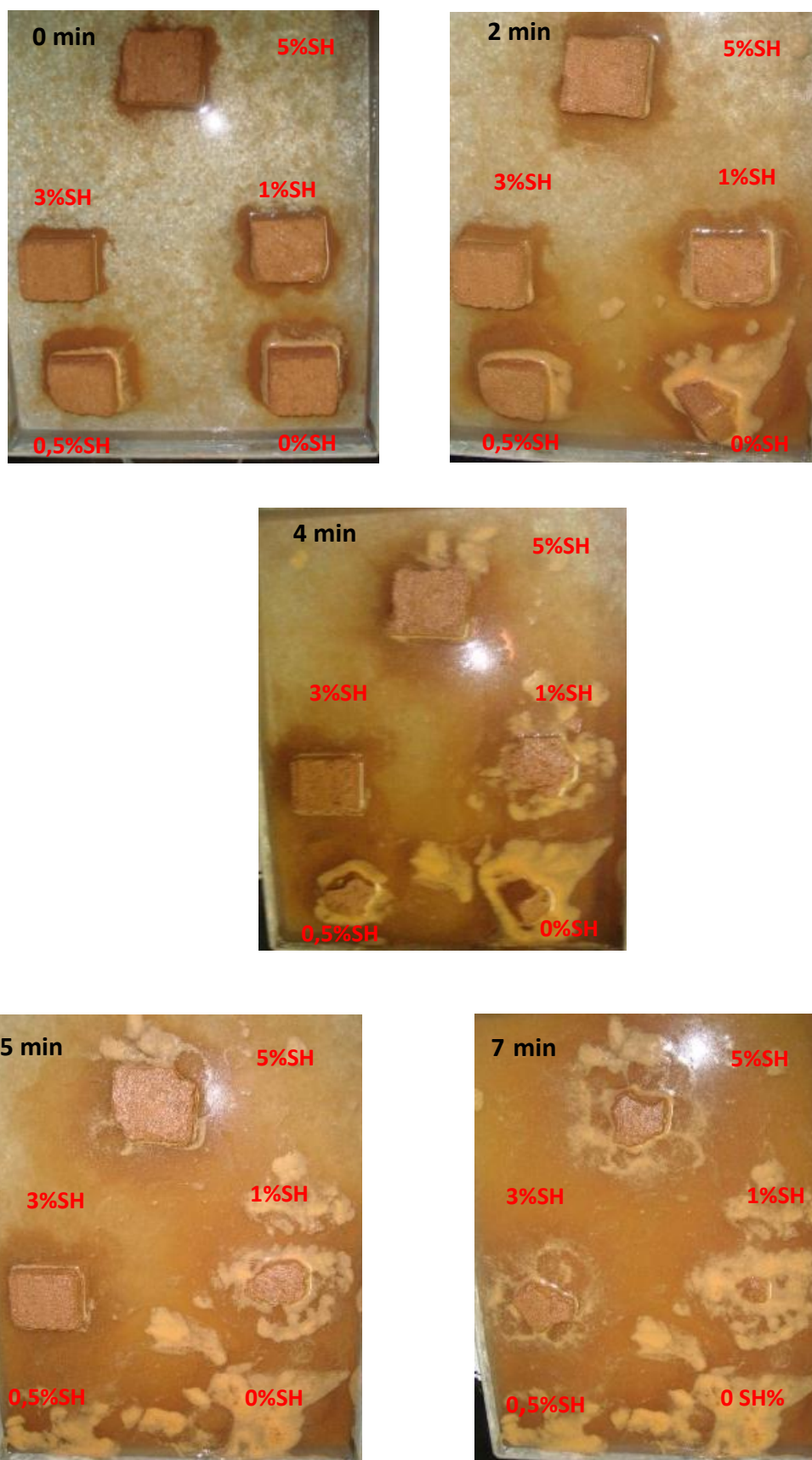


Figura 5.6 . Ensaio de desagregação com corpos de prova armazenados durante dois meses.

A Figura 5.7 mostra que após 10 minutos de ensaio os corpos de prova já não apresentam mais uma forma definida, tanto àqueles com a substância PUC-Rio quanto aquele com a substância comercial.

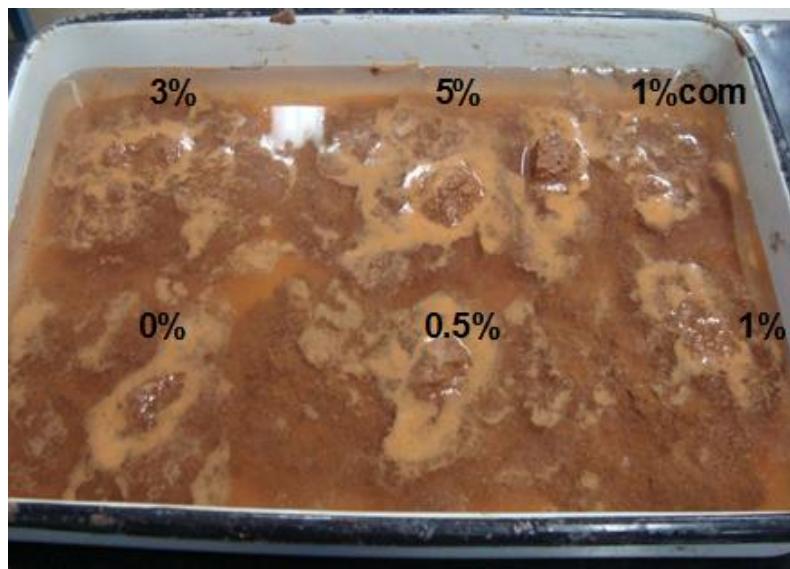


Figura 5.7. Ensaio de desagregação após 10 minutos de ter começado o ensaio corpos de prova com 2 meses de armazenamento

Observou-se ainda o mesmo padrão de comportamento nos ensaios de desagregação para os corpos de prova com diferentes idades de armazenamento, como pode ser visto na Figura 5.8 nos ensaios com corpos de prova com idade de cinco meses o único cubo que não se desagregou foi aquele com teor de 5% de substância húmica PUC-Rio.

Um terceiro grupo de corpos de prova foi testado decorridos 12 meses de armazenamento. Depois de transcorridos 10 minutos do ensaio, o cubo correspondente ao corpo de prova com 5% de incorporação da substância húmica PUC-Rio ainda permanecia praticamente intacto como pode ser observado na Figura 5.9.



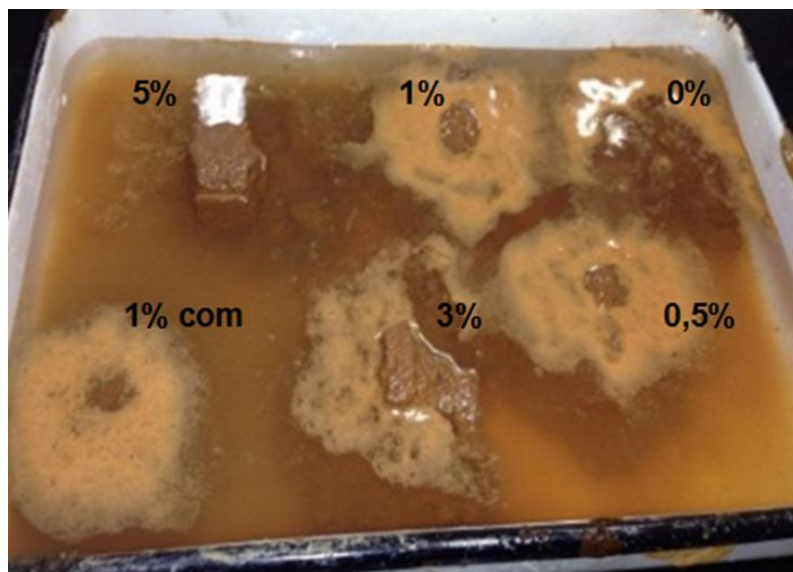


Figura 5.8. Ensaio de desagregação após 10 minutos de ter começado o ensaio corpos de prova com 5 meses de armazenamento.

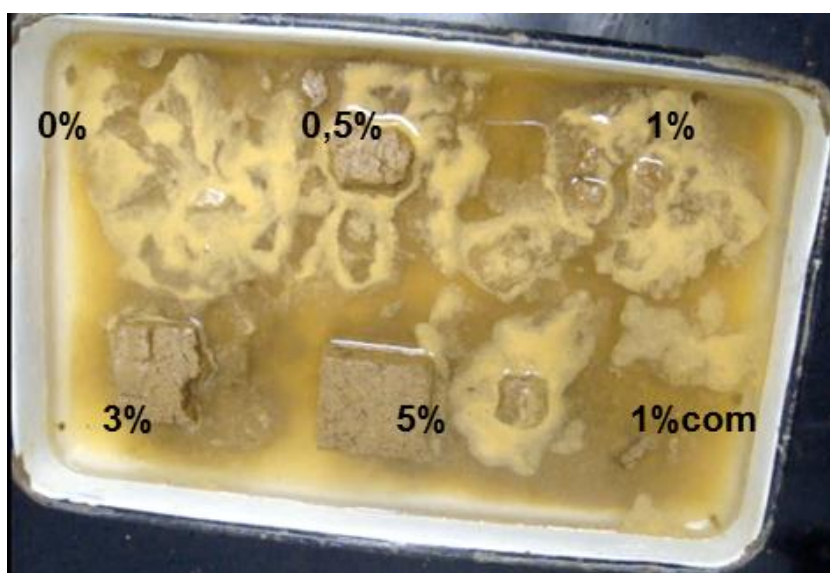


Figura 5.9 Ensaio de desagregação após 10 minutos de ter começado o ensaio corpos de prova com 12 meses de armazenamento.

Os resultados dos testes permitem sugerir que a adição de substâncias húmicas pode reduzir a erodibilidade de materiais arenosos. Verificou-se que a erodibilidade é reduzida não somente com o aumento do teor de incorporação, mas também com o tempo de residência da substância húmica.

Este fato é corroborado por estudos realizados por outros pesquisadores. Lopez *et al.* (2006) chegaram a conclusões semelhantes quando incorporaram substâncias húmicas a um solo silto argiloso. Os autores sugerem que a aplicação de substâncias húmicas pode melhorar a agregação das partículas destes solos.



No entanto, faz-se aqui uma ressalva que um solo natural proveniente do Horizonte A possui em sua constituição as suas próprias substâncias húmicas. A adição de um novo tipo de substância pode acarretar na modificação da própria estrutura deste solo. Os resultados dos estudos realizados por Vetterlein e Hüttl (1999) e Senesi *et al.* (2007) sugerem que as alterações ocorridas nas substâncias húmicas do solo em virtude da incorporação de uma nova substância húmica tornam-se cada vez menos aparente com o passar do tempo, indicando haver uma clara tendência de homogeneização na constituição da matéria orgânica presente neste solo.

Por outro lado, ressalta-se que o material empregado no presente estudo teve a sua estrutura alterada quando da remoção da capa de solo e da sua posterior disposição na pilha de material de desmonte. Face à sua textura arenosa e a inexistência de plasticidade, aliada a existência de poros com maior volume, as substâncias húmicas a ele incorporada podem ter se alojado em seus poros melhorando, assim, o comportamento de agregação das partículas. Esta hipótese está baseada nos resultados dos estudos realizados por Martens (2000) e Spaccini *et al.* (2004) que mencionam que a adição de matéria orgânica induz uma maior agregação às partículas de solo.

### **5.3.2.**

#### **Ensaio de classificação da metodologia MCT**

Da mesma forma que o ensaio de desagregação, este ensaio foi realizado em três grupos com diferentes tempos de armazenamento das amostras (dois meses, cinco meses e um ano). As amostras receberam diferentes quantidades de substância húmica PUC-Rio e da substância húmica comercial.

Cada grupo de ensaios foi realizado com três repetições, em cada repetição foram ensaiadas cinco porções de material de 1,5 Kg com diferentes porcentagens de substância húmica PUC-Rio (0%, 0,5%, 1%, 3%, 5%) e uma porção de solo de 1,5 Kg misturado com 1% de substância húmica comercial.

Com os ensaios Mini –MCV e os ensaios de comportamento a imersão pertencentes à metodologia MCT o material pode ser classificados dentro da classificação de solos tropicais. Conforme explicado no item 4.4.4, através das curvas mini MCV e curvas de compactação, são determinados os coeficientes  $c'$

(coeficiente de deformabilidade) e  $d'$  (coeficiente de compactação) e posteriormente com o ensaio de comportamento a imersão determinado o valor de perda por imersão  $P_i$  (%) e o coeficiente  $e'$  (índice de laterização), que são os valores utilizados na classificação MCT. Esses valores serão apresentados nas tabelas 5.7, 5.8 e 5.9 para cada grupo de ensaios, começando com o grupo de amostras armazenadas durante dois meses, posteriormente com as armazenadas por cinco meses y finalizando com amostras armazenadas um ano.

Tabela 5.7- Coeficientes do solo com 2 meses de armazenamento

% de substância húmica	$d'$	$c'$	$P_i$ (%)	$e'$
0% SH	17	1,06	45	1,17
0,5% SH	17	1,14	40	1,16
1% SH	20	1,07	40	1,12
3% SH	25	0,96	30	1,03
5% SH	100	0,90	45	0,87
1% SH comercial	20	0,96	40	1,12

Tabela 5.8- Coeficientes do solo com 5 meses de armazenamento

% de substância húmica	$d'$	$c'$	$P_i$ (%)	$e'$
0% SH	5	0,6	50	1,65
0,5% SH	10	0,9	30	1,32
1% SH	20	0,9	30	1,09
3% SH	50	0,9	32	0,9
5% SH	50	1,14	32	0,9
1% SH comercial	25	1,29	28	1,03

Tabela 5.9- Coeficientes do solo com 12 meses de armazenamento

% de substância húmica	$d'$	$c'$	$P_i$ (%)	$e'$
0% SH	20	0,9	20	1,06
0,5% SH	20	1,01	40	1,12
1% SH	22	0,80	23	1,04
3% SH	15	1,07	15	1,14
5% SH	40	1,29	50	1,00
1% SH comercial	20	0,90	16	1,05

Com os coeficientes mostrados nas tabelas anteriores, utilizando o ábaco mostrado no gráfico da Figura 5.10 se classifica o material de desmonte, as misturas do material com a substância húmica PUC-Rio em diferentes porcentagens (0,5%,1%;3%, 5%) e a mistura de material com 1% da substância húmica comercial. A Classificação representa o comportamento lateríticos com a letra “L” ou não laterítico “N” e a segunda letra se refere a areias “A”, arenoso “A’”, siltoso “S’”, argiloso “G’”.

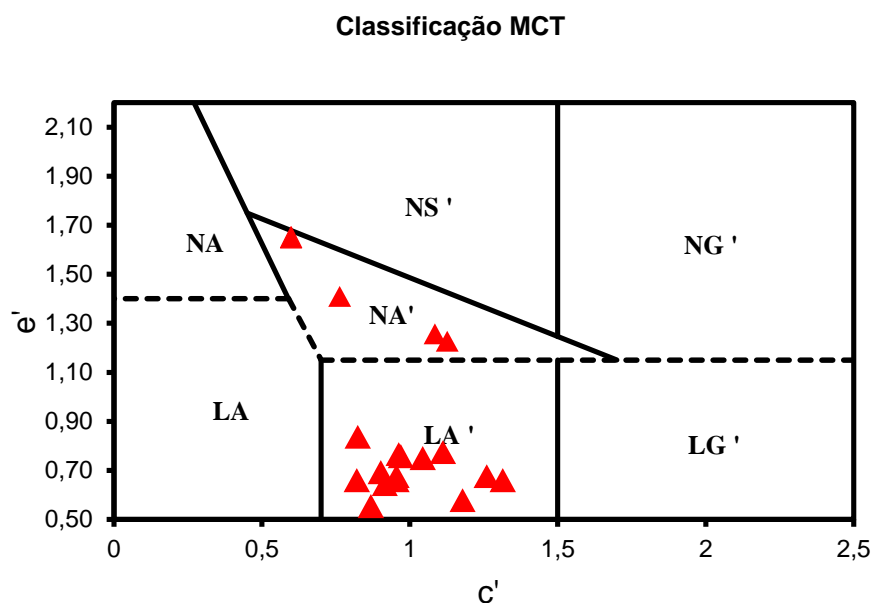


Figura 5.10 Classificação MCT

Segundo a classificação dos solos tropicais as amostras com 0% e 0,5% de substância húmica PUC-Rio com dois e cinco meses de armazenamento pertencem ao grupo de solos não lateríticos arenosos e as outras amostras com maior quantidade de substância húmica com o mesmo tempo de armazenamento estão classificadas como solos lateríticos arenosos.

Já as amostras armazenadas durante um ano todas elas são classificadas como solos lateríticos arenosos.

As amostras com adição de substância húmica comercial, todas elas foram classificadas como solos lateríticos arenosos. Um resumo dos resultados da classificação MCT pode ser observado na Tabela 5.10.

Tabela 5.10- Resumo da classificação do solo segundo a classificação da metodologia MCT

% de substância húmica	2 meses	5 meses	12 meses
0 % SH	NA'	NA'	LA'
0,5%SH	NA'	NA'	LA'
1%SH	LA'	LA'	LA'
3 % SH	LA'	LA'	LA'
5% SH	LA'	LA'	LA'
1 % SH comercial	LA'	LA'	LA'

Conforme explicado pelos autores da metodologia se espera que os solos lateríticos sejam solos mais resistentes à erosão em quanto os solos não lateríticos sejam mais susceptíveis a ela. Da mesma forma Nacinovic *et al.* (2014) que analisa a degradação do solo em áreas de cultivo, também comenta que solos lateríticos geralmente possuem boa agregação.

Lima (2003) e Burgos (1999) sugerem prudência na utilização da classificação MCT como indicador de erodibilidade. Porém os resultados do presente trabalho coincidem com Ramidam (2003), uma vez que as amostras que foram classificadas como solo lateríticos apresentam uma maior quantidade de substância húmica e um maior tempo de armazenamento o que justificaria este comportamento.

### 5.3.3. Ensaio de compressão diametral

O ensaio de compressão diametral ou ensaio brasileiro foi utilizado para determinar a resistência à tração do material de desmonte. Sabendo-se que a resistência à tração dos materiais particulados é oriunda de ligações entre as suas partículas, acredita-se que o valor da resistência a tração dos corpos de prova possa ser um bom indicativo na avaliação da redução da erodibilidade do material em função da incorporação das substâncias húmicas.

A avaliação foi conduzida empregando 54 (cinquenta e quatro) corpos de prova cilíndricos com 5 cm de diâmetro e 5 cm de altura. Os corpos de prova foram confeccionados empregando os procedimentos descritos no item 4.5.5 .

À semelhança do programa de ensaios de desagregação, os corpos de prova foram agrupados em três grupos para proporcionar a avaliação com o tempo da incorporação de substâncias húmicas contendo 0%, 0,5%, 1%, 3%, e 5% da substância PUC-Rio e 1% de uma substância húmica comercial. Os corpos de prova foram ensaiados em triplicata observando 2, 5 e 12 meses de armazenamento como demonstra o diagrama esquemático apresentado na Figura 5.11. As características de cada corpo de prova estão descritas no Anexo I, enquanto que os valores médios do peso específico e do teor de umidade dos corpos de prova estão apresentados nas Tabelas 5.11 e 5.12, respectivamente.

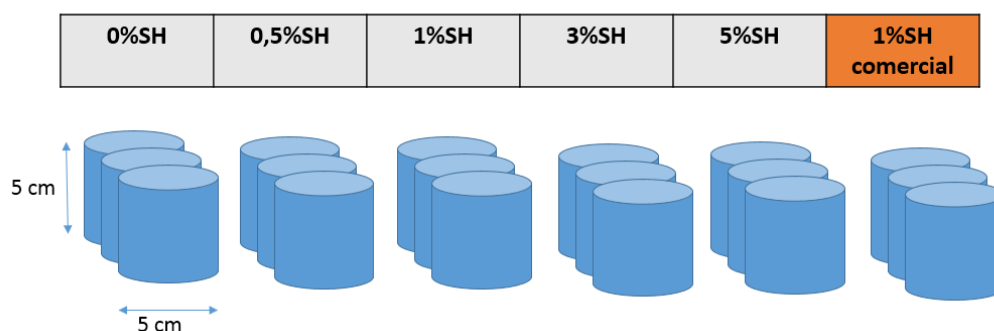


Figura 5.11. Esquema da repetição de um grupo de ensaios

Tabela 5.11- Peso específico dos corpos de prova

Peso específico $\gamma$ (KN/m <sup>3</sup> )						
Tempo de armazenamento	0%SH	0,5%SH	1%SH	3%SH	5%SH	1%SH comercial
2 meses	16,68	16,58	16,87	16,38	16,68	16,38
5 meses	16,19	16,48	16,09	16,48	16,09	16,19
12 meses	16,19	16,68	15,79	16,48	16,38	16,09

Tabela 5.12- Teor de umidade dos corpos de prova

Teor de Umidade ( %)						
Tempo de armazenamento	0%SH	0,5%SH	1%SH	3%SH	5%SH	1%SH comercial
2 meses	23,05	22,87	23,17	23,61	23,35	23,25
5 meses	20,83	20,70	19,77	20,30	18,86	19,59
12 meses	21,52	21,69	22,08	22,48	21,80	19,60

Os valores médios da resistência à tração do material resultantes da incorporação das substâncias húmicas estão descritos na Tabela 5.13. Ao analisar os resultados vistos na Figura 5.12, verifica-se um acréscimo no valor da resistência à tração dos corpos de prova em virtude do tempo de armazenamento. O acréscimo foi notado até nos corpos de prova em que não houve incorporação das substâncias húmicas. Este fato sugere que a ação da microbiota possa ter contribuído nesta elevação. Esta hipótese é consubstanciada pelo fato dos corpos de prova terem sido confeccionados com a adição de água deionizada. A ausência de cloro, um poderoso desinfetante, não dizimou a microbiota existente no material e permitiu a sua proliferação. Adicionalmente, foi constatada a presença de fungos na superfície dos corpos de prova ao final do período de armazenamento.

Tabela 5.13- Resistência à tração

Resistência à tração (KPa)						
Tempo de armazenamento	0%SH	0,5%SH	1%SH	3%SH	5%SH	1%SH comercial
0 meses	2,51	2,46	2,51	2,48	2,50	2,52
2 meses	2,75	2,73	2,75	2,75	3,49	3,08
5 meses	3,24	3,62	4,21	4,64	6,00	4,99
12 meses	3,23	3,76	4,12	4,93	6,74	4,29

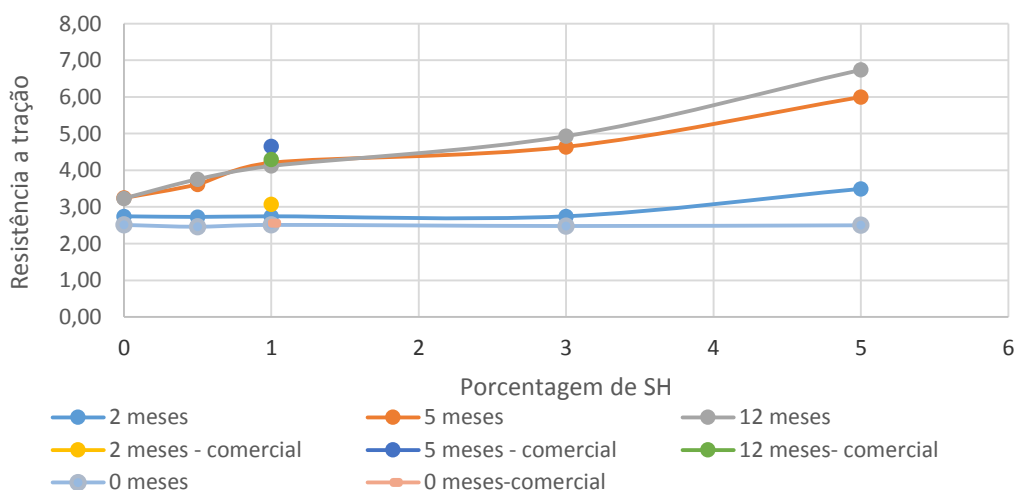


Figura 5.12 Representação gráfica da resistência a tração dos diferentes corpos de prova

Annabi *et al.* (2007) e Abiven *et al.* (2007) relataram o comportamento agregador de partículas pela ação de fungos. Segundo os autores, materiais com a presença de fungos resistem a maiores esforços de tração.

Sabe-se que determinados grupos de microorganismos produzem polissacarídeos que podem agir como agente cimentante e agregar as partículas, aumentando assim a resistência à tração do material particulado (Gadd, 2007; Daynes *et al.*, 2013; Abiven *et al.*, 2009). Decorrido o tempo inicial de aclimação ao novo meio, a taxa de crescimento da microbiota cresce, e a de produção dos seus metabólitos também, proporcionando uma elevação no valor da resistência à tração. No entanto, há uma série de fatores limitantes a uma expansão por um período mais longo da microbiota nos corpos de provas armazenados (*e.g.*, oxigênio, matéria orgânica, entre outros). Face à pequena disponibilidade de matéria orgânica presente nos corpos de prova, algo como 0,3%, em peso, acredita-se que após o período de estabilização possa se iniciar um catabolismo, o que poderia justificar a redução no valor da resistência à tração observada decorridos 12 meses de armazenamento.

Por outro lado, a incorporação de substâncias húmicas pode resultar numa maior estabilidade das partículas sólidas do material conforme relataram Schulten e Schnitzer (1997). Segundo os autores, a incorporação de substâncias húmicas pode acarretar no aparecimento de estruturas bi ou tridimensionais insolúveis que agem como agente cimentante aumentando a resistência à tração da matriz sólida. O acréscimo da resistência à tração de materiais particulados em virtude da presença de matéria orgânica também foi relatado por Rahimi *et al.* (2000) e Brunetti *et al.* (2007).

Oades (1984) e Six *et al.* (2004) sugerem que as substâncias húmicas contribuem para a formação de microagregados na matriz de materiais particulados, reduzindo o potencial de erodibilidade dos mesmos. A importância dos microagregados também foi observada dentro do estudo de Virto *et al.* (2008). Os autores indicaram que microagregados estáveis são formados com a conjunção de substâncias húmicas com partículas da fração silte e que podem armazenar carbono orgânico tanto por adsorção quanto por aprisionamento de pequenas partículas orgânicas.

Os resultados dos ensaios de compressão diametral também mostraram um acréscimo dos valores da resistência à tração nos corpos de prova que sofreram um

período maior de armazenamento. Este efeito também foi constatado por por Abiven *et al.* (2009). Segundo os autores, o efeito da adição de substâncias húmicas a materiais particulados apresentam menor intensidade inicial, porém propiciam uma maior agregação dos sólidos com o passar do tempo. De acordo com Monnier (1965), a estabilidade de substâncias húmicas a longo prazo é a sua principal vantagem em relação a outros tipos de produtos de fácil degradação, que conferem um efeito intenso na estabilidade de agregados nos instantes iniciais após a sua incorporação, porém este efeito é de curto prazo.

Abiven *et al.* (*op. cit.*) a matéria orgânica adicionada ao solo pode ter forte e direta consequência na coesão de materiais particulados a depender das suas próprias características físico-químicas. Segundo os autores, para materiais com grande quantidade de fração silte e areia, o desempenho das substâncias orgânicas se mostra eficiente na redução da sua erodibilidade.

De acordo com Borgues *et al.* (2013), a matéria orgânica presente em um material particulado é considerada o seu principal agente cimentante de partículas, posto que promove a agregação de suas partículas aumentando desta forma a estabilidade de seus agregados. Os autores mencionam ser primordial a sua manutenção no combate a erosão.

Em relação à magnitude dos valores da resistência à tração, verificou-se que os valores obtidos no programa experimental foram menores do que àqueles registrados por Araújo (2000), face ao material ensaiado por Araújo ter textura argilosa e ter mantido a sua estrutura preservada.

#### **5.3.4. Ensaio de furo de agulha – “Pinhole”**

O programa de ensaios de furo de agulha obedeceu ao procedimento descrito no item 4.4.6. A avaliação foi conduzida dentro do padrão de armazenamento estabelecido nos itens 5.3.2 e 5.3.3. Os valores médios do peso específico e do teor de umidade para cada taxa de incorporação e para cada tempo de armazenamento estão disponíveis nas Tabelas 5.14 e 5.15, respectivamente. O Anexo I apresenta os valores médio e do desvio padrão dos 54 corpos de prova confeccionados.



Tabela 5.14- Peso específico

<b>Peso específico (KN/m<sup>3</sup>)</b>						
<b>Tempo de armazenamento</b>	<b>0%SH</b>	<b>0,5%SH</b>	<b>1%SH</b>	<b>3%SH</b>	<b>5%SH</b>	<b>1%SH comercial</b>
2 meses	16,68	16,19	16,97	16,48	16,28	16,78
5 meses	16,48	16,48	16,78	16,09	16,38	17,07
12 meses	16,28	16,58	16,68	16,48	16,78	16,48

Tabela 5.15- Umidade dos corpos de prova

<b>Teor de Umidade ( %)</b>						
<b>Tempo de armazenamento</b>	<b>0%SH</b>	<b>0,5%SH</b>	<b>1%SH</b>	<b>3%SH</b>	<b>5%SH</b>	<b>1%SH comercial</b>
2 meses	21,63	22,02	22,17	22,27	21,89	23,01
5 meses	22,59	22,65	21,99	21,32	22,67	22,93
12 meses	21,90	22,09	22,65	22,77	21,92	21,65

Segundo a norma NBR 14114/1998, a classificação do solo quanto à dispersibilidade é apresentada da seguinte forma:

- Solo não dispersivo
- Solo incipientemente dispersivo
- Solo levemente dispersivo
- Solo moderadamente dispersivo
- Solo dispersivo
- Solo altamente dispersivo

Os corpos de prova ensaiados após dois meses de armazenamento foram classificados como levemente dispersivo conforme atestam os resultados presentes na Tabela 5.16.

Tabela 5.16- Resultados dos corpos de prova armazenados durante 2 meses.

Tempo de armazenamento	Carga de água (mm)	Porcentagem da substância húmica			
		0% SH		0,5%SH	
		Vazão	Efluente	Vazão	Efluente
2 meses	50	0,7	Claro	0,7	Claro
	180	1,5	Claro	1,7	Claro
	380	Entupido		4	Levemente escuro
	1020				
Classificação		Levemente dispersivo		Levemente dispersivo	
Tempo de armazenamento	Carga de água (mm)	Porcentagem da substância húmica			
		1%SH		3%SH	
		Vazão	Efluente	Vazão	Efluente
2 meses	50	0,6	Claro	1,2	Claro
	180	2,3	Claro	3,3	Claro
	380	4	Levemente escuro	8,3	Escuro
	1020				
Classificação		Levemente dispersivo		Levemente dispersivo	
Tempo de armazenamento	Carga de água (mm)	Porcentagem da substância húmica			
		5%SH		1%SH comercial	
		Vazão	Efluente	Vazão	Efluente
2 meses	50	1,1	Claro	0,2	Claro
	180	3,1	Claro	1,5	Claro
	380	6	Escuro	1,8	Levemente escuro
	1020				
Classificação		Levemente dispersivo		Levemente dispersivo	

Já os corpos de prova que foram ensaiados após cinco meses de armazenamento foram classificados como levemente dispersivo, exceto àqueles com 5 % de substância húmica PUC-Rio que obtiveram um resultado mais favorável, sendo classificados como incipientemente dispersivo (vide Tabela 5.17).

Em relação aos resultados dos ensaios com os corpos de prova armazenados por um período de doze meses, a Tabela 5.18 mostra que àqueles que foram incorporados com 3% e 5% de substância húmica PUC-Rio foram classificados como solos incipientemente dispersivos e àqueles que foram incorporados com 0,5% e 1% de substância húmica PUC-Rio, bem como àqueles que não houve a incorporação de substância húmica, foram classificados como levemente dispersivos.

Tabela 5.17 - Resultados dos corpos de prova armazenados durante 5 meses.

Tempo de armazenamento	Carga de água (mm)	Porcentagem da substância húmica			
		0% SH		0,5%SH	
		Vazão	Efluente	Vazão	Efluente
5 meses	50	0,3	Claro	0	0,5
	180	0,2	Claro	1,2	0,3
	380	2,9	Escuro	4	Levemente escuro
	1020				
Classificação		Levemente dispersivo		Levemente dispersivo	
Tempo de armazenamento	Carga de água (mm)	Porcentagem da substância húmica			
		1%SH		3%SH	
		Vazão	Efluente	Vazão	Efluente
5 meses	50	0,2	Claro	0,3	Claro
	180	1,4	Claro	1,4	Claro
	380	3,4	Claro	2,5	Claro
	1020	3	Escuro	4,3	Escuro
Classificação		Levemente dispersivo		Levemente dispersivo	
Tempo de armazenamento	Carga de água (mm)	Porcentagem da substância húmica			
		5%SH		1%SH comercial	
		Vazão	Efluente	Vazão	Efluente
5 meses	50	0,3	Claro	0,5	Claro
	180	1,3	Claro	0,3	Claro
	380	1,9	Claro	Entupido	
	1020	Vazão muito alta - pouca turbidez		Entupido	Levemente escuro
Classificação		Incipientemente dispersivo		Levemente dispersivo	

Tabela 5.18- Resultados dos corpos de prova armazenados durante 12 meses.

Tempo de armazenamento	Carga de água (mm)	Porcentagem da substância húmica			
		0% SH		0,5%SH	
		Vazão	Efluente	Vazão	Efluente
12 meses	50	0,5	Claro	0,1	Claro
	180	1,6	Claro	0,2	Claro
	380	1,1	Escuro	0,2	Escuro
	1020	Entupido		Entupido	
Classificação		Levemente dispersivo		Levemente dispersivo	
Tempo de armazenamento	Carga de água (mm)	Porcentagem da substância húmica			
		1%SH		3%SH	
		Vazão	Efluente	Vazão	Efluente
12 meses	50	1,3	Claro	1	Claro
	180	2,8	Claro	2	Claro
	380	4,5	Levemente escuro	4,5	Claro
	1020			Vazão muito alta -pouca turbidez	
Classificação		Levemente dispersivo		Incipientemente dispersivo	
Tempo de armazenamento	Carga de água (mm)	Porcentagem da substância húmica			
		5%SH		1%SH comercial	
		Vazão	Efluente	Vazão	Efluente
12 meses	50	0,6	Claro	0,7	Claro
	180	1,7	Claro	0,2	Claro
	380	Vazão muito alta – Efluente claro		Entupido	Levemente escuro
	1020	Vazão muito alta – Efluente claro		Entupido	Levemente escuro
Classificação		Incipientemente dispersivo		Levemente dispersivo	

Embora o ensaio furo de agulha seja normalmente utilizado para determinar o grau de dispersão do solo, utilizou-se o mesmo para avaliar a susceptibilidade de erosão, acatando a sugestão de diversos autores, incluindo Boschek *et al.* (2002), Morais *et al.* (2004) e Umesh *et al.* (2011).

Os resultados do programa de ensaios de furo de agulha demonstraram comportamento semelhante àqueles dos ensaios de desagregação e classificação MCT. Houve uma melhora no comportamento de erodibilidade do material de desmonte face ao teor de incorporação de substâncias húmicas bem como o tempo de armazenamento.

A melhora da erodibilidade do material com a adição de substâncias húmicas coincidiu com os resultados de programas experimentais realizados por Kiehl (1985), Piccolo *et al.* (1997), Virgolino da Silva (2002), Brunetti *et al.* (2007), Borgues *et al.* (2007) e Ronquim *et al.* (2010). Vale ressaltar que Piccolo *et al.* (1997) também utilizou de substâncias húmicas extraídas de rejeito de carvão.

Ao comparar o desempenho da substância húmica comercial com o desempenho da substância húmica PUC-Rio, observou-se um melhor comportamento dos corpos de prova que utilizaram a substância comercial.

O melhor desempenho da substância húmica comercial pode ser explicado pela composição química desta substância, já que os resultados da análise química elementar realizada com as duas substâncias revelaram maiores porcentagens de carbono, hidrogênio e nitrogênio na substância comercial.

Por outro lado, há de se ressaltar que a sorção das substâncias húmicas em materiais particulados, conforme indica Hassink (1997), é função da sua capacidade de interação com os argilominerais presentes na matriz do material particulado. Assim, independentemente da origem do composto adicionado no solo, a eficiência da substância húmica na redução erodibilidade do material particulado está diretamente relacionada com a sua composição.

Mais recentemente, Dexter *et al.* (2008) sugeriram que o desempenho da incorporação de substâncias húmicas deva ser analisado não somente a partir do teor de incorporação mas também através da interação dos complexos substância húmica -argila. Neste sentido, foi realizada uma série de ensaios complementares para avaliar esta interação.

## 5.4. Ensaio complementares

### 5.4.1. Capacidade de troca catiônica

A capacidade de troca catiônica (CTC) do solo é uma característica diretamente ligada à fração argila de um material particulado. Ela se refere a soma das cargas negativas presentes na fração argila e a matéria orgânica que retém cátions.

O ensaio de CTC foi realizado com o material proveniente dos corpos de prova empregados no programa de ensaios de compressão diametral. Os resultados, vistos na Tabela 5.19 e na Figura 5.13, indicaram que os valores de CTC tendem a aumentar com o tempo de armazenamento e com o valor da substância húmica incorporada.

A tendência de aumento de troca catiônica a partir da aplicação de substâncias húmicas também foi relatado por autores como Souza *et al.* (2006), Ronquim *et al.* (2010) e Borgues *et al.* (2013).

Tabela 5.19- Valores de CTC do solo armazenado durante 2, 5 e 12 meses

Porcentagem de substância húmica	CTC (cmol/kg)			
	0 meses	2 meses	5 meses	Solo 12 meses
0 %	0,7	1,4	1,5	1,8
0,50 %	0,7	1,4	1,4	2,0
1 %	0,7	1,4	1,6	1,9
3 %	0,7	1,6	1,8	2,0
5 %	0,8	2,0	2,0	2,1
1 % SH comercial	0,8	1,6	1,7	2,0

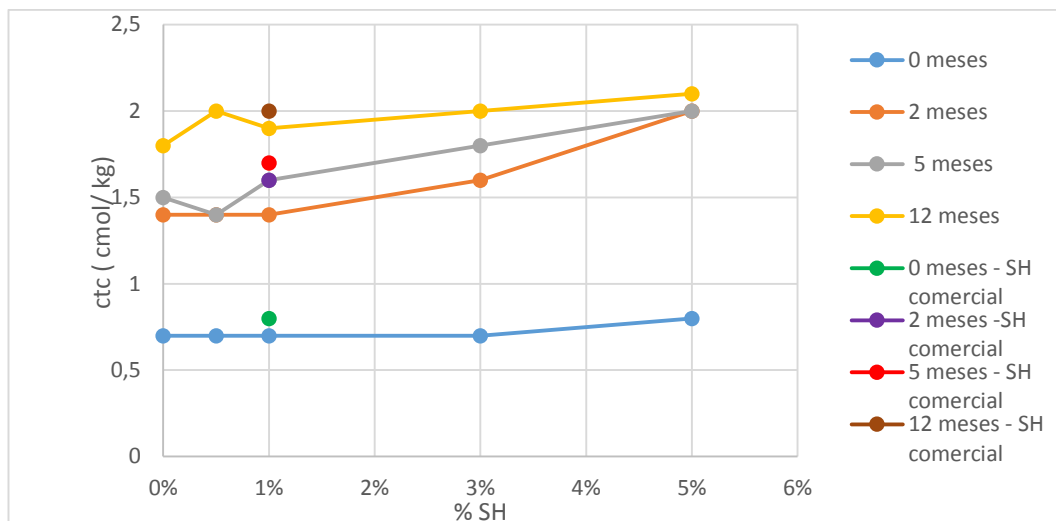


Figura 5.13 Capacidade de troca catiônica para corpos de prova em função de diferentes quantidades de substância húmica.

Face à pequena proporção da fração argila na composição granulométrica do material de desmonte e devido à presença de argilominerais pouco ativos em sua composição mineralógica, sugere-se que a variação da CTC no material com o tempo tenha ocorrido basicamente devido à matéria orgânica.

Este fato é corroborado pela elevação evidenciada da CTC nos corpos de prova que não continham substância húmica. A elevação da CTC neste caso pode ter ocorrido em função da atividade microbiana. Segundo Prado (2013) e Daynes *et al.* (2013), os íons são adsorvidos em solos principalmente devido às cargas líquidas negativas nas superfícies de partículas de argila e da matéria orgânica humificada. Por outro lado, os microorganismos podem tanto adsorver como absorver cátions e ânions (Gadd, 2007), influenciando nos valores de capacidade de troca catiônica em solos.

Verificou-se ainda que o material com 1% de substância húmica comercial teve valores de CTC superiores ao material com 1% da substância húmica PUC-Rio, reforçado a tendência verificada nos demais ensaios onde a substância húmica comercial se mostrou mais eficiente na redução da erodibilidade.

#### 5.4.2. Determinação da matéria orgânica

A determinação da matéria orgânica foi realizada através dos procedimentos descritos na NBR 13600. A determinação de matéria orgânica foi realizada em

corpos de prova com diferentes idades, aproveitando o material resultante dos ensaios de compressão diametral.

Ressalta-se que o valor da matéria orgânica obtida pela norma NBR 13600 pode ser superior ao real devido ao aquecimento a 440°C, que provavelmente queima alguns óxidos presentes no material particulado. Assim, este programa de ensaio foi realizado apenas com valor comparativo já que a determinação do teor de matéria orgânica do material de desmonte foi realizada através da determinação do teor de carbono orgânico (TOC).

A Tabela 5.20 e a Figura 5.14 apresentam os valores do teor de matéria orgânica. Verifica-se que quanto maior é o teor de substâncias húmicas na amostra, maior é o valor de matéria orgânica determinado.

Tabela 5.20- Teor de matéria orgânica no material de desmonte

Tempo de	0%SH	0,5%SH	1%SH	3%SH	5%SH	1%SH
0 meses	2,49	2,69	2,5	2,41	2,54	2,44
2 meses	2,59	3,23	3,53	3,22	3,51	2,9
5 meses	2,57	2,93	3,76	4,08	4,1	4,36
12 meses	2,76	3,28	4,12	4,15	4,17	5

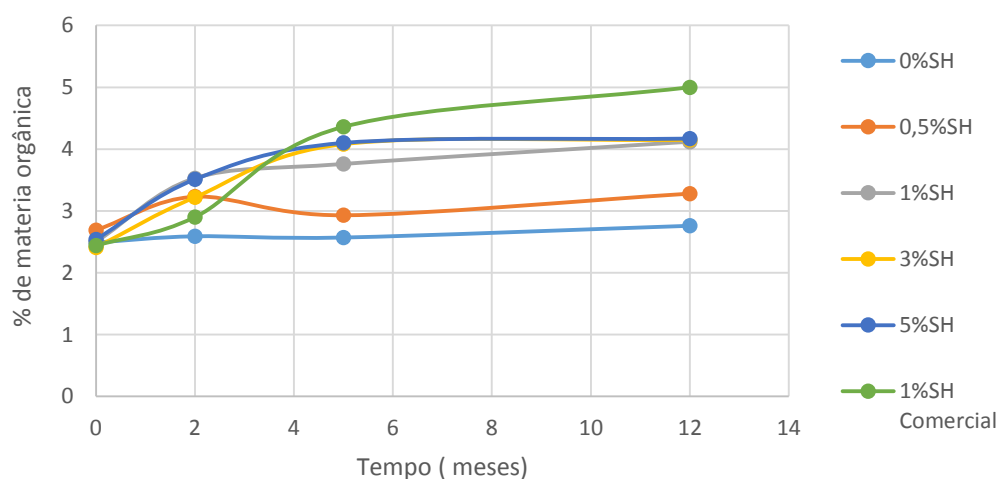


Figura 5.14 Teor de matéria orgânica no material de desmonte



Conforme mencionado anteriormente, a matéria orgânica presente em um material particulado contribui na agregação das partículas, então espera-se que quanto maior for o teor de matéria orgânica presente em um corpo de prova menor seja a sua erodibilidade.

Verificou-se um ligeiro acréscimo do teor de matéria orgânica nos corpos de prova que sofreram um maior período de armazenamento. Como não houve incorporação de substâncias no decorrer do armazenamento, imagina-se que o acréscimo seja fruto da atividade microbiana.

Este comportamento foi observado por Brunetti *et al.* (2006) que sugeriram que as substâncias húmicas podem ter sido utilizadas no metabolismo dos microrganismos. Segundo os autores, os microrganismos obtêm os seus nutrientes do ambiente através de absorção degradando as moléculas orgânicas complexas para posteriormente absorver moléculas menores, mais simples.

Na literatura técnica, é possível encontrar estudos de diversos autores sobre o comportamento de microrganismos em relação à agregação das partículas de solos. Por exemplo, Daynes *et al.* (2013) analisaram a estabilização da estrutura do solo considerando a interação de três fatores, material orgânica, fungos associados as raízes das plantas, e as próprias raízes, concluindo que efetivamente os fatores mencionados podem estabilizar a estrutura do solo melhorando agregação das partículas quando presentes em condições adequadas.

#### 5.4.2.1.

##### **Composição elementar das substâncias adicionadas e do material de desmonte**

A composição elementar da matéria orgânica do material e das substâncias húmicas está presente na Tabela 5.21.

Tabela 5.21- Composição elementar do material de desmonte

Elemento	Concentração (%)		
	Material	Substância Comercial	Substância PUC-Rio
C	<0,3%	55,25	11,6
N	<0,3%	3,93	1,8
H	1,2	0,95	1,3

Como pode ser observada nos dados disponíveis na Tabela 5.21 a composição da substância húmica comercial pode ser comparada com a composição elementar de ácidos húmicos provenientes de solos apresentada na tabela 3.1 apresentada no Capítulo 3.

No caso da substancia húmica PUC-Rio as porcentagens dos elementos C, N, H apresentam valores inferiores aos publicados em Dick *et al.* (2010). As razões de C/N e H/C da substancia húmica PUC são 6,44 e 0,11, respectivamente, que também são inferiores aos publicados pela referida autora.

Adicionalmente foi realizada a determinação da composição elementar da matéria orgânica presente no material de desmonte antes do armazenamento e no material após 24 meses de armazenamento. O resultado das determinações está contido na Tabela 5.22

O material armazenado durante 24 meses apresenta o teor de nitrogênio menor que 0,3%, carbono 1,1% e hidrogênio 0,7%. Através deste ensaio é possível observar que a amostra sem substância húmica adicionada armazenada durante 24 meses apresenta o teor de nitrogênio similar à do material sem armazenamento. O teor de carbono no material armazenado é superior, porém o teor de hidrogênio é inferior.

Estes resultados indicam a existência de ação microbiana no decorrer do período de armazenamento, já que o teor de carbono cresce indicando uma produção de matéria orgânica e de hidrogênio decresce sugerindo que ele está sendo consumido no processo metabólico de microrganismos através de reações de redução em virtude do ambiente anaeróbico existente no armazenamento.

Os resultados presentes nesta seção reforçam a hipótese que a ação dos microrganismos auxiliaram na redução da erodibilidade dos corpos de prova do material de desmonte puro em virtude do armazenamento prolongado.

Tabela 5.22- Comparação do material de desmonte sem adição de compostos húmico sem tempo de armazenamento e com 24 meses de armazenamento

Amostra	Composição elementar		
	C	N	H
Material sem SH sem armazenamento	< 0,3%	< 0,3%	1,2%
Material sem SH com 24 meses	1,1%	< 0,3%	1,2%

### 5.4.3. Microscopia

#### 5.4.3.1. Microscopia óptica

A análise óptica foi realizada através da confecção de trinta seis lâminas com diferentes teores de incorporação da substância PUC-Rio (*e.g.*, 0%, 0,5%, 1%, 3%, e 5%) e da substância comercial a 1% em dezoito corpos de prova submetidos a um tempo de armazenamento de dois, cinco e doze meses. Em cada corpo de prova foram confeccionadas duas lâminas, uma no sentido vertical e outra no sentido horizontal.

As figuras 5.15 e 5.16 apresentam as lâminas confeccionadas com o corpo de prova de material de desmonte sem incorporação de substância húmica. Nelas é possível destacar que a coloração azul corresponde aos vazios que foram impregnados com o corante azul de metileno.

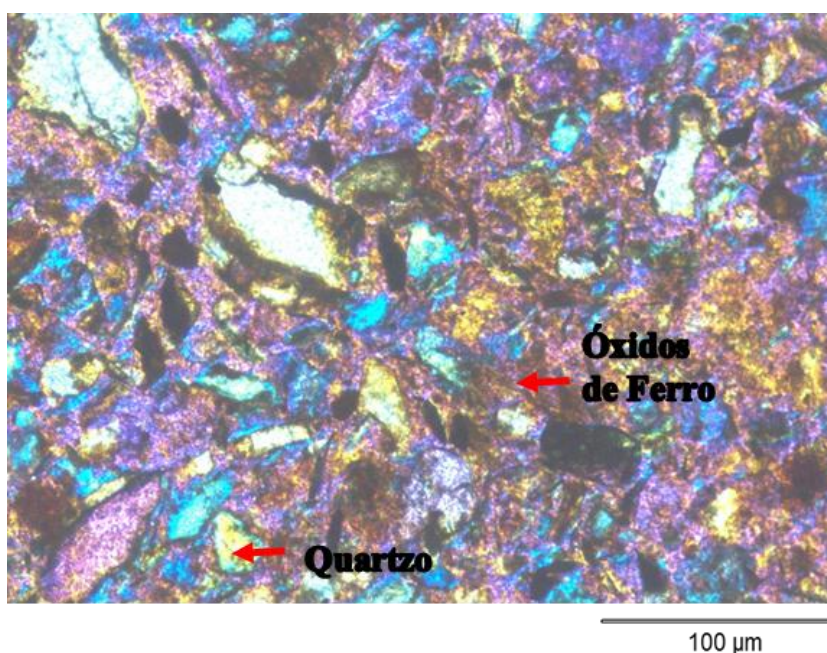


Figura 5.15 Estrutura vertical do corpo de prova sem SH com armazenamento de dois meses, aumento 50x.

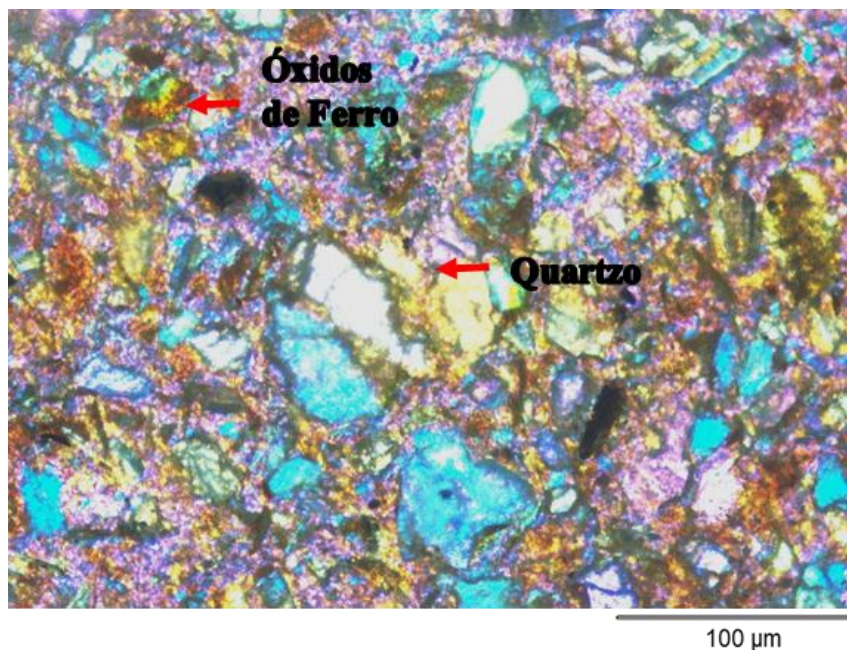


Figura 5.16 Estrutura horizontal do corpo de prova sem SH com dois meses de armazenamento, aumento 50x

Face à textura arenosa do material é possível detectar a presença de quartzo e do óxido ferroso. Os cristais de quartzo são as estruturas prismáticas de cor branca ou cores claras com brilho. Já o óxido ferroso, segundo Knopf (1979), são as estruturas hexagonais de forma arredondada ou tabulares que apresentam cores cinza, preta avermelhada ou marrom.

Já as Figuras 5.17 e 5.18 apresentam as lâminas do material com 5% de incorporação da substância húmica PUC-Rio. Além do quartzo e do óxido ferroso, é possível identificar nestas Figuras a presença de uma fina película ao redor das partículas de cor escura, que representa a substância húmica.



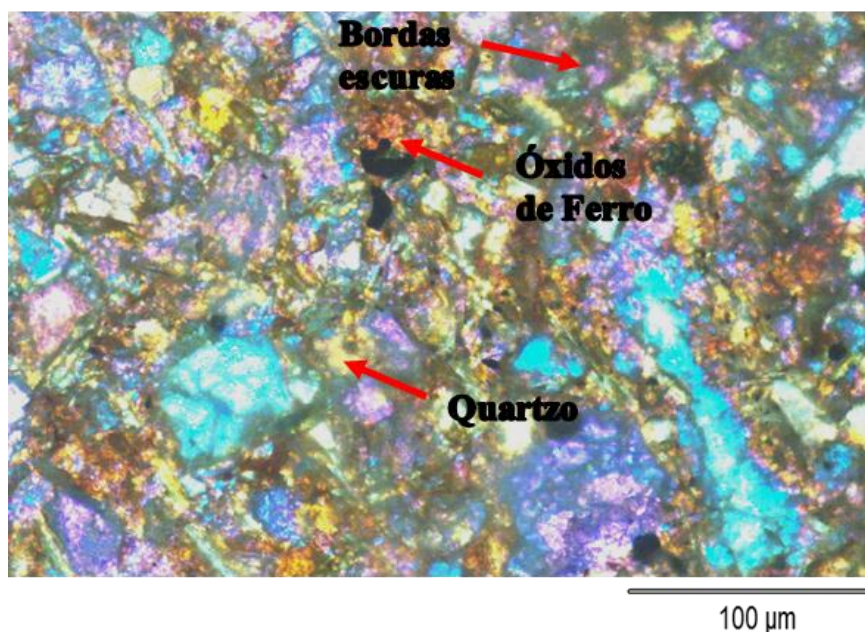


Figura 5.17 Estrutura vertical do corpo de prova com 5%SH PUC-Rio com dois meses de armazenamento, aumento 50x.

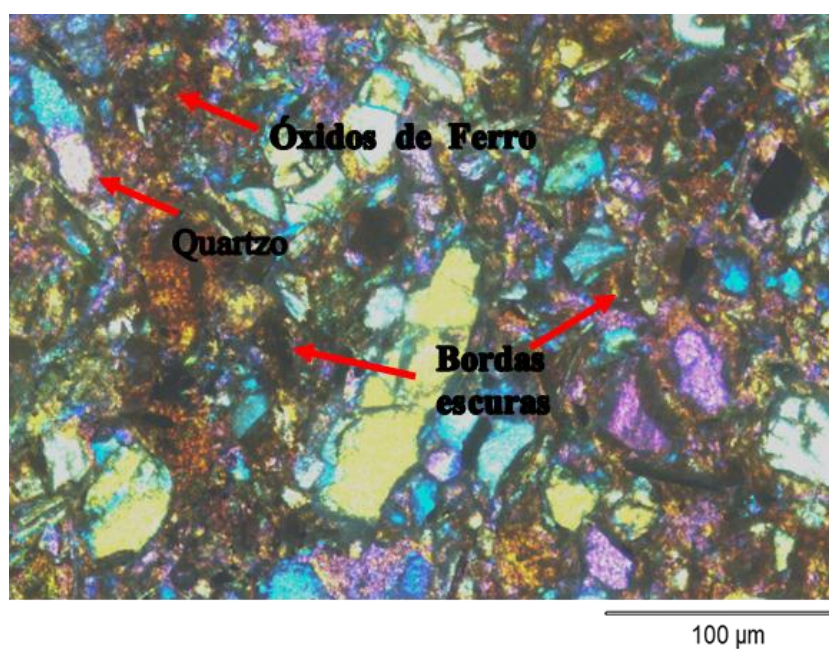


Figura 5.18 Estrutura horizontal do corpo de prova com 5%SH PUC-Rio com dois meses de armazenamento aumento 50x.

As figuras 5.19 e 5.20 apresentam as lâminas confeccionadas com o corpo de prova obtido a partir da incorporação de 5% de substância húmica PUC-Rio ao material e armazenado por um período de 5 meses.

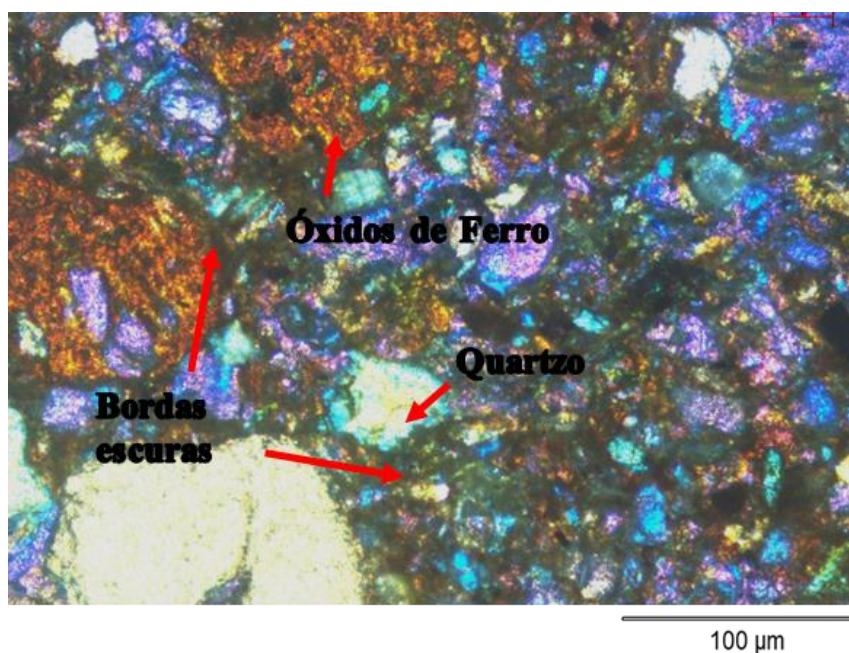


Figura 5.19 Estrutura vertical do corpo de prova com 5%SH PUC-Rio com cinco meses de armazenamento , aumento 50x

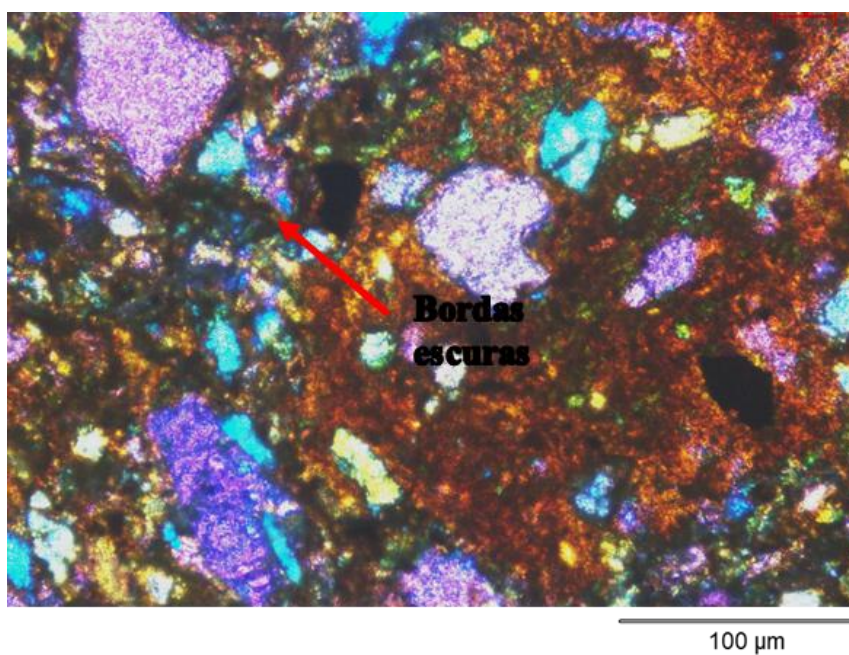


Figura 5.20 Estrutura horizontal do corpo de prova com 5%SH PUC-Rio com cinco meses de armazenamento , aumento 50x.

A imagem, aumentada em 50x, apresenta os cristais de quartzo, os cristais de óxido ferroso e os vazios. É possível ainda distinguir os bordos das partículas com uma sombra escura ao redor, que constitui a substância húmica. Os mesmos compostos são evidenciados nas Figuras 5.21 e 5.22, que apresentam o corpo de



prova obtido a partir da incorporação de 5% de substância húmica PUC-Rio ao material e armazenado por um período de 12 meses.

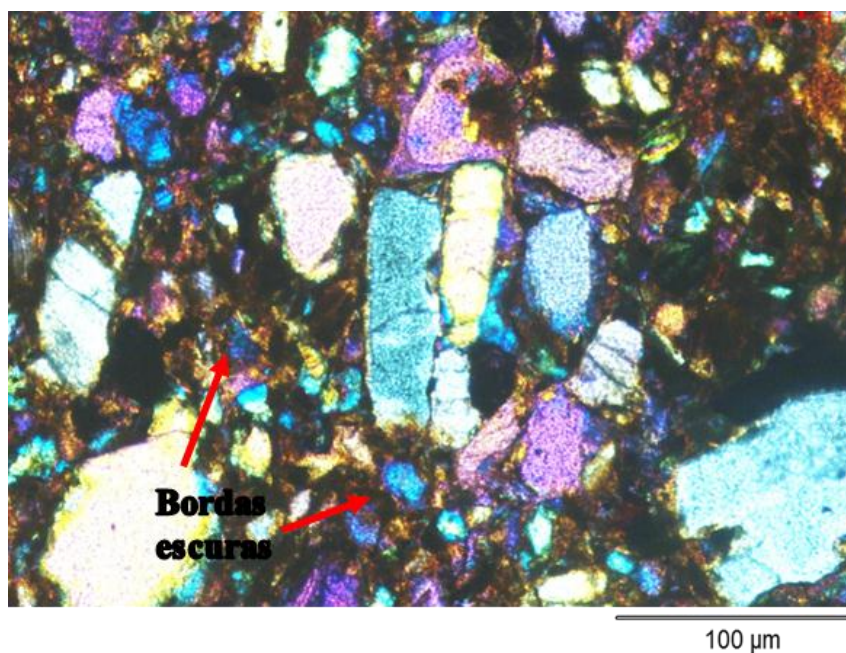


Figura 5.21 Estrutura vertical do corpo de prova com 5%SH PUC-Rio com um ano de armazenamento, aumento 50x.

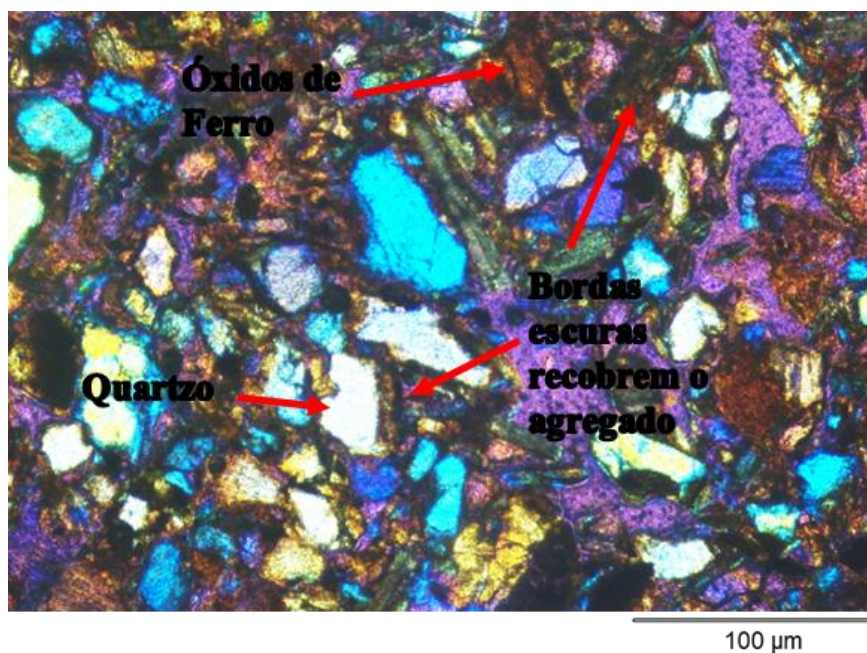


Figura 5.22 Estrutura horizontal do corpo de prova com 5%SH PUC-Rio com um ano de armazenamento, aumento 50x.

Verifica-se que os bordos escuros recobrimo os agregados e as partículas de quartzo ficam um pouco mais aparentes na lâmina com maior tempo de armazenamento. Aparentemente os contornos dos cristais dos minerais estão recobertos por uma fina camada de substância húmica.

Como mencionado anteriormente, os agregados observados nas lâminas, são frutos de interações físico-químicas dos argilominerais presentes no material de desmonte e os compostos húmicos. Este efeito também foi relatado nos trabalhos de Bastos *et al.* (2005), Brunetti *et al.* (2007) e Ronquim (2010).

Uma baixa identificação das substâncias húmicas nas lâminas pode ter ocorrido devido à baixa porcentagem em que estes compostos foram adicionados ao material de desmonte. Por este motivo, a observação no microscópio eletrônico de varredura é importante para observar a agregação das partículas a partir da adição das substâncias húmicas ao material.

O Anexo 2 deste trabalho apresenta os resultados das análises de microscopia óptica realizadas em todas as lâminas.

#### **5.4.3.2.**

#### **Microscopia eletrônica de varredura (MEV) acoplada a Espectroscopia por Dispersão de Energia (EDS).**

Para que se possa compreender o mecanismo de agregação das partículas e confirmar a presença das substâncias húmicas que contribuíram na redução da erodibilidade foi realizada uma análise de microscopia eletrônica de varredura.

A análise compreendeu uma varredura em um bloco de material de desmonte sem adição de substância húmica e em outro bloco de material com adição de 5% de substância húmica PUC-Rio, armazenado por um período de 20 meses.

Na realização da análise foi utilizado um bloco com aproximadamente 1 cm de aresta. Como um resultado preliminar, é possível verificar que na fita adesiva que foi empregada do porta-amostras utilizado para colocar o bloco no microscópio uma diferença de coloração entre as amostras conforme pode ser observado na Figura 5.23. Verifica-se que na fita adesiva empregada na amostra com substância húmica praticamente não reteve partículas do material, ao contrário da amostra que continha material de desmonte puro. Este indicativo sugere a capacidade de redução da erodibilidade do material através da aplicação da substância húmica.



Fita adesiva da amostra  
com 5%SH



Fita adesiva da amostra  
sem adição de SH



Figura 5.23 Fitas adesivas do porta amostras do microscópio eletrônico de varredura que foram utilizadas no ensaio.

A Figura 5.24 apresenta uma imagem do material ampliada 1500 vezes. Verifica-se uma disposição caótica de partículas laminares com um aspecto frágil devido à baixa porcentagem de elementos que agregam as partículas de solo. É possível evidenciar a presença de Ilita/Mica entre as partículas laminares.

Foi realizada uma análise espectrométrica de dispersão de energia para determinar a composição da partícula indicada no ponto vermelho da Figura 5.24. Os resultados estão presentes na Tabela 5.23. Verificou-se uma composição similar à apresentada na Seção 5.2, apenas a concentração dos elementos variaram.

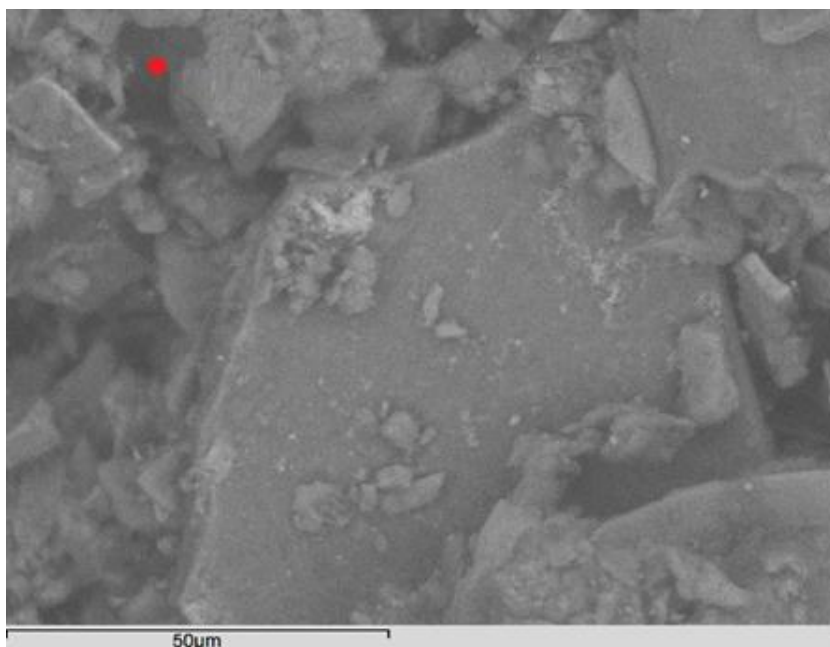


Figura 5.24 Imagem do material de desmonte com microscópio eletrônico de varredura com aumento de 1500x.

Tabela 5.23- Elementos químicos presentes no material de desmonte sem composto húmico

Elementos químicos	Porcentagens aproximadas
Oxigênio	61,43%
Magnésio	0,66%
Alumínio	13,87%
Silício	17,22%
Potássio	0,80
Titânio	0,86
Ferro	1,16

A Figura 5.25 apresenta a imagem do material de desmonte com 5% de substância húmica PUC-Rio. O ponto vermelho indica o local onde foi realizada a determinação da composição química.

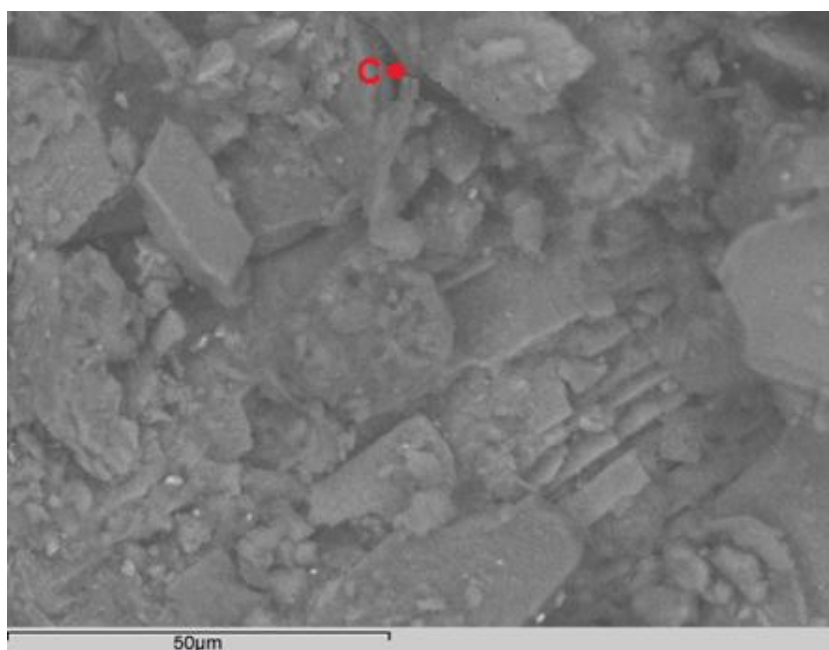


Figura 5.25 Imagem do material de desmonte com composto húmico utilizando microscópio de varredura eletrônica com aumento de 1500x

Verifica-se uma disposição de partículas laminares com uma orientação menos caótica que no material de desmonte puro, um indicativo da agregação das partículas proporcionadas pela incorporação de substâncias húmicas.

Adicionalmente, foi constatada na análise química a presença do carbono conforme mostram os resultados vistos na Tabela 5.24.

Tabela 5.24- Elementos químicos presentes no material de desmonte com composto húmico

Elementos químicos	Porcentagens aproximadas
Oxigênio	43,8%
Carbono	2,7%
Alumínio	18,67%
Silício	22,07%
Potássio	1,06%
Titânio	0,86%
Ferro	10,56%

Em relação a interação físicoquímica pode se mencionar que os feldspatos presentes no solo de Santo Antônio de Pádua que na composição possuem potássio, podem estar fixados aos compostos orgânicos presentes nas substâncias húmicas através de retenções via forças de Van der Waals e ligações eletrostáticas por intercâmbio de cátions ou ânions.

Sparks 1995 menciona que a sorção de substâncias húmicas com carga negativa ocorre quando cátions metálicos polivalentes como  $Al^{3+}$ ,  $Fe^{3+}$ , e  $Ca^{2+}$  estão presentes em certas posições da estrutura da argila. Apesar da porcentagem de argila ser 9,9% no solo estudado, é possível que a caulinita e a mica estejam favorecendo na diminuição da erodibilidade do solo.

Conforme mencionado por Klein e Dutrow (2012) as estruturas de folhas de tetraedro e octaedro dos filosilicatos apresentam cátions bivalentes como Mg e Fe que podem estar unidos com compostos orgânicos provenientes das substâncias húmicas. Na presente pesquisa foi evidenciada a presença destes cátions na composição mineralógica do solo, portanto a interação físicoquímica destes compostos orgânicos com o solo contribui na diminuição da erodibilidade do solo com adição de compostos húmicos.

Por outra parte o cátion K presente na constituição dos filosilicatos do grupo das micas também pode interagir com os compostos orgânicos das SH. Em relação à estrutura característica das SH, Shulten e Schnitzer (1997) apresenta um modelo com presença de espaços vazios de diferentes tamanhos que alojam

compostos orgânicos ou inorgânicos . No presente trabalho pode se entender que estes espaços estão preenchidos por compostos inorgânicos do solo como os óxidos mostrados na tabela 5.3 (  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{BaO}$ )

#### 5.4.4. Ensaio microbiológicos

##### 5.4.4.1. Técnica dos tubos múltiplos

Os resultados dos ensaios de avaliação da erodibilidade foram relacionados com uma provável atividade microbiológica. Por tanto para verificar a presença de microrganismos foi realizado o ensaio do número mais provável com a técnica dos tubos múltiplos. As amostras consideradas foram provenientes de corpos de prova armazenados durante aproximadamente 36 meses.

Os resultados deste ensaio estão apresentados a seguir na Tabela 5.25, e sugerem a presença de microrganismos na ordem de  $10^{10}$  NMP/g em amostras de material sem adição de substâncias húmicas e um valor superior em material com adição de compostos húmicos, seja a substância PUC-Rio ou a substância comercial.

Tabela 5.25 Resultados do ensaio microbiológico mediante a técnica dos tubos múltiplos

Material	Quantidade de microrganismos
Sem SH	$1,1 \times 10^{10}$ NMP/g de material
Com 5%SH- PUC-Rio	$> 1,1 \times 10^{10}$ NMP/g de material
Com 1%SH comercial	$> 1,1 \times 10^{10}$ NMP/g de material

##### 5.4.4.2. Contagem de microrganismos em placa

Se verificou a importância da ação microbiana na redução da erodibilidade do material de desmonte por tanto realizando um levantamento da população

microbiana, através de este ensaio é possível determinar a quantidade de unidades formadoras de colônias em amostras armazenadas aproximadamente 36 meses com teor de umidade de 23%. Na tabela 5.26 estão apresentados os resultados para amostras de material sem adição de substância húmica, com adição de 5% de substância húmica PUC- Rio e 1% de substância húmica comercial, apresentando valores na ordem de  $10^8$  microrganismos por gramo de material seco para os três casos. Entende-se que as colônias de microrganismos identificadas representam tanto colônia de fungos como de bactérias. Na Figura 5.26 pode se observar uma fotografia da placa onde foi colocada uma amostra de material com adição de 5% de substância húmica PUC-Rio.

Tabela 5.26 Resultados da contagem de colônias de microrganismos

Material	Quantidade de colônias
Sem adição de SH	$1,14 \times 10^8$ microrganismos / g solo seco
Com 5% SH PUC-Rio	$6,75 \times 10^8$ microrganismos /g solo seco
Com 1% SH comercial	$9,09 \times 10^8$ microrganismos /g solo seco

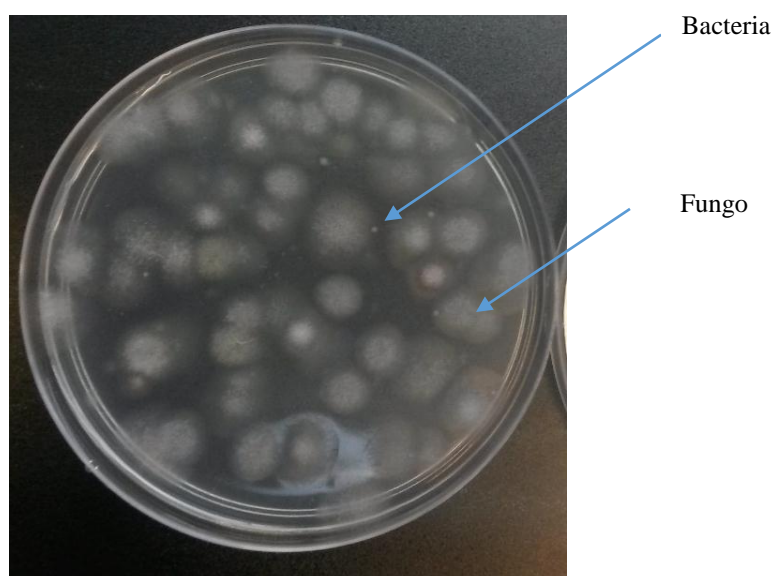


Figura 5.26 Contagem de microrganismos onde podem ser observadas colônias de fungos e bactérias

#### 5.4.5. Limite de plasticidade.

Para verificar se as substâncias húmicas adicionadas ao material de desmonte outorgam plasticidade à mistura, foi realizada a determinação do limite de plasticidade em misturas de material com diferentes porcentagens de substância húmica (0%, 0,5%, 1%, 3%, 5% Substância húmica PUC-Rio e 1% Substância húmica comercial) comprovando que somente nas misturas com teor de 5% de substância húmica PUC-Rio e 1%SH comercial apresentam valores do limite de plasticidade conforme é mostrado na tabela 5.27.

Tabela 5.27 Valores do Limite de plasticidade de amostras com diferente quantidade de substância húmica

<b>Amostra</b>	<b>(<math>\omega_p</math>)</b>
Sem SH	Não apresenta
Com 0,5% SH-PUC-Rio	Não apresenta
Com 1% SH-PUC-Rio	Não apresenta
Com 3% SH-PUC-Rio	Não apresenta
Com 5% SH-PUC-Rio	21,99%
Com 1% SH-Comercial	22,36%

## 6. Conclusões e Sugestões

### 6.1. Conclusões

O material estudado, um material de desmonte da produção de Pedra Miracema, apresenta características similares à de uma areia siltosa (SM) caso o mesmo fosse classificado pelo Sistema Unificado de Classificação de Solos (ASTM, 2488). Segundo Qian *et al.* (2002), este material é um dos que apresentam maior potencial de erodibilidade conforme explicado na capítulo 2.

A escolha do material deu-se ainda por este não apresentar a sua estrutura original, *i.e.* era um material de desmonte, conter um baixo teor de matéria orgânica e o local onde estava disposto apresentava feições erosivas.

A análise mineralógica do material estudado revelou a presença de diferentes fases cristalinas, incluindo o quartzo (Q), o feldspato (Ft), a caulinita (Ct), e a illita (I/M) proveniente da decomposição da mica, como também do óxido ferroso ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) que confere a sua coloração avermelhada. A ausência de argilominerais 2:1 com elevada superfície específica e capacidade catiônica confere-lhe indiretamente um elevado potencial de erodibilidade.

O objetivo principal deste trabalho foi avaliar o potencial de aplicação da incorporação de substâncias húmidas na redução da erodibilidade deste material. Empregaram-se dois tipos desta substância: a primeira foi oriunda de rejeitos de carvão mineral enquanto a segunda era de fonte comercial. A avaliação foi realizada através de um programa experimental que contou com a realização de ensaios de desagregação, ensaios da Metodologia MCT, ensaios de compressão diametral e de furo de agulha (*pinhole*). Adicionalmente, foram realizadas análises de microscopia óptica e eletrônica, análises de determinação do teor de matéria orgânica e da determinação da capacidade de troca catiônica para auxiliar na interpretação dos resultados do programa experimental.

A incorporação de substâncias húmicas ao material de desmonte em diferentes concentrações alterou levemente a coloração do material. Verificou-se

que os corpos de prova sem substância húmica e àqueles em que foram incorporadas menores quantidades da substância PUC-Rio (*i.e.*, 0,5%SH, 1%SH, 3%SH) podem ser caracterizados no tocante a cor como amarelo avermelhado (5YR 7/6 na classificação Munsell). Já os corpos de prova com conteúdo de 5%SH da substância PUC-Rio e com 1% do composto húmico comercial podem ser caracterizados no tocante a cor como avermelhado marrom (5YR 6/4 na classificação Munsell).

Os resultados dos ensaios de desagregação com corpos de prova de diferentes idades de armazenamento revelaram uma relação inversamente proporcional entre a percentagem de incorporação de substância húmica e a erodibilidade. Quando se realizou um comparativo entre a substância húmica PUC-Rio e a comercial, observou uma melhor eficiência desta última face à maior presença de C, N, H na sua composição elementar. Verificou-se ainda que a erodibilidade é reduzida não somente com o aumento do teor de incorporação, mas também com o tempo de residência da substância húmica.

Em relação à classificação pela metodologia MCT, o material sem incorporação de substância húmica e com 0,5% de substância húmica PUC-Rio em amostras com menor período de armazenamento, poderia ser classificado como solo não laterítico arenoso que apresenta menor resistência frente a erosão, já as amostras com maior período de armazenamento e maior quantidade de substância húmica PUC-Rio e substância húmica comercial poderiam ser classificados como solos lateríticos arenosos o que reforça os resultados do ensaio de desagregação, observando menor erodibilidade à maior quantidade de substância húmica incorporada no material e maior tempo de armazenamento das amostras.

O ensaio de compressão diametral ou ensaio brasileiro foi utilizado para determinar a resistência à tração do material de desmonte. Sabendo-se que a resistência à tração dos materiais particulados é oriunda de ligações entre as suas partículas, acredita-se que o valor da resistência à tração dos corpos de prova possa ser um bom indicativo na avaliação da redução da erodibilidade do material em função da incorporação das substâncias húmicas.

A análise dos resultados dos ensaios de compressão diametral permitiu verificar um acréscimo no valor da resistência à tração dos corpos de prova em virtude do tempo de armazenamento. O acréscimo foi notado até nos corpos de prova em que não houve incorporação das substâncias húmicas. Este fato sugere que a ação da microbiota possa ter contribuído nesta elevação. Esta hipótese é



consubstanciada pelo fato dos corpos de prova terem sido confeccionados com a adição de água deionizada. A ausência de cloro, um poderoso desinfetante, não dizimou a microbiota existente no material de desmonte e permitiu a sua proliferação. Adicionalmente, foi constatada a presença de fungos na superfície dos corpos de prova ao final do período de armazenamento. A importância da microbiota foi corroborada pela elevação evidenciada da CTC nos corpos de prova que não continham substância húmica.

De fato, verificou-se um ligeiro acréscimo do teor de matéria orgânica nos corpos de prova que sofreram um maior período de armazenamento. Como não houve incorporação de substâncias no decorrer do armazenamento, imagina-se que o acréscimo seja fruto da atividade microbiana.

Adicionalmente, verificou-se nos ensaios de composição elementar a existência de ação microbiana no decorrer do período de armazenamento, já que o teor de carbono cresce indicando uma produção de matéria orgânica e de hidrogênio decresce sugerindo que ele está sendo consumido no processo metabólico de microrganismos através de reações de redução em virtude do ambiente anaeróbio existente no armazenamento.

Por outro lado, verificou-se um aumento da resistência à tração em virtude da incorporação de substâncias húmicas a sua matriz. A incorporação de substâncias húmicas resultou numa maior estabilidade das partículas sólidas do material, face ao aparecimento de estruturas bi ou tridimensionais insolúveis que agem como agente cimentante aumentando a resistência à tração da matriz sólida.

Os resultados dos ensaios de compressão diametral também mostraram um acréscimo dos valores da resistência à tração nos corpos de prova que sofreram um período maior de armazenamento. De acordo com Monnier (1965), a estabilidade de substâncias húmicas à longo prazo é a sua principal vantagem em relação a outros tipos de produtos de fácil degradação, que conferem um efeito intenso na estabilidade de agregados nos instantes iniciais após a sua incorporação, porém este efeito é de curto prazo.

Esta afirmação é corroborada pelas análises de microscopia óptica, onde as substâncias húmicas que constituíam uma sombra escura ao redor das partículas ficaram mais aparentes nas lâminas com maior tempo de armazenamento. Já as análises de microscopia eletrônica detectaram que a incorporação de substância húmica gerou uma disposição de partículas laminares com uma orientação menos

caótica que no material puro, um indicativo da agregação das partículas proporcionadas pela sua incorporação.

Os resultados do programa de ensaios de furo de agulha demonstraram comportamento semelhante àqueles obtidos nos ensaios de desagregação e MCT. Houve uma melhora no comportamento de erodibilidade do material face ao teor de incorporação de substâncias húmicas bem como o tempo de armazenamento.

## 6.2. Sugestões para trabalhos futuros

Verificou-se uma redução da erodibilidade do material de desmorte com o aumento da incorporação de substâncias húmicas. Porém a incorporação foi realizada em pequenas quantidades. Assim sendo, sugere-se o estabelecimento de um programa experimental com a incorporação de 10%, 15%, 20%, 25% e 30% de substância húmica em peso a fim de estabelecer um teor ótimo de incorporação.

Por último, sugere-se a ampliação de escala do programa experimental realizando-o em uma escala piloto empregando equipamentos semelhantes ao mostrado na Figura 6.1. Onde adicionalmente pode ser observado se existe lixiviação da substância húmica aplicada no material terroso.



Figura 6.1 Equipamentos para avaliação de erodibilidade em escala piloto da Universidade de Missouri em Columbia.

Para analisar a relação de parâmetros geotécnicos com a erodibilidade do solo, se sugere realizar ensaios de corte direto em solos com adição de diferentes porcentagens de substâncias húmicas para de esta forma relacionar parâmetros de resistência com a erodibilidade do solo.

## Referências Bibliográficas

ABIVEN, S.; MENASSERI, S.; CHENU, C. The effects of organic inputs over time on soil aggregate stability – A literature analysis. **Soil Biology & Biochemistry** v. 41 , p 1-12, 2009.

ABIVEN S., MENASSERI S., ANGERS D.A., LETERME, P. Dynamics of aggregate stability and biological binding agents during the decomposition of organic material. **European Journal of soil Science** v.58, p.239–247, 2007.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. Standard methods for the examination of water and wastewater. 20. ed. Washington: American Public Health Association; AWWA; WPCF, 1999. 1569 p

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6457 Amostras de solo - Preparação para ensaios de caracterização e de compactação, 1986.p9.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR6508 - Grãos de solo que passam na peneira de 4,8 mm- Determinação de massa específica. Rio de Janeiro, 1984.p8.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR7181- Solo – Analise granulométrica . Rio de Janeiro,1984. p13.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR6459 - Solo – Determinação do limite de liquidez . Rio de Janeiro ,1984. p6.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7180 - Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro ,1984.p3.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR13600- Solo- Determinação do teor de matéria orgânica por queima a 440°C. Rio de Janeiro, 1996. p2.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 12007 MB3336 – Solo - Ensaio de adensamento unidimensional . Rio de Janeiro 1990. p13.

ALBIACH, R.; CANET, R.; POMARES, F.; INGELMO, F. Organic matter components and aggregate stability after the application of different amendments to a horticultural soil. **Bioresource Technology** v.76, p.125–129, 2001.

ALCÂNTARA, M.A.T. **Aspectos geotécnicos da erodibilidade dos solos**. São Carlos, SP, Dissertação de mestrado da Universidade de São Paulo, 1997.

ALBALADEJO, J.; ALVAREZ, J.; QUEREJETA, J.; DÍAZ, E.; CASTILLO, V. Three hydroseeding revegetation techniques for soil erosion control on anthropic steep slopes. **Land Degrad Dev** v.11, p315–325, 2000.

AMEZKETA E. Soil aggregate stability: a review. **Journal of Sustainable Agriculture** v.14, p 83–151, 1999.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING OF MATERIALS. **ASTM D5291-10**, Standard Test Methods for Instrumental Determination of Carbon, Hydrogen, and Nitrogen, Pensilvania . United States, 2010. p10

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING OF MATERIALS. **ASTM 2488-09** Standard Practice for Description and Identification of Soils, Pensilvania. United States, 2009. p11

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING OF MATERIALS. **ASTM D3967-95a**, Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Intact Rock Core Specimens, Pensilvania . United States, 2010, p3.

ANNABI, M.; HOUOT, S.; FRANCOU, C.; POITRENAUD, M.; LE BISSONNAIS, Y. Soil aggregate stability improvement with urban composts of different maturities. **Soil Science Society of America Journal** v.71, p 413–423, 2007.

ARAUJO, G.H.S. ; ALMEIDA J.R.; GUERRA A.J.T. **Gestão ambiental de áreas degradadas** . 4ta edição. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2009.

ARAUJO R.C. **Estudo da erodibilidade de solos da formação barreiras/RJ**. Dissertação de mestrado. Departamento de Engenharia Civil. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2000.

ARMAS-HERRERA, C.M.; MORA, J. L.; GUERRA, J.A.; ARBELO, C.D. RODRÍGUEZ-RODRÍGUEZ A. Depth distribution of humic substances in Andosols in relation to land management and soil erosion .**Soil Use and Management**, v.29, p.77-86, 2013.

AVILA L.O.; NUMMER A.; PINHEIRO R.B.; Erosão na microbacia do arroio Sarandi : Voçoroca do Buraco Fundo, Santa Maria / RS- Brasil in: **II Seminário Ibero-Americano de Geografia Física**, Universidade de Coimbra, 2010.

BINIAK, S.; PAKUTA, M.; DARLEWSKI, W.; SWIATKOWSKI, A.; KULA, P. Powdered activated carbon and carbon paste electrodes: comparison of electrochemical behavior, **Journal of applied electrochemistry**. v. 5, p. 593-600, 2009

BACELLAR, L.A.P.; **Condicionantes geológicos, geomorfológicos e geotécnicos dos mecanismos de voçorocamento na Bacia do Rio Maracujá, Ouro Preto MG**. Tese de Doutorado COPEE/ UFRJ Rio de Janeiro 2000.

BASTOS, C.A.; MILITITSKY, J.; GEHLING, W. Proposta Metodológica para avaliação geotécnica da erodibilidade de solos residuais não saturados. **Teoria e Prática na Engenharia Civil**, v. 2, p.9-18, 2001.

BASTOS, C.A.B.; **Estudo geotécnico sobre a erodibilidade de solos residuais não saturados**. Porto Alegre/RS, 298p. Tese de doutorado. PPGEC/UFRGS, 1999.

BARRETO, W.O. de. **Eletroquímica de solos tropicais de carga variável: capacidade de dupla camada elétrica**. Tese de Doutorado – Instituto de Ciências Agronômicas. UFRJ 1986.

BARZEGAR, A.R.; OADES, T. J. M.; RENGASAMY, P.; MURRAY, R.S. Tensile strength of dry, remoulded soils as affected by properties of the clay fraction **Geoderma** v.65 p 93-108, 1995

BELOLLI, M.; QUADROS, J.; GUIDI, A. **A história do carvão de Santa Catarina**. Criciúma: Imprensa Oficial do Estado de Santa Catarina, 2002. 296 p.

BORGUES, C.S.; RIBEIRO, B.T.; CABRAL, D.A.; WENDLING, B. Substâncias húmicas em diferentes classes de agregados de solo tratado com resíduos orgânicos. Matéria orgânica e qualidade ambiental: **Anais** [recurso eletrônico] / X Encontro Brasileiro de Substâncias Húmicas. Brasília, DF : Embrapa, 2013.

BOTSCHKE, J.; KRAUSE, S.; ABEL, T.; SKOWRONEK, A. Piping and erodibility of loessic soils in Bergischer Land, Nordrhein-Westfalen. *Journal of Plant Nutrient Soil Science* v.165, p 241–246, 2002.

BRANT, F.A.C. **Propriedades físicas, químicas, mineralógicas e mecânicas de um perfil de solo residual basáltico localizado em um corte da Ferrovia Norte-Sul, no estado de Tocantins**. Dissertação de Mestrado PUC-Rio, Departamento de Engenharia Civil, 2005.

BRONICK, C.J.; LAL R. Soil structure and management: a review. **Geoderma** v.124, p.3–22, 2005

BRUNETTI, G.; PLAZA, C.; CLAPP, C. E.; SENESI N. Compositional and functional features of humic acids from organic amendments and amended soils in Minnesota, USA. **Soil Biology & Biochemistry** v.39, p.1355–1365, 2007.

BURGOS, P.C., VILAR, O.M. & ALCÂNTARA, M.A.T. (1999). Um estudo preliminar da erodibilidade de alguns solos da Cidade de Salvador. REGEO'99, 4o Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental, **Anais**. São José dos Campos, SP.

CALDERANO, S.B. **Delineamento geoambiental do Município de Santo Antônio de Pádua, RJ Potencialidades e Limitações ao Uso da Terra- RJ**. – Dissertação de mestrado Programa de Pós-graduação em Geologia, - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Instituto de Geociências Rio de Janeiro: UFRJ, 2005.

CAMAPUM DE CARVALHO, J. (Org); CORDÃO NETO, M.P. (Org); AGUIAR, L.A. (Org). **Livro comemorativo dos vinte anos do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de– Brasília** : Editora FT, 2009.

CAMAPUM DE CARVALHO, J.; Nunes, P.M.; Berberian, D.; Ferreira, E.S. Influence of pH saturation liquid on collapsability (in spanish). In: **Panamerican Conference in Soil Mechanics and Foundation Engineering**, 7, v. 2, Cartagena, Colombia. 1987.

CARNEIRO, M. A. C.; SIQUEIRA, J. O.; MOREIRA, F. M. DE S.; SOARES, A. L. L. Carbono orgânico, nitrogênio total, biomassa e atividade microbiana do solo em duas cronossequências de reabilitação após a mineração de bauxita. **Revista Brasileira Ciencia do Solo**, v.32: p 621-632, 2008

CARVALHO, S. R.; CAMARGO FILHO, S. T.; BLANCANEUX, P. Recuperação de áreas degradadas através da introdução de gramíneas forrageiras e de leguminosas arbóreas no Estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. **EMBRAPA-CNPS**, 2000. 48p. (Embrapa Solos. Boletim de Pesquisa, 18)

CASANOVA, F. J. O ensaio de azul de metileno na caracterização de solos lateríticos. Reunião anual de pavimentação. Anais. **Associação Brasileira de Pavimentação**, Salvador, v. 2, n. 21, p. 279-286, 1986.

CAUSARANO, H. Factors affecting the tensile strength of soil aggregates. **Soil & Tillage Research**, v. 28 p. 15-25, 1993.

CERDÀ. Soil water erosion on road embankments in eastern Spain. **Science of the Total Environment** v.378, p 151–155, 2007.

CHAMECKI, P. R.; SILVA, E. T. Estudo geotécnico de erosão em laboratório, aplicado a uma argila da Formação Guabirotuba. In: Simpósio Brasileiro de Geossintéticos, 2003, **Anais**. Porto Alegre: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2003

CITADINI-ZANETTE, V. Diagnóstico Ambiental da Região Carbonífera no Sul de Santa Catarina: Recuperação de áreas degradadas pela mineração de carvão. **Rev. Tecnologia e Ambiente**, vol. 5, n. 2, p. 51-61. 1999.

CLOUGH, G. W.; SITAR, N.; BACHUS, R. C.; RAD, N. S. Cemented sands under static loading. **Jornal Geotechnical Engineering**, v. 107, p. 799-817; 1981.

COELHO, A.T.; GALVÃO, T. C.; PEREIRA, A. R. The effects of vegetative cover in the erosion prevention of a road slope", **Environmental Management and Health**, Vol. 12 Iss 1 p. 78 – 87, 2001.

CONFORTI, M.; BUTTAUFUOCO, G.; LEONE, A.; MAUCELLI, G.R.; SCARCIGLIA F. Studying the relationship between water-induced soil erosion and soil organic matter using Vis–NIR spectroscopy and geomorphological analysis: A case study in southern Italy. **Catena** v.110 p 44–58, 2013 .

COSENTINO, D.; LE BISSONNAIS, Y.; CHENU, C. Aggregate stability and microbial community dynamics under drying-wetting cycles in a silt loam soil. **Soil Biology & Biochemistry** v.38, p. 2053–2062, 2006

COSME, P.R.D., **Obtenção de substâncias húmicas a partir do rejeito de carvão mineral: Métodos alternativos, caracterização e avaliação de possível aplicação.** Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia de Materiais da PUC-Rio, 2013.

COUTO L. Técnicas de bioengenharia para revegetação de taludes no Brasil – Viçosa, MG , Boletim técnico CBCN, 118p, 2010.

DA SILVA FILHO A.V., DA SILVA M.I.V. Importância das Substâncias Húmicas para a Agricultura. II Simposio Nacional sobre as culturas do Inhame e do Taro. **Anais** Empresa estadual de pesquisa agropecuária da Paraíba, 2002.

DA COSTA, J. B. Caracterização E Constituição Do Solo. Ed. Fundacao Caloste Gulbekian. Lisboa, Portugal. 1979.

DAYNES, C.N.; FIELD, D.J.; SALEEBA J.A.; COLE, M. A.; MCGEE, P.A. Development and stabilisation of soil structure via interactions between organic matter, arbuscular mycorrhizal fungi and plant roots. **Soil Biology & Biochemistry** v.57 p. 683-694, 2013.

DASS, R.N.; YEN, S.C.; PURL, V.K.; DAS, B.M.; WRIGHT M.A. Tensile Stress-Strain Behavior of Lightly Cemented Sand. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**. Vol.30, No.7, p. 711-714, 1993.

DEPARTAMENTO DE RECURSOS MINERAIS. Projeto rochas ornamentais. Pedra Miracema: a rocha ornamental de Santo Antônio de Pádua - diagnóstico preliminar. Niterói: DRM, jul. 1992. 40 p.

DEXTER, R.A; KROESBERGEN, B. Methodology for determination of tensile strength of soil aggregates. *Journal of Agricultural Engineering Research* v.31 (2). p.139–147 , 1985.

DEXTER, R. A.; RICHARD, G.; ARROUAYS, D.; CZYŻ, E. A.; JOLIVET, C.; DUVAL, O. Complexed organic matter controls soil physical properties. **Geoderma** v.144 p.620–627, 2008.

DICK, D. P.; NOVOTNY, E. H.; DIECKOW, J. ; BAYER, C. **Química da matéria orgânica do solo.** Departamento de Físico-Química, Instituto de Química, e PPG em Ciência do Solo, UFRGS, Porto Alegre. Centro Nacional de Pesquisa em Solos, Embrapa, Rio de Janeiro. Departamento de Solos e Engenharia Agrícola, Setor de Ciências Agrárias, UFPR, Curitiba. Departamento de Solos, Faculdade de Agronomia, UFRGS, Porto Alegre, 2010.

DNER-ME 258/94 Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Solos compactados em equipamento miniatura Mini.MCV- **Norma Rodoviária** 1994.

DOBBSS, L. B.; RUMJANECK, V.M.; BALDOTTO, M. A.; VELLOSO, A.C. X.; CANELLAS, L.P.; Caracterização Química e Espectroscópica de Ácidos Húmicos e Fúlvicos Isolados Da Camada Superficial de Latossolos Brasileiros . **Revista Brasileira. Ciencia do Solo**, v. 33 p.51-63, 2009.

EMBRAPA, **Manual de Métodos de Análise de Solo**, Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos, 1997.

EMBRAPA SOLOS **Curso de Recuperação de Áreas Degradadas. A Visão da Ciência do Solo no Contexto do Diagnóstico, Manejo, Indicadores de Monitoramento e Estratégias de Recuperação**. Rio de Janeiro, RJ. 2008.

EYHERAGUIBEL, B.; SILVESTRE, J.; MORARD, P. Effects of humic substances derived from organic waste enhancement on the growth and mineral nutrition of maize . **Bioresource Technology** v.99 p. 4206–4212, 2008.

FÁCIO, J. A. **Proposição de uma Metodologia de Estudo da Erodibilidade dos solos do Distrito Federal**. Dissertação de Mestrado, UnB, Brasília – DF. 1991.

FALLER, M. C. K. **Aspectos da Utilização de Substância Húmica no Tratamento de Água de Produção**. Rio de Janeiro, 85p. Tese - Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. 2006.

FERREIRA, C.S.M. Erosão- Investigações de Campo e de Laboratório Desenvolvidas pelo Instituto de Pesquisas Rodoviárias. **2o Simpósio Sobre Controle de Erosão**, São Paulo, SP., 1981.

FONSECA, A.M.M.C.C. Técnicas para Previsão, Prevenção e Contenção de Erosão em Taludes e Encostas. **2o Simpósio Sobre Controle de Erosão**, São Paulo, SP. 1981.

FORTUN, A.; FORTUN, C.; ORTEGA, C. Effect of farmyard manure and its humic fractions on the aggregate stability of a sandy-loam soil. **Journal of Soil Science** v.40, p 293–298, 1989.

FORTUN, A., TOMAS, R., FORTUN, C. Effect of bituminous materials on soil aggregation. **Arid Soil Research and Rehabilitation** v.10, pp 161–168. 1996

FRAGASSI, P.F.M., **Estudo da Erodibilidade dos solos Residuais de Gnaiss da Serra de São Geraldo e de Viçosa (MG)**. Dissertação de Mestrado. Engenharia Civil. Universidade Federal de Viçosa. 2001.

FRANCO, A.A.; CAMPELLO, E.F.C.; DIAS, L.E. & FARIA, S.M. Revegetação de áreas de mineração de bauxita em Porto Trombetas - PA com leguminosas arbóreas noduladas e micorrizadas. Simpósio Nacional: recuperação de áreas



degradadas, 1994, Foz do Iguaçu. **Anais**. Curitiba, Universidade Federal do Paraná, 1994. p.679.

GADD, G.M. Geomycology: biogeochemical transformations of rocks, minerals, metals and radionuclides by fungi, bioweathering and bioremediation . **Mycological research** v.111 p. 3 a 49 ,2007.

GLAZEWSKI, M.; EYMONTT, A. Agrotechnical anti-erosion reinforcement of slopes of the linear earthen structures by hydroseeding with fly-ash utilization, **Management of Environmental Quality: An International Journal**, Vol. 16 Iss 6 pp. 579 – 58 , 2005.

GRILLO, A.V.; GUIMARAES, C.M.; MACHADO, P.L.O.; PORTOCARRERO H.; MADARI,B.E.; Agregados e sua relação com o Estoque de Carbono Orgânico de um Latossolo de Cerrado, sob Diferentes Sistema de preparo do solo e rotação de culturas. **Anais** do IV Encontro Brasileiro de Substâncias Húmicas. UFV. Novembro 2001.

GARCIA, C.; HERNANDEZ, T.; COSTA, F. Organic Matter Characteristics and Eroded Soils Nutrient Content in. **Environmental Management** Vol. 20, No. 1, p. 133-141, 1996.

GOMES, F. S. **Estudo da erodibilidade e parâmetros geotécnicos de um solo em processo erosivo**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Pernambuco. 2001.

GRANDO, A.; MACIEL, C.; CORSEUIL, C.; MACCARINI, M.; KOBIYAMA, M.; HIGSHI, R., **Erodibilidade do solo de uma microbacia experimental**. XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2009.

GONÇALVES, F. C. **Análise micromorfológica e relação com atributos de um solo sob diferentes usos e manejos**. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2011.

GUANG, J.A.J.; ENGLANDE, JR, A field study on cost-effectiveness of five erosion control measures, **Management of Environmental Quality: An International Journal**, Vol. 20 Iss 1 p. 6– 20, 2009 .

GUCKERT, A.; CHONE, T.; JACQUIN, F.; Microflore et stabilité structurale des sols. **Revue de l'Ecologie et de la Biologie du Sol** 12, 211–223. 1975.

GUERRA, A.J.T.; DA SILVA,A.S.; BOTELHO,R.G.M. **Erosao e Conservação dos solos. Conceitos, temas e aplicações**. Rio de Janeiro. Bertrand Brasil 2010.

GUERRA, A. J. T.; JORGE, M. C. O. Organizadores. **Processos erosivos e recuperação de áreas degradadas**. São Paulo .Oficina de Textos . 2013

GUINEA, G. V.; ELICES, M. ; PLANAS, J. Assessment of the tensile strength through size effect curves. Eng. **Fracture Mechanics** v.65 , p.189- 207, 2000.

HASSINK J. The capacity of soils to preserve organic C and N by their association with clay and silt particles. **Plant and Soil** v.191 p. 77–87. Kluwer Academic Publishers. Printed in the Netherlands, 1997.

HAYNES R.J., FRANCIS G.S. Changes in microbial biomass C, soil carbohydrate composition and aggregate stability induced by growth of selected crop and forage species under field conditions. **Journal of Soil Science** 44, 665–675, 1993.

INDERBITZEN, A. L. An erosion test for soils. **Materials Research & Standards**, v. 1, n. 7, Technical Note, p. 553-554, 1961

KAY, B.D. **Soil structure and organic carbon: a review**. In: Lal, R., Kimble, J.M., Follett, R.F., Stewart, B.A. (Eds.), *Soil Processes and the Carbon Cycle*. CRC Press, Boca Raton, FL, pp. 169–197.1998

KIEHL, E.J. **Fertilizantes Orgânicos**. Ed. Agronômica Ceres, São Paulo, 492 p. 1985.

KINSBURSKY, R.S.; LEVANON, D.; YARON, B. Role of fungi in stabilizing aggregates of sewage sludge Amended soils. **Soil Science Society of America Journal** v.53, p. 1086–1091, 1989.

KLEIN, C. E.; DUTROW, B. *Manual de Ciência dos Minerais* (23ª edição). Bookman, Porto Alegre, 2012

KLEIN, C. HURLBUT JR.,C.S. *Manual of mineralogy* . 21<sup>st</sup> after Dana J.D. ed. John Wiley & Sons. Inc. 1993.

KNOFF, A. A. **Field guide of North America rocks and minerals** Press.Inc.Published in United States. Division of Random House, Inc., New York, 1979.

KUSHWAHA, C.P.; TRIPATHI, S.K.; SINGH, K.P. Soil organic matter and water-stable aggregates under different tillage and residue conditions in a tropical dry land agroecosystem. **Applied Soil Ecology** 16, 229–241. 2001.

LE BISSONNAIS, Y. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology. **European Journal Soil Science** v.47 p. 425–437, 1996

LEMONS, C.F.; SILVEIRA C.T.; MILANI J.R.;OKA-FIORI C.; FIORI A.P. **Avaliação da erosão entre sulcos em solos de diferentes classes de uso na bacia do rio da Bucha (PR), através do aparelho de Inderbitzen**. Revista Eletrônica Geografar. Curitiba, v.2, n.2, p.156-171, 2007

LEPSCH, I.F. **Formação e Conservação dos Solos**. Oficina de Textos . São Paulo 2002.

LI, M. ; MCFALLS J.; YI, Y. Comparing Erosion Control Products' Performance Results from Field and Large-Scale Laboratory Testing . **Indian Geotechnical Society** v.43(4), p 382–387. 2013.

LIMA, M.C. **Contribuição ao estudo do processo evolutivo de boçorocas na área urbana de Manaus**. Dissertação de Mestrado em Geotecnia, UnB, Brasília, DF, 1999.

LIMA, M. C. **Degradação físico-química e mineralógica de maciços junto as voçorocas**. Tese (Doutorado em Geotecnia), Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Tecnologia, UnB, Brasília, DF, 2003.

LÓPEZ-CERVANTES, R.; GALLEGOS-DEL TEJO, A.; PEÑA-CERVANTES, E.; REYES-LÓPEZ, A.; CASTRO-FRANCO, R.; CHÁVEZ-GONZÁLEZ, J. F. J. Substâncias húmicas de origen diverso en algunas propiedades físicas de un suelo franco-arcillo-limoso. **TERRA Latinoamericana**, Vol. 24, Núm. 3, p. 303-309, 2006.

MACIEL, I. C. Q. **Aspectos microestruturais e propriedades geomecânicas de um perfil de solo residual de gnaiss facoidal**. Dissertação de mestrado, Departamento de Engenharia Civil -PUC-Rio, R. J., 182 pp, 1991.

MAHARAJ, A. The Use of the Crumb Test as a Preliminary Indicator of Dispersive Soils . Proceedings of the 15th African Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. **Anais C. Quadros and S.W. Jacobsz (Eds.)**. IOS Press, 2011.

MADARI, B.E., **Agregados e sua Relação com o Estoque e Qualidade de Matéria Orgânica de Latossolos, sob Diferentes Sistemas de Preparo de Solo e Rotações de Culturas**. Projeto apresentado para fins de Bolsa de Fixação de Pesquisador (Faperj). Rio de Janeiro , 2000.

MARTENS, D.A. Plant residue biochemistry regulates soil carbon cycling and carbon sequestration. **Soil Biology & Biochemistry** 32, 361–369. 2000

MARTIN, T.L. The effect of composts and compost materials upon aggregation of the silt and clay particles of Collington sandy loam. **Soil Science Society of America Proceedings** v.7, p.218–222, 1942.

MARTINS, R. **Florística, estrutura fitossociológica e interações interespecíficas de um remanescente de floresta ombrófila densa como subsídio para recuperação de áreas degradadas pela mineração de carvão, Siderópolis, SC**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. Centro de Ciências Biológicas. Florianópolis, SC., 2005

MEDINA, H.; PEITER, C.C.; BESER DE DEUS, L.A. A cadeia produtiva de rochas ornamentais em Santo Antônio de Pádua. Centro de tecnologia mineral. **Comunicação técnica** ao XXIII ENEGEP Encontro Nacional de Engenharia de Produção, Ouro Preto na Escola de Minas da UFOP, 2003.

MITCHELL, J.K., SOGA K., **Fundamentals of Soil behavior**. Published by John Wiley & Sons, Inc. Hoboken. New Jersey .(2005)

MORAIS, F.; BACELLAR, L.A.; SOBREIRA, F. G. Analise da erodibilidade de saprolitos de gnaiss. **Revista Brasileira de Ciência de Solo** , v. 28 p.1055-1062, 2004

MOREIRA, P.R. **Manejo do solo e decomposição da vegetação com vistas a recuperação de áreas degradadas pela extração de bauxita, poços de caldas, MG**. Tese de Doutorado. Instituto de Biociências da Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”, Campus de Rio Claro. Rio Claro Estado de São Paulo – Brasil , 2004.

MORTARI, D. **Caracterização Geotécnica e Analise do Processo Evolutivo das Erosões No Distrito Federal**. Dissertação (Mestrado em Geotecnia), Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Tecnologia, UnB, Brasília, DF., 1994.

MUNSEL, A. **Munsell soil color charts**, Munsell Color, Baltimore. 1975

NACINOVIC, M. G. G.; MAHLER, C. F .; AVELAR, A.S. Soil erosion as a function of different agricultural land use in Rio de Janeiro. **Soil & Tillage Research** V.144 p. 164–173, 2014.

NADAL-ROMERO, E.; VERACHTERT, E. ; MAES R.; POESEN J. Quantitative assessment of the piping erosion susceptibility of loess-derived soil horizons using the pinhole test. **Geomorphology** v.135 p. 66–79, 2011.

NARDI, S.; PIZZEGHELLO, D.; RENIERO, F.; MUSCOL O. Biological activity of humic substances extracted from soils under different vegetation cover. **Communications in soil Science and Plant Analysis**, v. 30(5), p. 621-634, 1999.

N'DAYEGAMIYE, A.; ANGERS, D.A. Organic matter characteristics and water stable aggregation of a sandy loam soil after 9 years of wood-residue applications. **Canadian Journal of Soil Science** v.73, p.115–122, 1993.

NOGUEIRA, J. F. **Analise da influência do fluxo por capilaridade na degradação físico-química do solo**. Tese (Doutorado em Geotecnia), Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Tecnologia, UnB, Brasília, DF, 2005.

OADES, J.M. Soil Organic Matter and Structural Stability: Mechanisms and implications for management. **Plant and Soil** v.76, p. 319-337, 1984

OLIVEIRA, E.P., Caracterização bio-físico-químico-mineralógica e micromorfológica de um perfil de alteração de granitognaisse de Curitiba, PR Dissertação de mestrado, Departamento de Engenharia Civil, PUC-Rio, 2006.

PACHECO, E.P. **Uso de prensa manual como alternativa para determinação da compressibilidade de solos agrícolas.** Comunicado técnico 111. Embrapa 2010.

PARÉ, T.; DINEL, H.; MOULIN, A.P.; TOWNLEY-SMITH, L. Organic matter quality and structural stability of a Black Chernozemic soil under different manure and tillage practices. **Geoderma** v.91, p.311–326, 1999

PHAM, T. L.; CHEVALIER, C.; DUC, M.; REIFFSTECK, M.; GUEDON, S. Development Of A New Test to Characterize Dispersion of Soil. **Fourth International Conference on Scour and Erosion** . Tokio, 2008.

PEITER, C.C. Abordagem Participativa na Gestão de Recursos Minerais/CETEM/MCT, Rio de Janeiro, 2001. 48 p.

PICCOLO, A. P.; CONTE, A. F.; PATTI, O. Alkylation of a lignite humic acid by phase-transfer catalysis, **Analitical and Bioanalitical Chemistry**, v. 384, p. 994-1001, 2006.

PICCOLO, A. ; PIETRAMELLARA, G.; MBAGWU, J.S.C. Reduction in soil loss from erosion-susceptible soils amended with humic substances from oxidized coal **Soil Technology** v.10, p 235-245, 1997.

PORTOCARRERO, H. **Avaliação de efeito de técnicas de bioengenharia em parâmetros hidrosedimentológicos utilizando instrumentação automatizada.** Tese de doutorado. Departamento de Engenharia Civil. Pontifícia Universidade do Rio de Janeiro . 2009.

QIAN, X.; KOERNER, R.M. AND GRAY, D.H. **Geotechnical Aspects of Landfill Design and Construction.** Prentice-Hall Inc., New Jersey, p. 717, 2002.

RAHIMI, H.; PAZIRA, E.; TAJIK, F. Effect of soil organic matter, electrical conductivity and sodium adsorption ratio on tensile strength of aggregates. **Soil & Tillage Research** v.54, p.145 -153, 2000.

RAMIDAN, M.A.S **Estudo de um Processo de Voçorocamento próximo a UHE de Itumbiara –GO** Dissertação de mestrado .Departamento de Engenharia Civil. Pontifícia Universidade do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2003.

RONQUIM, C. C. Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais. Embrapa Monitoramento por Satélite. **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento**, Campinas, 2010.

ROTH, C.H.; CASTRO FILHO, C. de; MEDEIROS, G.B.de. Analise de fatores físicos e químicos relacionado com a agregação de um latossolo roxo distrófico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo.** v. 15 p.241-244 , 1991.

SANTOS, R. M. M. **Caracterização Geotécnica e Análise do Processo Evolutivo das Erosões no Município de Goiânia.** Dissertação de Mestrado, UnB, Brasília, DF, 1997.

SANTOS, P. S. **Tecnologia das argilas**. Vol 1 Fundamentos. São Paulo . Ed. Universidade de São Paulo , 1975.

SCHULTEN, H. R.; SCHNITEZR M. A state of the art structural for soil organic matter and soils. **Naturwissenschaften** . v.80, p.29-30 . 1993

SCHULTEN H. R.;SCHNITEZR M. Chemical model structures for soil organic matter and soil . **Soil Science** . v.162, p. 115-130, 1997

SPACCINI, R.; MBAGWU, J.S.C.; IGWE, C.A.; CONTE, P.; PICCOLO, A. Carbohydrates and aggregation in lowlands soils of Nigeria as influenced by organic inputs. **Soil & Tillage Research** v.75, p.161–172, 2004

SENESI, N.; PLAZA, C.; BRUNETTI, G.; POLO, A. A comparative survey of recent results on humic-like fractions in organic amendments and effects on native soil humic substances. **Soil Biology & Biochemistry** v.39 p. 1244–1262, 2007.

SKINNER, F.A. Rothamsted studies of soil structure. VII. The effects of incubation on soil aggregate stability. **Journal of Soil Science** v.30 p.473–481, 1979

SILVA, L.F.DA ; MIELNIESUK, J. Sistemas de cultivo e características do solo afetando a estabilidade de agregados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v.22, p 311-317, 1998

SILVA, T.R. ; LACERDA, W. A. Erodibilidade dos solos de uma voçoroca da região de Ouro Preto , Mina Gerais. **Anais**. Simpósio Nacional de Controle de Erosão. Goiânia (GO), 2001.

SIX, J.; CONANT, R. T.; PAUL E. A.; PAUSTIAN, K. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils **Plant and Soil** v.241, p. 155–176, 2002.

SIX, J.; BOSSUYT, H.; DEGRYZE, S.; DENEFF, K. A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. **Soil & Tillage Research** v.79 , p 7–31, 2004.

SOUZA, T. T.; LIMA, A.B.; TEIXEIRA, W.G. O Aumento da Capacidade de Troca de Cátions (CTC) do solo através da aplicação do carvão vegetal em um latossolo amarelo na Amazônia Central. **Ciências Agrárias**. Ciência do Solo, 2006.

SPARKS, D.L. **Environmental Soil Chemistry**. Academic Press. San Diego California. 1995.

STEVENSON, F.J. **Humus Chemistry: Genesis, composition, reactions**. John Wiley & Sons, New York, 1994. 443 p.

SUN, L.; FANG, H.; QI, D.; LI, J.; CAI, Q. A Review on Rill Erosion Process and Its Influencing Factors. **Chinese Geographical Science**. v. 23 No. 4 pp. 389–402, 2013.

TOMÈ Jr. J.B. **Manual para interpretação de análise de solo**. Ed. Guaíba: Agropecuária, 1997.

UMESH, T.S.; DINESH, S.V.; PUVVADI SIVAPULLAIAH, V. Characterization of Dispersive Soils . **Materials Sciences and Applications** v.2, p. 629-633, 2011.

VARGAS, Milton. **Introdução à Mecânica dos Solos**. São Paulo, Mcgraw-Hill do Brasil, Ed. Universidade de São Paulo, 1977.

VEIGA, M. da. **Erodibilidade em Entressulcos e Algumas Propriedades Físicas, Químicas e Mineralógicas de Solos do Rio Grande do Sul, em Laboratório**. Dissertação de Mestrado, UFRG, Porto Alegre, 116 p., 1988.

VETTERLEIN, D.; HÜTTL R.F. Can applied organic matter fulfil similar functions as soil organic matter? Risk-benefit analysis for organic matter application as a potential strategy for rehabilitation of disturbed ecosystems. **Plant and Soil** v.213 p.1-10, 1999.

VILLIBOR, D. F., NOGAMI, J. S. **Pavimentos Econômicos: Tecnologia do Uso dos Solos Arenosos Finos Lateríticos**. Arte e Ciência. São Paulo, SP, 2009.

VILLAR, L. F. S.; DE CAMPOS, T. M. P.; ZORNBERG, J. G. Relação Entre a Resistência a Tração Obtida via Ensaio Brasileiro, a Sucção e Índices Físicos de um Solo. **Anais**. VI Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados. Salvador-Bahia, 2007.

VIRTO, I.; BARRÉ, P.; CHENU, C. Microaggregation and organic matter storage at the silt-size scale **Geoderma** v.146 p.326–335, 2008.

WATTEAU, F.; VILLEMIN, G.; BARTOLI, F.; SCHWARTZ, C.; MOREL, J.L. 0e20 mm aggregate typology based on the nature of aggregative organic materials in a cultivated silty topsoil . **Soil Biology & Biochemistry** v.46 p.103e114, 2012.

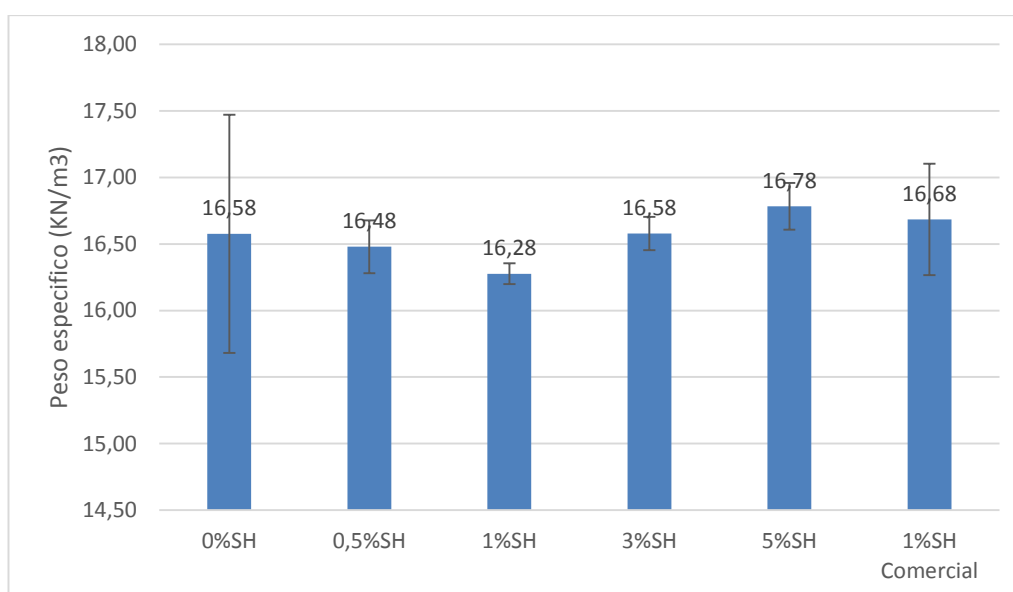
WILLIAMSON, J.C.; JOHNSON, D.B. Conservation of mineral nitrogen in restored soils at opencast coalmine sites: II. The effects of inhibition of nitrification and organic amendments on nitrogen losses and soil microbial biomass. **European Journal of Soil Science** v.45 p.319-326, 1994.

## Anexo 1. Medições dos corpos de prova

A seguir serão apresentados os cálculos das medições realizadas nos corpos de prova do ensaio de desagregação. No gráfico A.1 e na tabela A.1 estão apresentados os pesos específicos considerando a média das três repetições realizadas nos corpos de prova armazenados por dois meses, no gráfico se observa as barras de erro das medições considerando o desvio padrão.

**Tabela A1 . Peso específico dos corpos de prova com dois meses de armazenamento a ser usados no ensaio de desagregação**

Substância húmica	0%SH	0,5%SH	1%SH	3%SH	5%SH	1%SH Comercial
Peso específico (KN/m <sup>3</sup> )	16,58	16,48	16,28	16,58	16,78	16,68
Variância	0,80	0,04	0,01	0,02	0,03	0,17
Desvio padrão	0,90	0,20	0,08	0,13	0,18	0,42



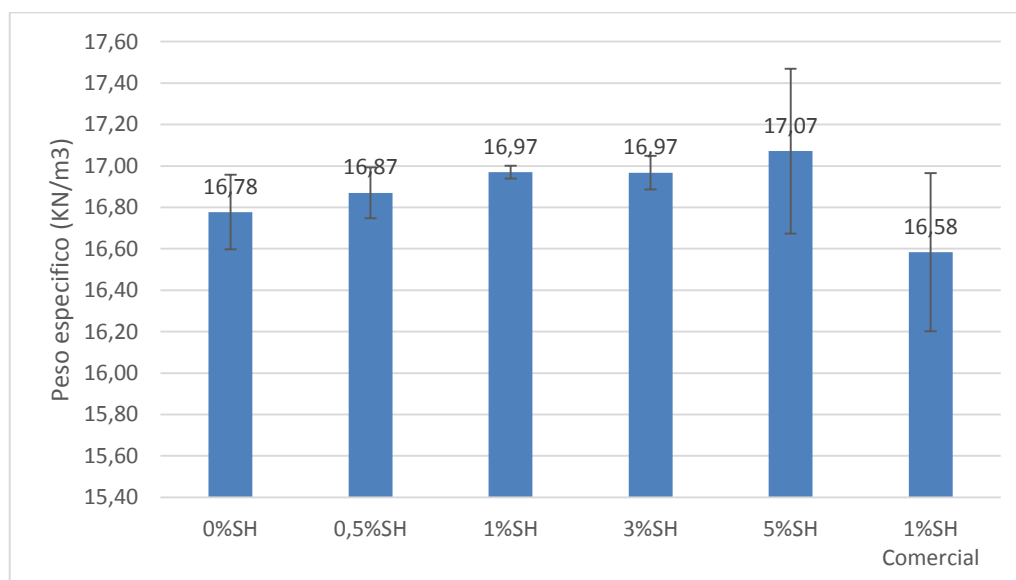
**Figura A.1 Gráfico do peso específico dos corpos de prova com dois meses de armazenamento a ser usados no ensaio de desagregação**



Da mesma forma na tabela A.2 estão apresentadas os valores da média dos pesos específicos nas três repetições realizadas nos corpos de prova armazenados por cinco meses. As barras de erro considerando o desvio padrão das medições estão apresentadas no gráfico da Figura A.2.

**Tabela A2 Peso específico dos corpos de prova com cinco meses de armazenamento a ser usados no ensaio de desagregação**

Substância húmica	0%SH	0,5%SH	1%SH	3%SH	5%SH	1%SH Comercial
Peso específico (KN/m <sup>3</sup> )	16,78	16,87	16,97	16,97	17,07	16,58
Variância	0,03	0,01	0,00	0,01	0,16	0,15
Desvio padrão	0,18	0,12	0,03	0,08	0,40	0,38

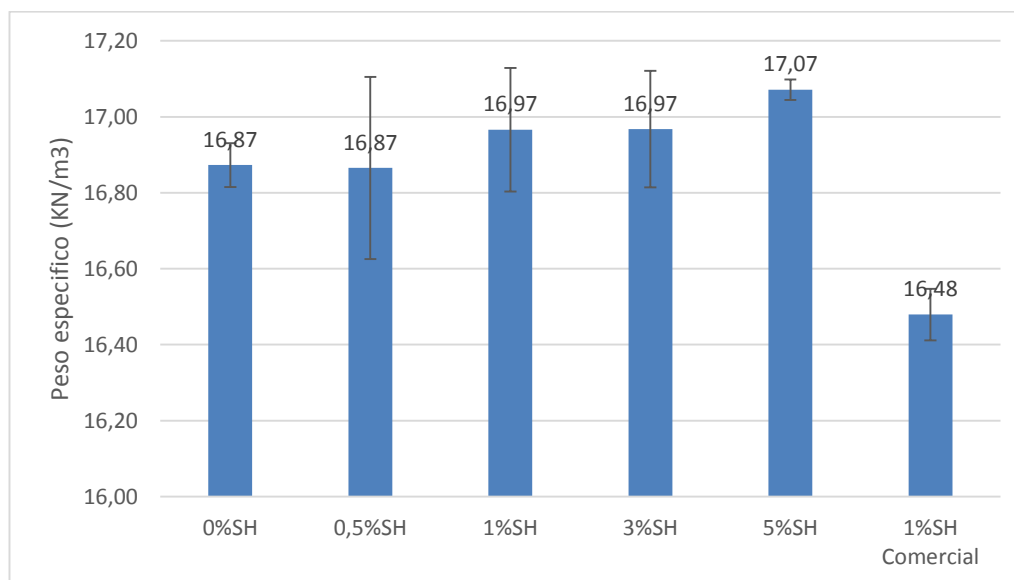


**Figura A.2 Gráfico do peso específico dos corpos de prova com cinco meses de armazenamento a ser usados no ensaio de desagregação**

Na tabela A.3 estão apresentadas os valores das medias dos pesos específicos nas três repetições realizadas nos corpos de prova armazenados por cinco meses, as barras de erro representando o desvio padrão das medições estão apresentadas no gráfico da figura A.3.

**Tabela A.3 Peso específico dos corpos de prova armazenados doze meses a ser usados no ensaio de desagregação**

Substância húmida	0%SH	0,5%SH	1%SH	3%SH	5%SH	1%SH Comercial
Peso específico (KN/m <sup>3</sup> )	16,87	16,87	16,97	16,97	17,07	16,48
Variância	0,00	0,06	0,03	0,02	0,00	0,00
Desvio padrão	0,06	0,24	0,16	0,15	0,03	0,07

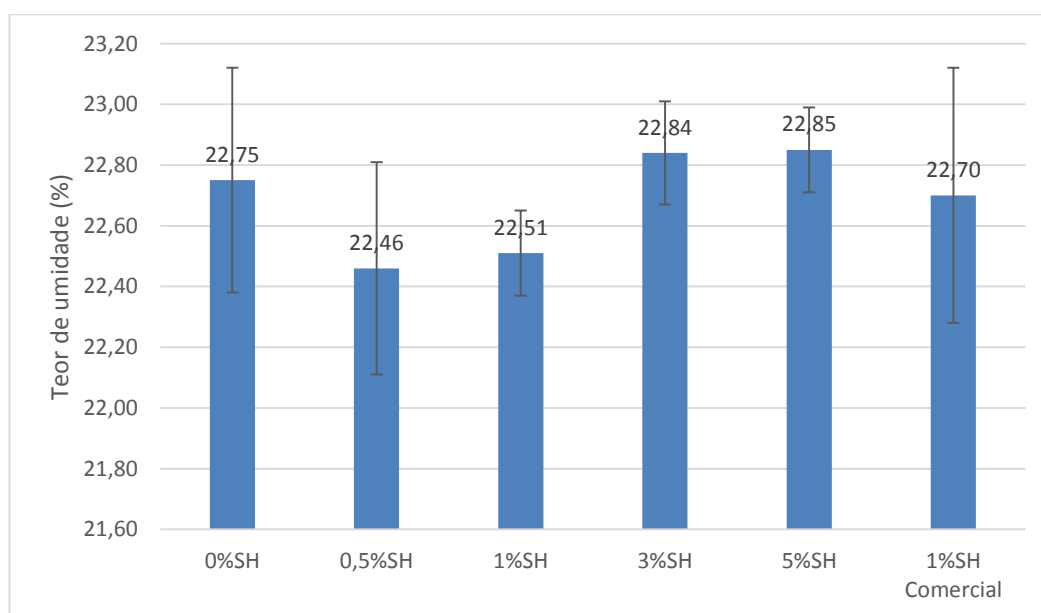


**Figura A.3 Gráfico do peso específico dos corpos de prova com doze meses de armazenamento a ser usados no ensaio de desagregação.**

A seguir serão apresentados os valores médios do teor de umidade dos corpos de prova do ensaio de desagregação em corpos de prova com dois meses de armazenamento na tabela A.4. Posteriormente serão apresentados os valores de dos corpos de prova com cinco meses de armazenamento na tabela A5 e gráfico A5 e de um ano de armazenamento na tabela A.6 e gráfico A6.

**Tabela A.4 Teor de Umidade dos corpos de prova armazenados dois meses a ser utilizados no ensaio de desagregação.**

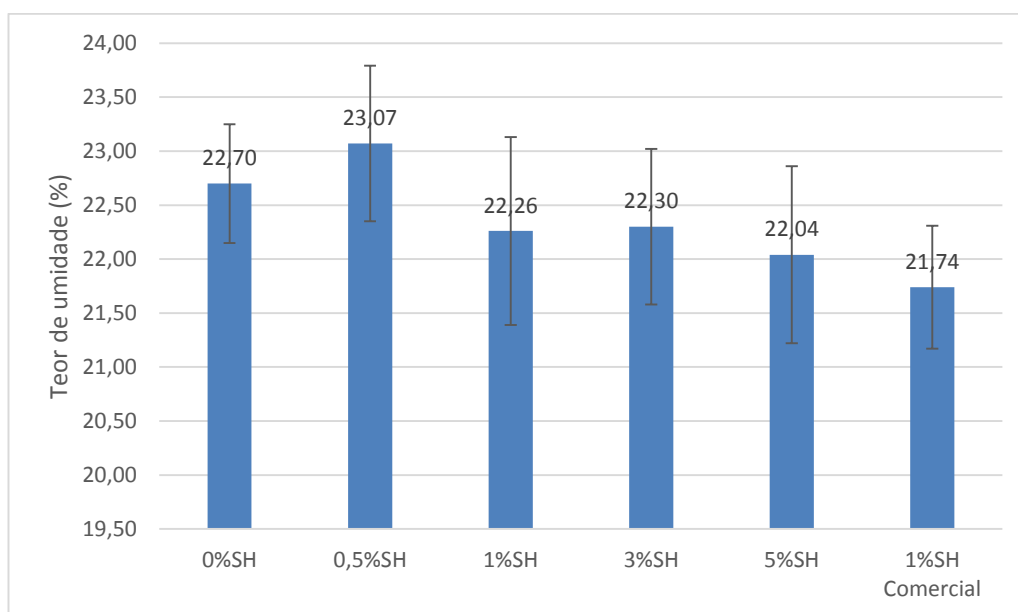
Substância húmica	0%SH	0,5%SH	1%SH	3%SH	5%SH	1%SH Comercial
Teor de umidade (%)	22,75	22,46	22,51	22,84	22,85	22,7
Variância	0,14	0,12	0,02	0,03	0,02	0,18
Desvio padrão	0,37	0,35	0,15	0,17	0,14	0,42



**Figura A.4 Gráfico do teor de umidade dos corpos de prova com dois meses de armazenamento a ser usados no ensaio de desagregação.**

**Tabela A.5 Teor de Umidade (%) dos corpos de prova armazenados cinco a ser usados no ensaio de desagregação**

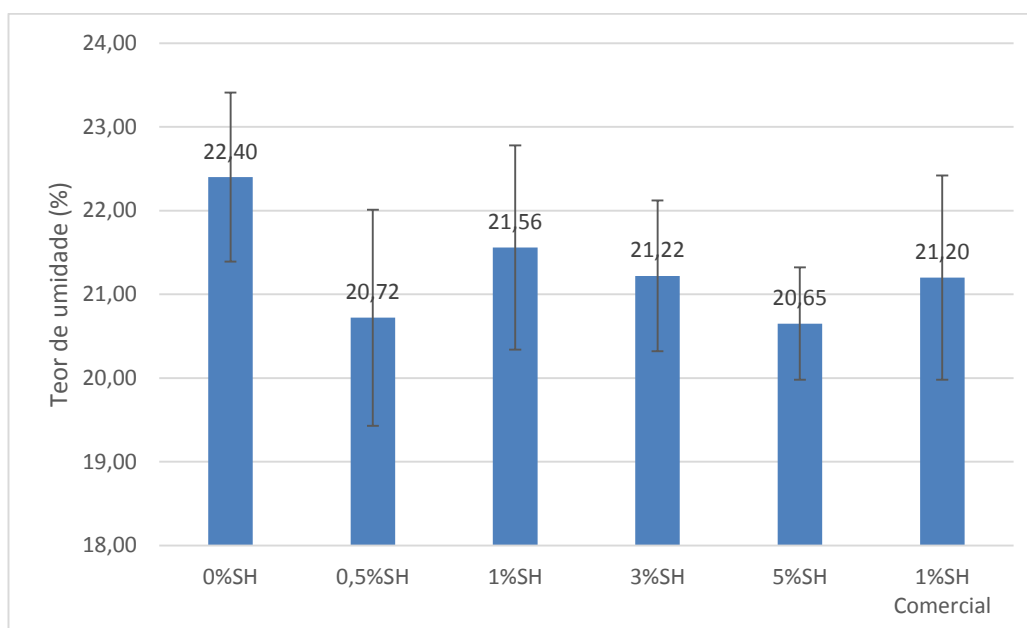
Substância húmica	0%SH	0,5%SH	1%SH	3%SH	5%SH	1%SH Comercial
Teor de umidade (%)	22,70	23,07	22,26	22,3	22,04	21,74
Variância	0,30	0,50	0,76	0,52	0,67	0,32
Desvio padrão	0,55	0,71	0,87	0,72	0,82	0,57



**Figura A.5 Gráfico do teor de umidade dos corpos de prova com cinco meses de armazenamento a ser usados no ensaio de desagregação.**

**Tabela A.6 Teor de Umidade (%) dos corpos de prova armazenados doze meses a ser usados no ensaio de desagregação**

Substância húmica	0%SH	0,5%SH	1%SH	3%SH	5%SH	1%SH Comercial
Teor de umidade (%)	22,40	20,72	21,56	21,22	20,65	21,2
Variância	1,02	1,66	1,49	0,81	0,45	1,44
Desvio padrão	1,01	1,29	1,22	0,90	0,67	1,20



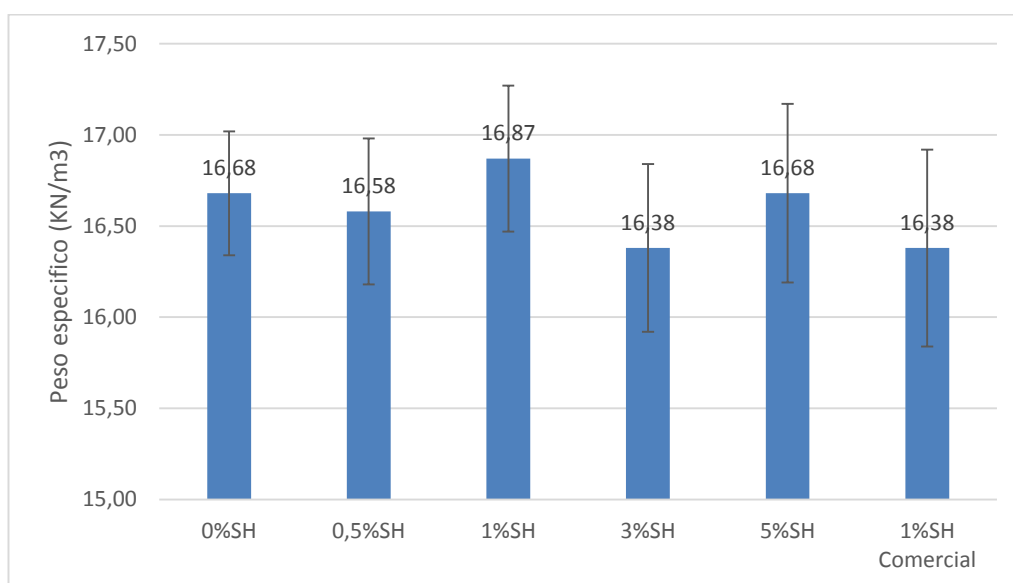
**Figura A.6 Gráfico do teor de umidade dos corpos de prova com doze meses de armazenamento a ser usados no ensaio de desagregação.**

## Medições do ensaio de compressão diametral

A seguir serão apresentados os cálculos das medições realizadas nos corpos de prova do ensaio de compressão diametral. São apresentados os valores das médias do peso específico dos corpos de prova e no gráfico apresentasse o desvio padrão nas barras de erro.

**Tabela A.7** Peso específico dos corpos de prova armazenados dois meses a ser usados no ensaio de compressão diametral

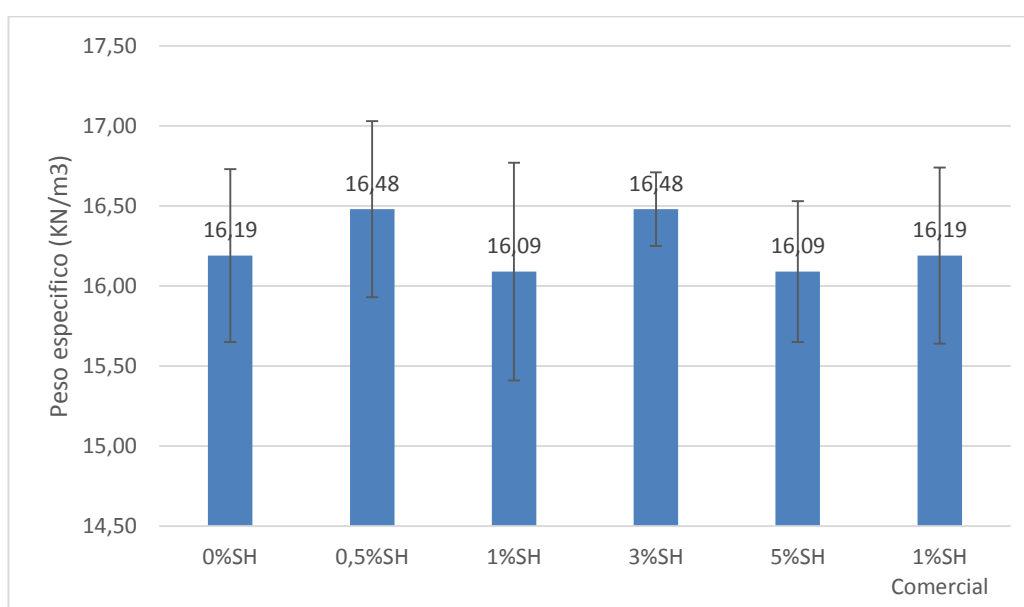
Substância húmica	0%SH	0,5%SH	1%SH	3%SH	5%SH	1%SH Comercial
Peso específico (KN/m <sup>3</sup> )	16,68	16,58	16,87	16,38	16,68	16,38
Variância	0,12	0,16	0,16	0,21	0,24	0,29
Desvio padrão	0,34	0,40	0,40	0,46	0,49	0,54



**Figura A.7** Gráfico do peso específico dos corpos de prova com dois meses de armazenamento a ser usados no ensaio de compressão diametral.

**Tabela A.8 Peso específico dos corpos de prova armazenados cinco meses a ser usados no ensaio de compressão diametral.**

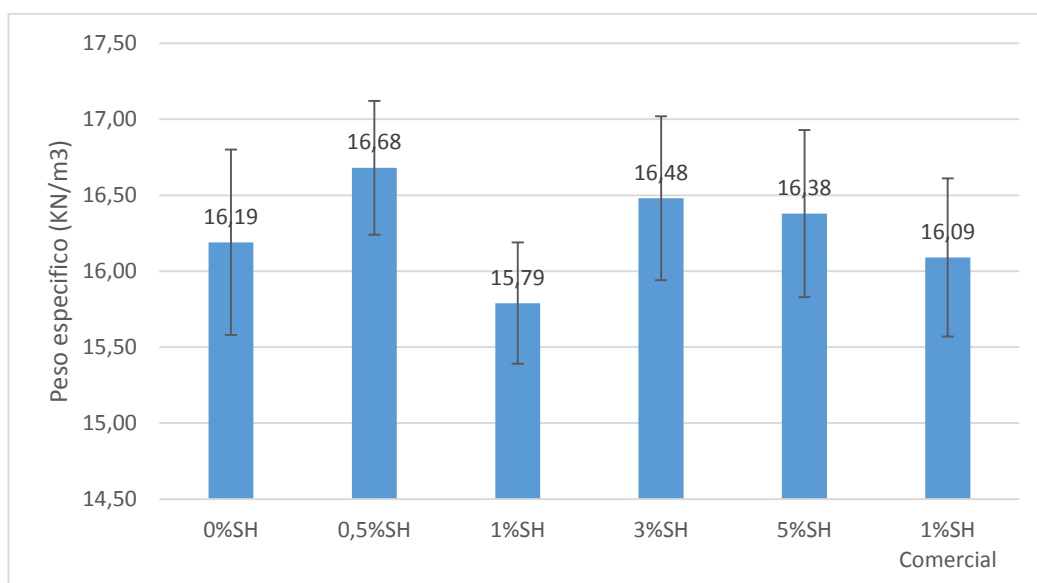
Substância húmica	0%SH	0,5%SH	1%SH	3%SH	5%SH	1%SH Comercial
Peso específico (KN/m <sup>3</sup> )	16,19	16,48	16,09	16,48	16,09	16,19
Variância	0,29	0,30	0,46	0,05	0,19	0,28
Desvio padrão	0,54	0,55	0,68	0,23	0,44	0,53



**Figura A.8 Gráfico do peso específico dos corpos de prova com cinco meses de armazenamento a ser usados no ensaio de compressão diametral.**

**Tabela A.9** Peso específico dos corpos de prova armazenados doze meses usados no ensaio de compressão diametral.

Substância húmica	0%SH	0,5%SH	1%SH	3%SH	5%SH	1%SH Comercial
Peso específico (KN/m <sup>3</sup> )	16,19	16,68	15,79	16,48	16,38	16,09
Variância	0,37	0,19	0,16	0,29	0,30	0,27
Desvio padrão	0,61	0,44	0,40	0,54	0,55	0,52



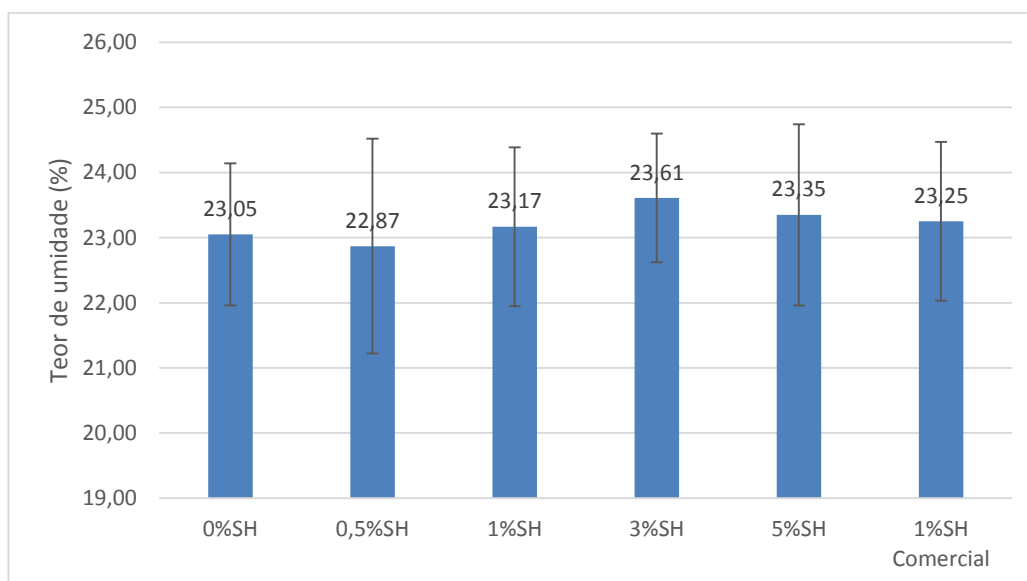
**Figura A.9** Gráfico do peso específico dos corpos de prova com doze meses de armazenamento a ser usados no ensaio de compressão diametral.



Nas Tabelas A.10, A.11, A.12 são apresentados os valores das médias do teor de umidade dos corpos de prova a ser submetidos a compressão diametral. Ilustrando os valores nas Figuras A.10, A.11, A.12.

**Tabela A.10 Teor de umidade dos corpos de prova armazenados dois meses usados no ensaio de compressão diametral**

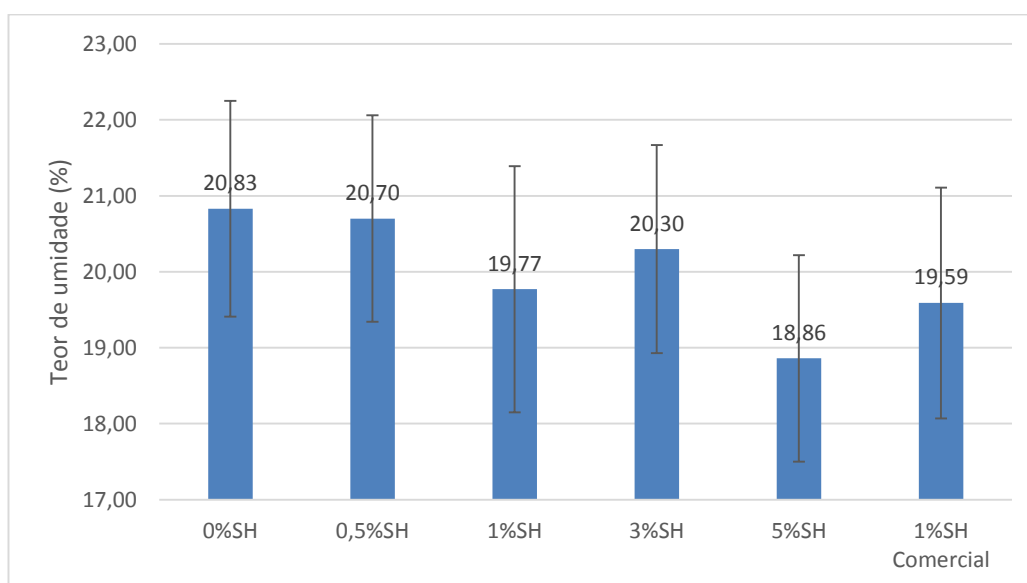
Substância húmica	0%SH	0,5%SH	1%SH	3%SH	5%SH	1%SH Comercial
Teor de umidade (%)	23,05	22,87	23,17	23,61	23,35	23,25
Variância	1,19	2,72	1,49	0,98	1,93	1,49
Desvio padrão	1,09	1,65	1,22	0,99	1,39	1,22



**Figura A.10 Gráfico do teor de umidade dos corpos de prova com dois meses de armazenamento a ser usados no ensaio de compressão diametral.**

**Tabela A.11 Teor de umidade dos corpos de prova armazenados cinco meses a ser usados no ensaio de compressão diametral**

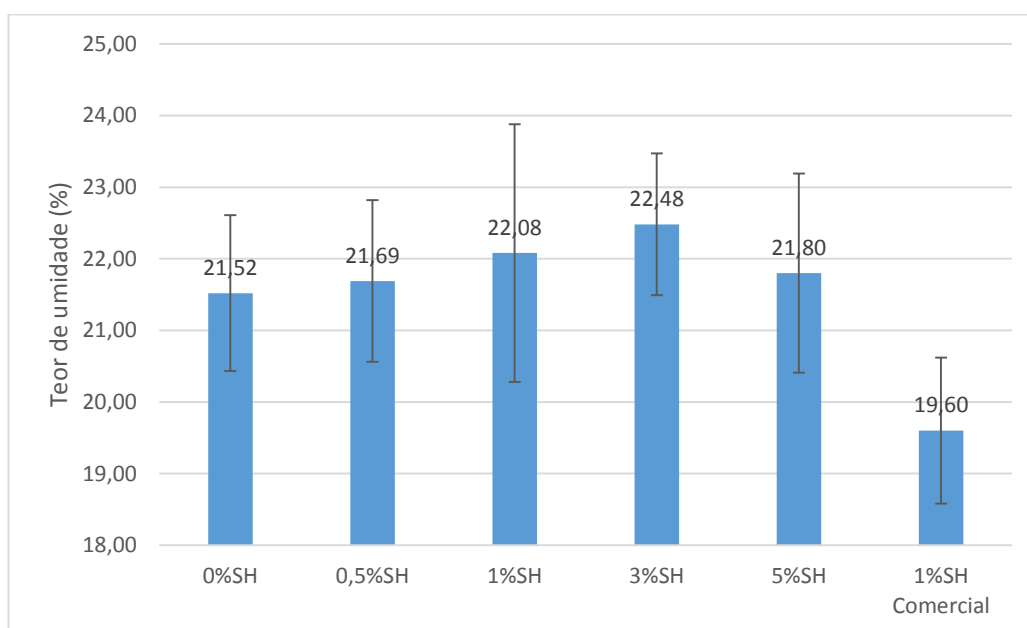
Substância húmica	0%SH	0,5%SH	1%SH	3%SH	5%SH	1%SH Comercial
Teor de umidade (%)	20,83	20,7	19,77	20,3	18,86	19,59
Variância	2,02	1,85	2,62	1,88	1,82	2,31
Desvio padrão	1,42	1,36	1,62	1,37	1,35	1,52



**Figura A.11 Gráfico do teor de umidade dos corpos de prova com cinco meses de armazenamento a ser usados no ensaio de compressão diametral.**

**Tabela A.12 Teor de umidade dos corpos de prova armazenados 12 meses a ser usados no ensaio de compressão diametral**

Substância húmica	0%SH	0,5%SH	1%SH	3%SH	5%SH	1%SH Comercial
Teor de umidade (%)	21,52	21,69	22,08	22,48	21,80	19,6
Variância	1,19	1,28	3,24	0,98	1,93	1,04
Desvio padrão	1,09	1,13	1,80	0,99	1,39	1,02



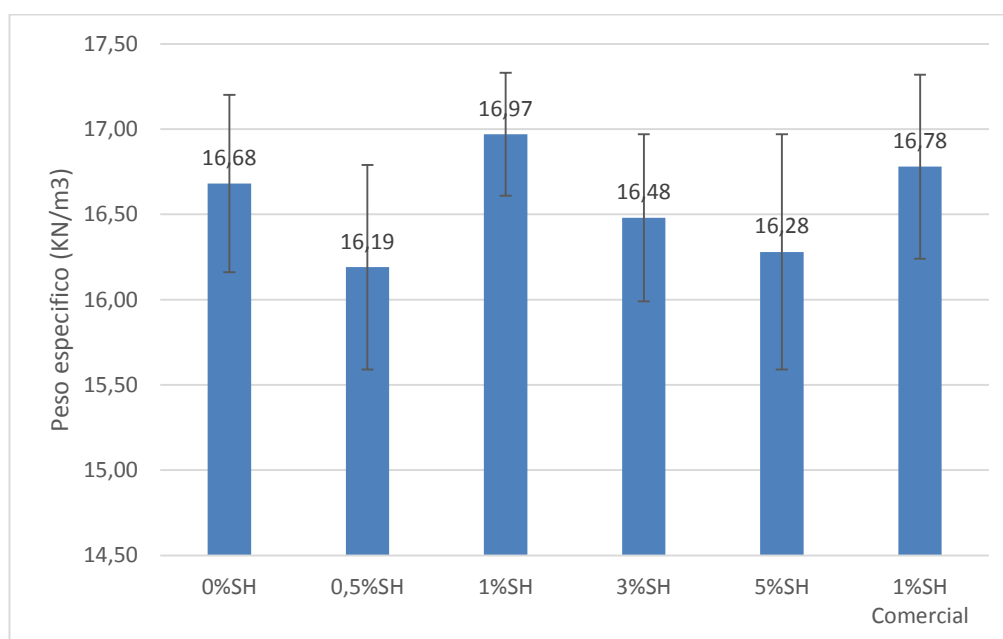
**Figura A.12 Gráfico do teor de umidade dos corpos de prova com dois meses de armazenamento a ser usados no ensaio de compressão diametral.**

## Medições do ensaio furo de agulha

A seguir serão apresentados os cálculos das medições realizadas nos corpos de prova do ensaio furo de agulha. São apresentados os valores das médias do peso específico dos corpos de prova e no gráfico apresentasse o desvio padrão nas barras de erro nas tabelas A.13, A.14 e A.15.

**Tabela A. 13 Peso específico dos corpos de prova armazenados dois meses a ser utilizados no ensaio furo de agulha**

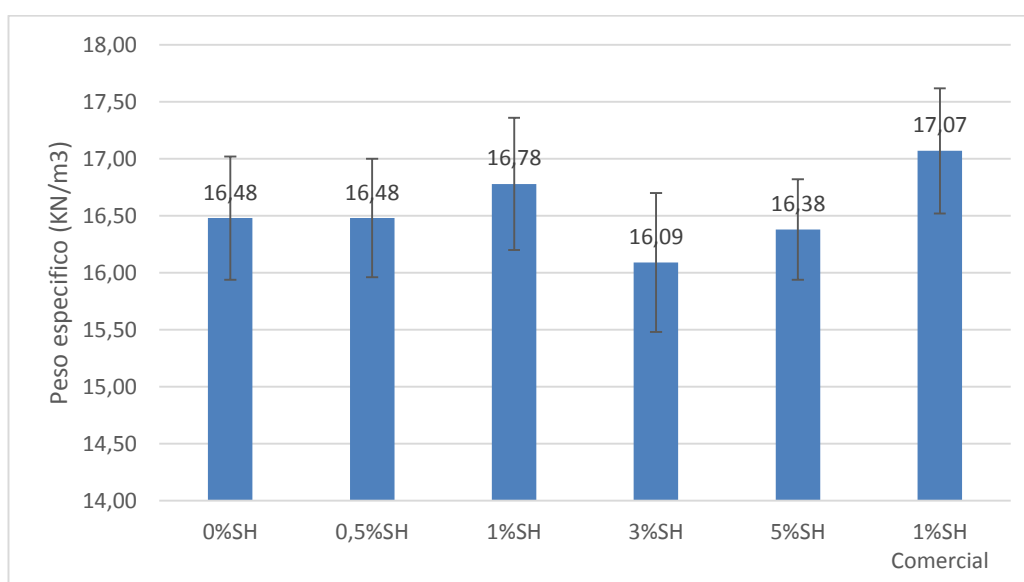
Substância húmica	0%SH	0,5%SH	1%SH	3%SH	5%SH	1%SH Comercial
Peso específico (KN/m <sup>3</sup> )	16,68	16,19	16,97	16,48	16,28	16,78
Variância	0,27	0,36	0,13	0,24	0,48	0,29
Desvio padrão	0,52	0,60	0,36	0,49	0,69	0,54



**Figura A.13 Gráfico do peso específico dos corpos de prova com dois meses de armazenamento a ser usados no ensaio furo de agulha.**

**Tabela A.14 Peso específico dos corpos de prova armazenados cinco meses a ser usados no ensaio furo de agulha.**

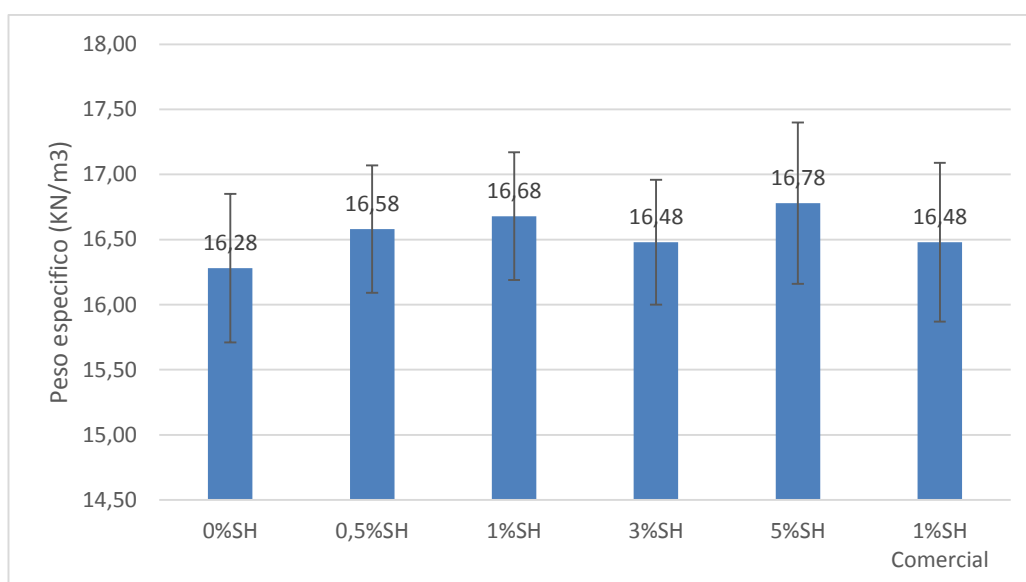
Substância húmica	0%SH	0,5%SH	1%SH	3%SH	5%SH	1%SH Comercial
Peso específico (KN/m <sup>3</sup> )	16,48	16,48	16,78	16,09	16,38	17,07
Variância	0,29	0,27	0,34	0,37	0,19	0,30
Desvio padrão	0,54	0,52	0,58	0,61	0,44	0,55



**Figura A.14 Gráfico do peso específico dos corpos de prova com cinco meses de armazenamento a ser usados no ensaio furo de agulha.**

**Tabela A.15** Peso específico dos corpos de prova armazenados doze meses a ser usados no ensaio furo de agulha.

Substância húmida	0%SH	0,5%SH	1%SH	3%SH	5%SH	1%SH Comercial
Peso específico (KN/m <sup>3</sup> )	16,28	16,58	16,68	16,48	16,78	16,48
Variância	0,32	0,24	0,24	0,23	0,38	0,37
Desvio padrão	0,57	0,49	0,49	0,48	0,62	0,61

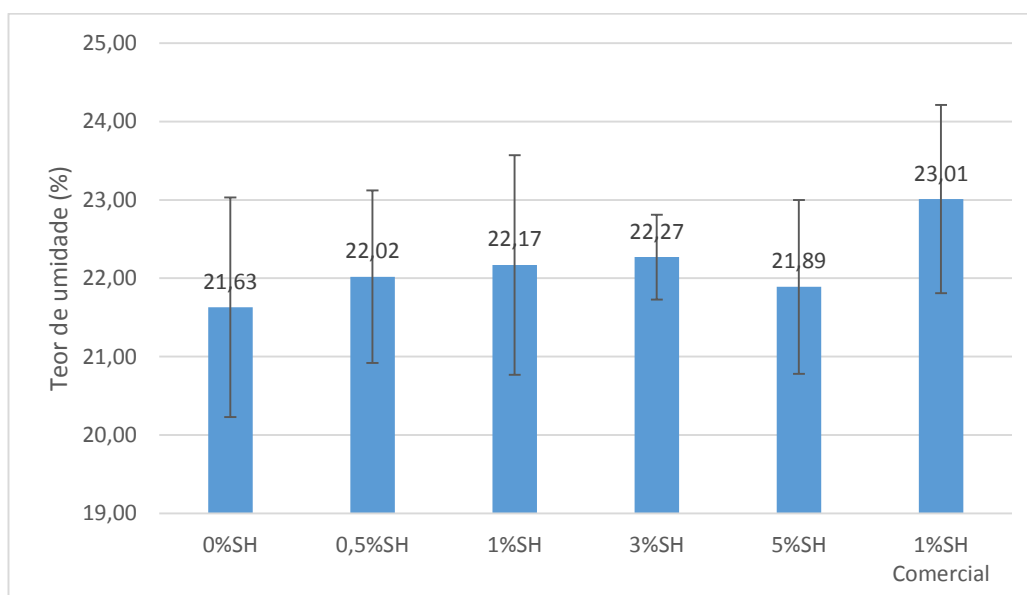


**Figura A.15** Gráfico do peso específico dos corpos de prova com doze meses de armazenamento a ser usados no ensaio furo de agulha.

Nas tabelas A.16 , A.17, A.18 são apresentados os valores das médias do teor de umidade dos corpos de prova utilizados no ensaio furo de agulha.

**Tabela A. 16 Teor de umidade dos corpos de prova armazenados dois meses a ser usados no ensaio furo de agulha.**

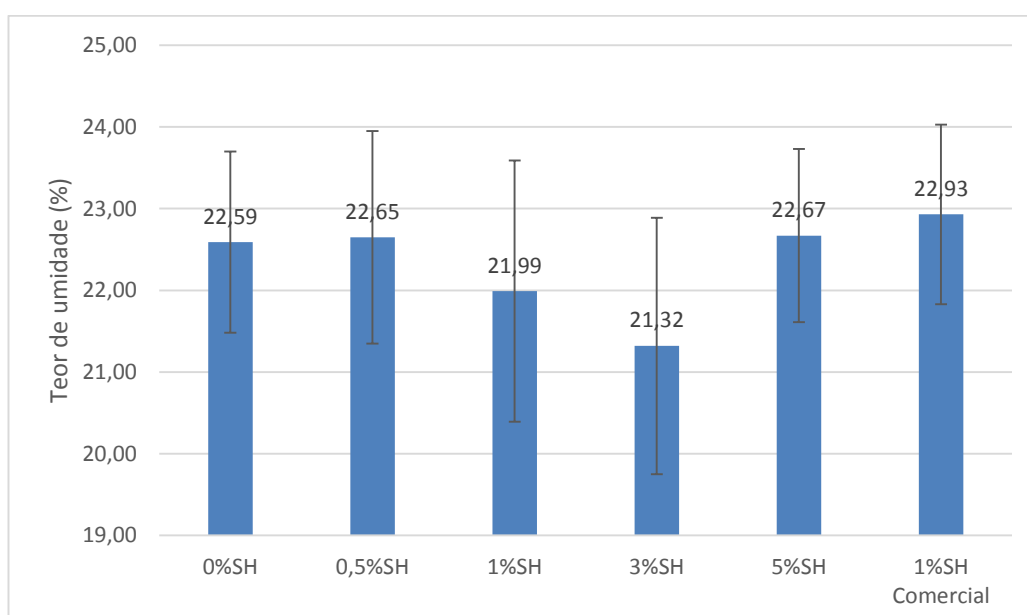
Substância hímica	0%SH	0,5%SH	1%SH	3%SH	5%SH	1%SH Comercial
Teor de umidade (%)	21,63	22,02	22,17	22,27	21,89	23,01
Variância	1,96	1,21	1,96	0,29	1,23	1,44
Desvio padrão	1,40	1,10	1,40	0,54	1,11	1,20



**Figura A.16 Gráfico do teor de umidade dos corpos de prova com dois meses de armazenamento a ser usados no ensaio furo de agulha.**

**Tabela A.17 Teor de umidade dos corpos de prova armazenados cinco meses a ser usados no ensaio furo de agulha.**

Substância húmida	0%SH	0,5%SH	1%SH	3%SH	5%SH	1%SH Comercial
Teor de umidade (%)	22,59	22,65	21,99	21,32	22,67	22,93
Variância	1,23	1,69	2,56	2,46	1,12	1,21
Desvio padrão	1,11	1,30	1,60	1,57	1,06	1,10

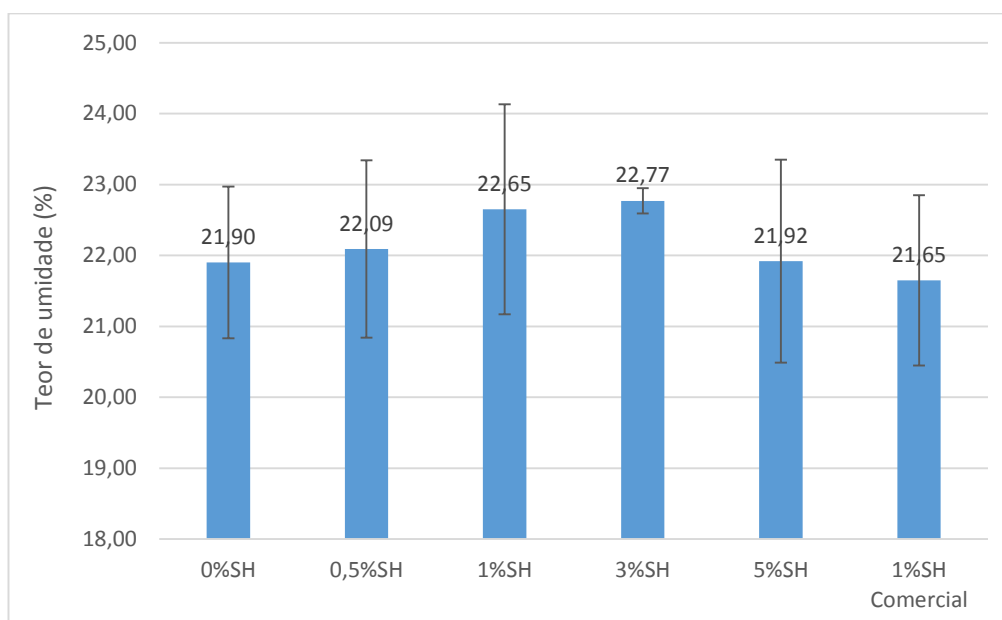


**Figura A.17 Gráfico do teor de umidade dos corpos de prova com cinco meses de armazenamento a ser usados no ensaio furo de agulha.**



**Tabela A.18 Teor de umidade (%) dos corpos de prova armazenados doze meses a ser utilizados no ensaio furo de agulha.**

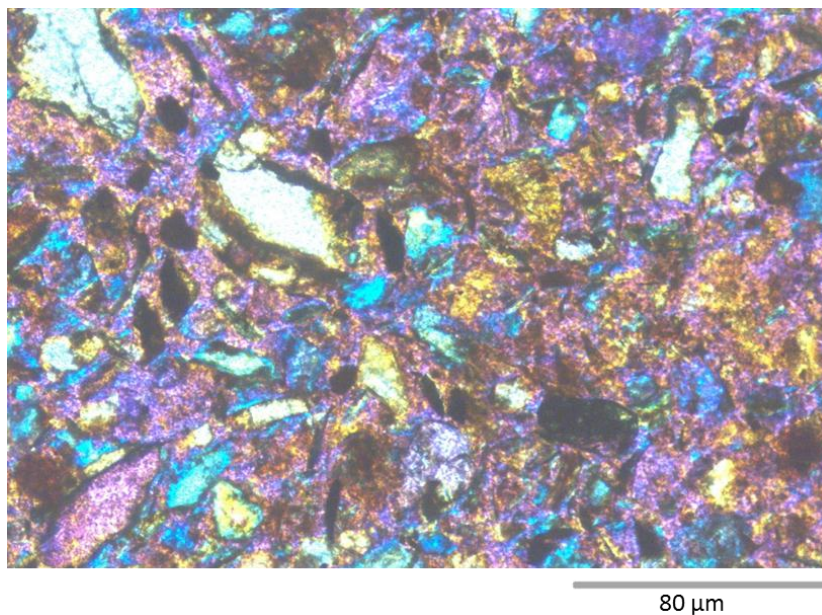
Substância húmida	0%SH	0,5%SH	1%SH	3%SH	5%SH	1%SH Comercial
Teor de umidade (%)	21,90	22,09	22,65	22,77	21,92	21,65
Variância	1,14	1,56	2,19	0,03	2,04	1,44
Desvio padrão	1,07	1,25	1,48	0,18	1,43	1,20



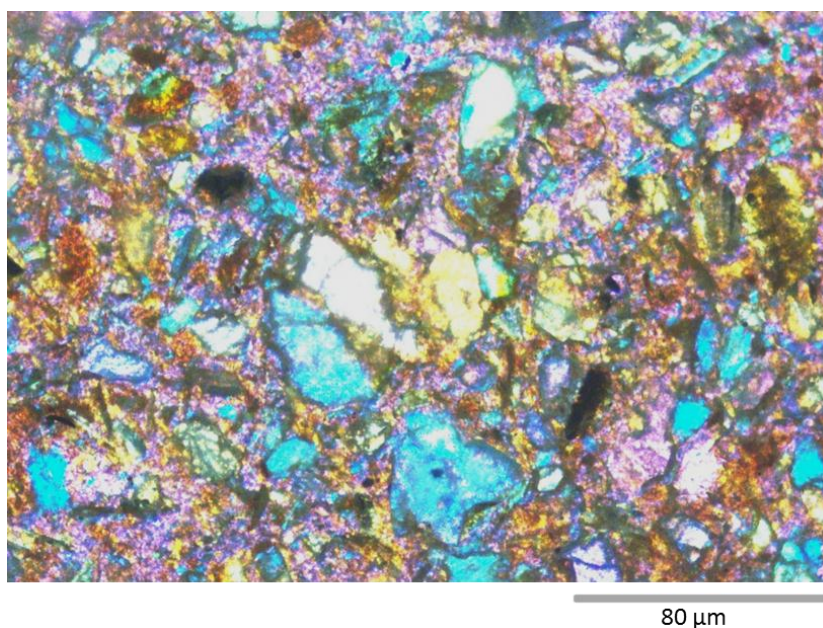
**Figura A.18 Gráfico do teor de umidade dos corpos de prova com doze meses de armazenamento a ser usados no ensaio de furo de agulha.**

## Anexo 2 . Lâminas observadas na microscopia ótica

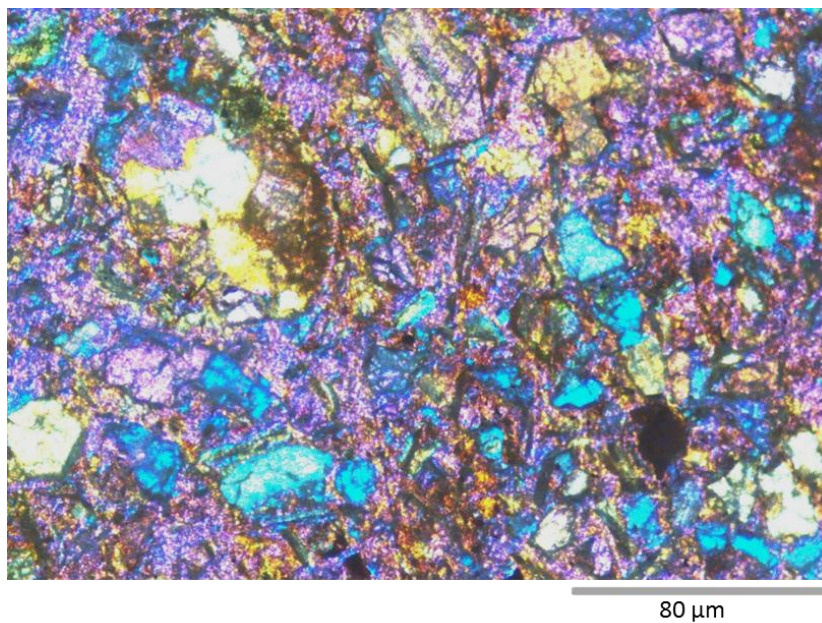
A seguir serão apresentadas as imagens das lâminas dos corpos de prova com armazenamento de dois meses com aumento de 50 x.



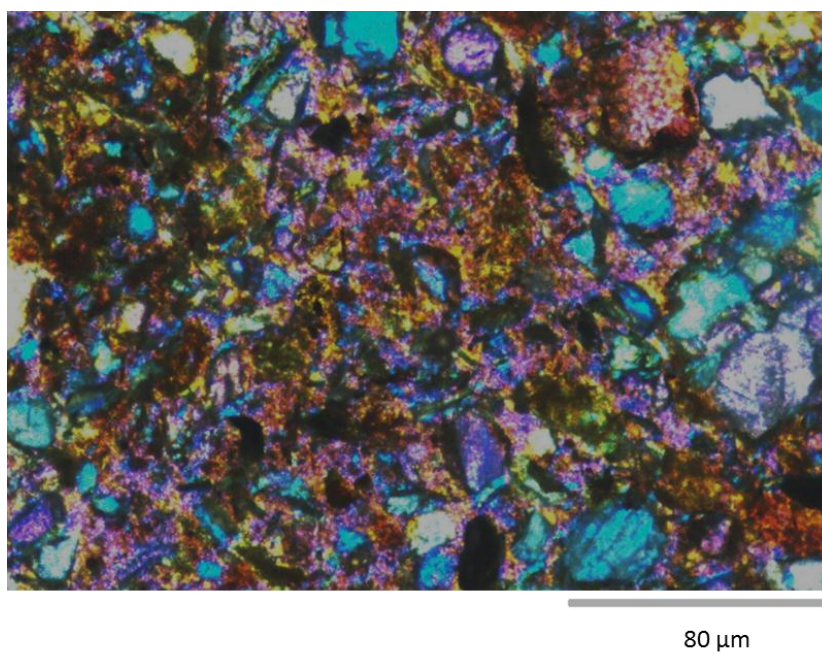
Corpo de prova 0%SH PUC-Rio com armazenamento de dois meses  
(Estrutura vertical)



Corpo de prova 0%SH PUC-Rio com armazenamento de dois meses  
(Estrutura horizontal)

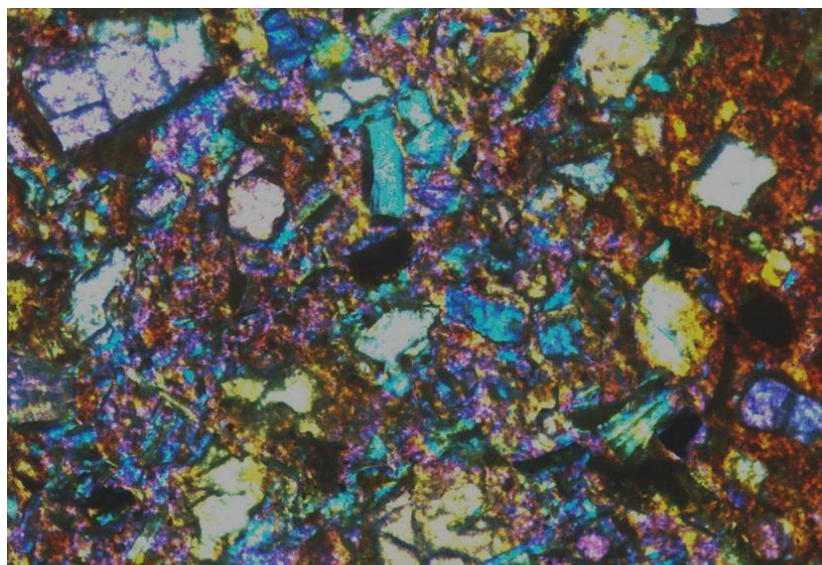


Corpo de prova 0,5 %SH PUC-Rio com armazenamento de dois meses  
(Estrutura vertical)



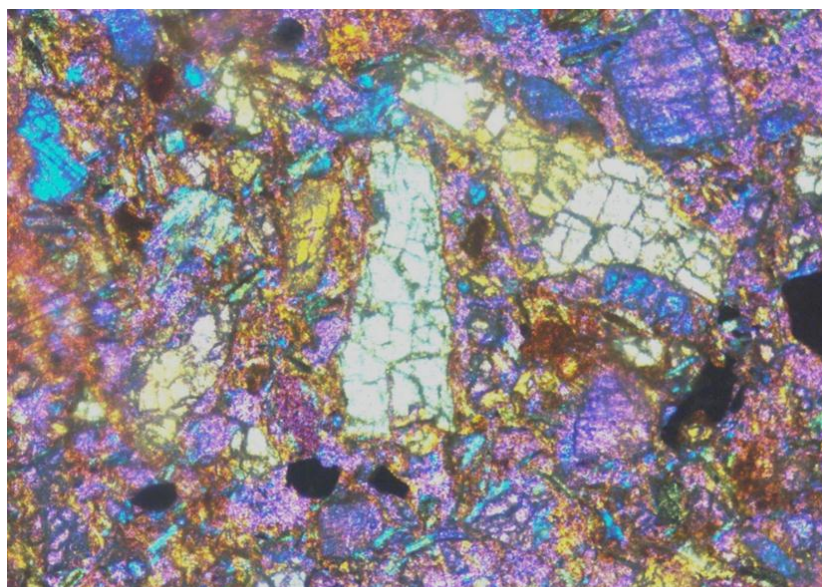
Corpo de prova 0,5 %SH PUC-Rio com armazenamento de dois meses  
(Estrutura horizontal)





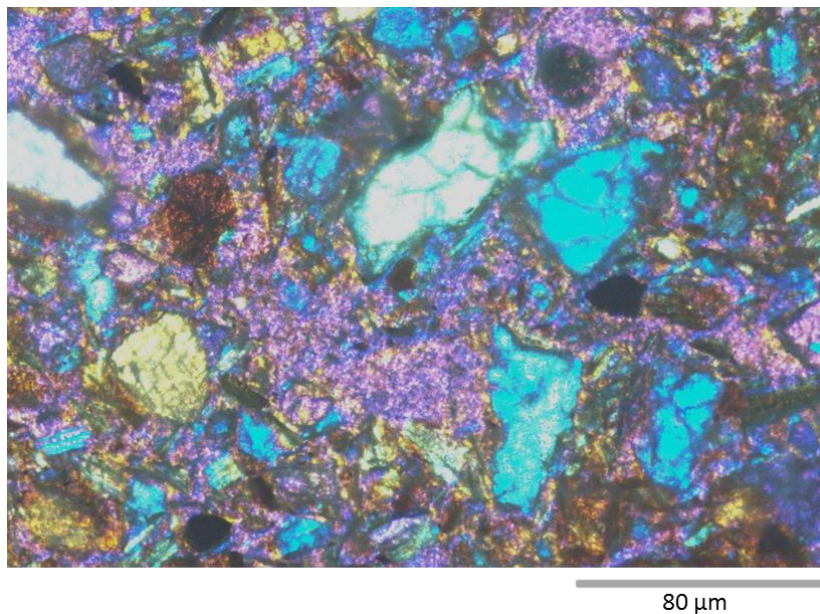
80 μm

Corpo de prova 1%SH PUC-Rio com armazenamento de dois meses  
(Estrutura vertical)

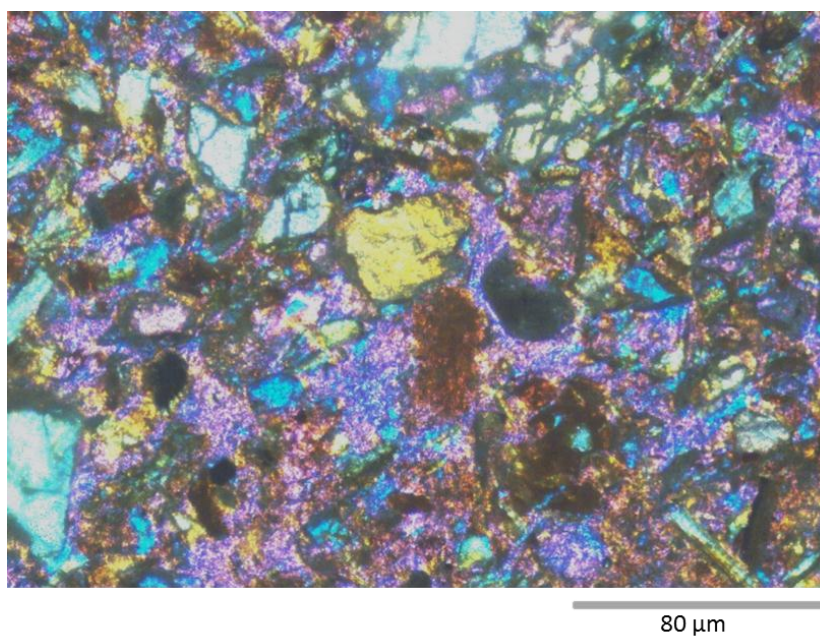


80 μm

Corpo de prova 1%SH PUC-Rio com armazenamento de dois meses  
(Estrutura horizontal)

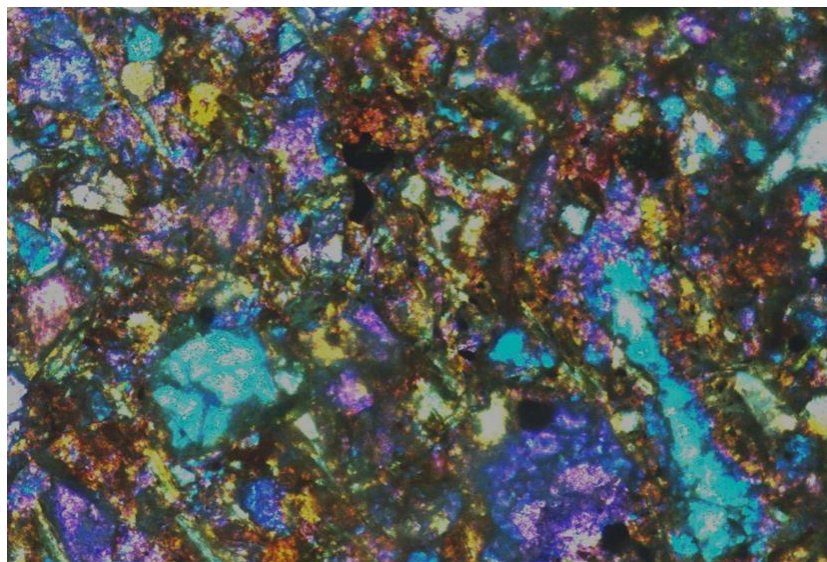


Corpo de prova 3%SH PUC-Rio com armazenamento de dois meses  
(Estrutura vertical)



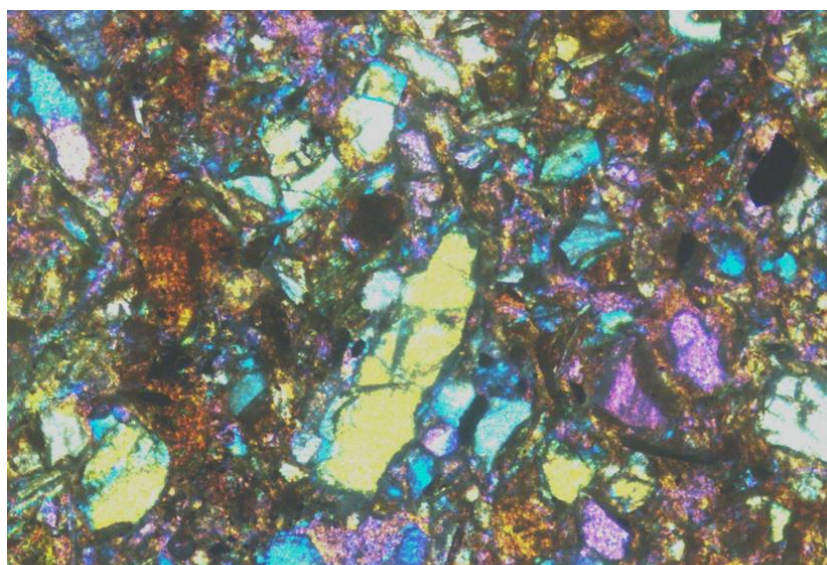
Corpo de prova 3%SH PUC-Rio com armazenamento de dois meses  
(Estrutura horizontal)





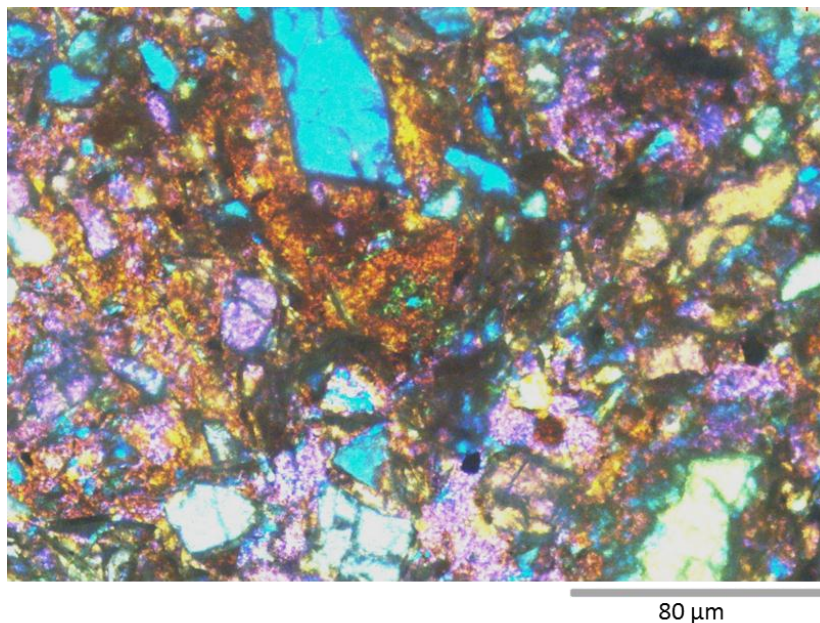
80 μm

Corpo de prova 5%SH PUC-Rio com armazenamento de dois meses  
(Estrutura vertical)

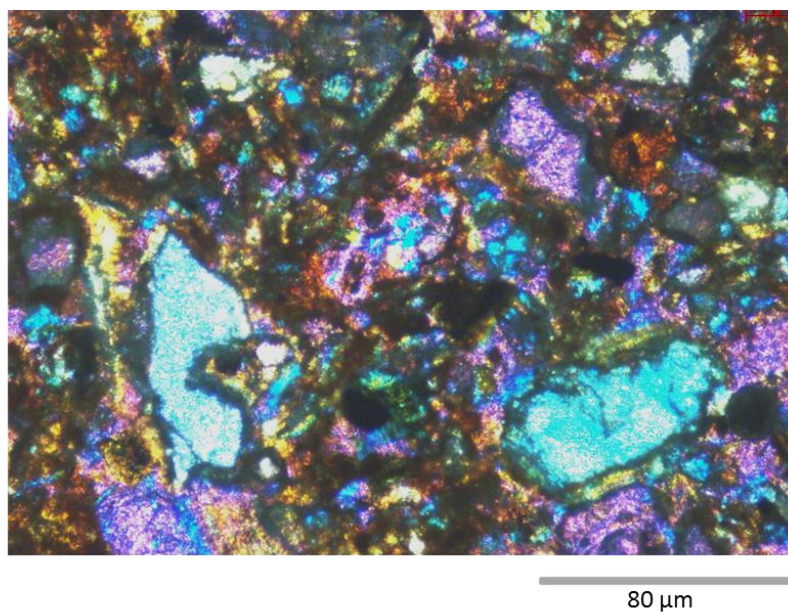


80 μm

Corpo de prova 5%SH PUC-Rio com armazenamento de dois meses  
(Estrutura horizontal)



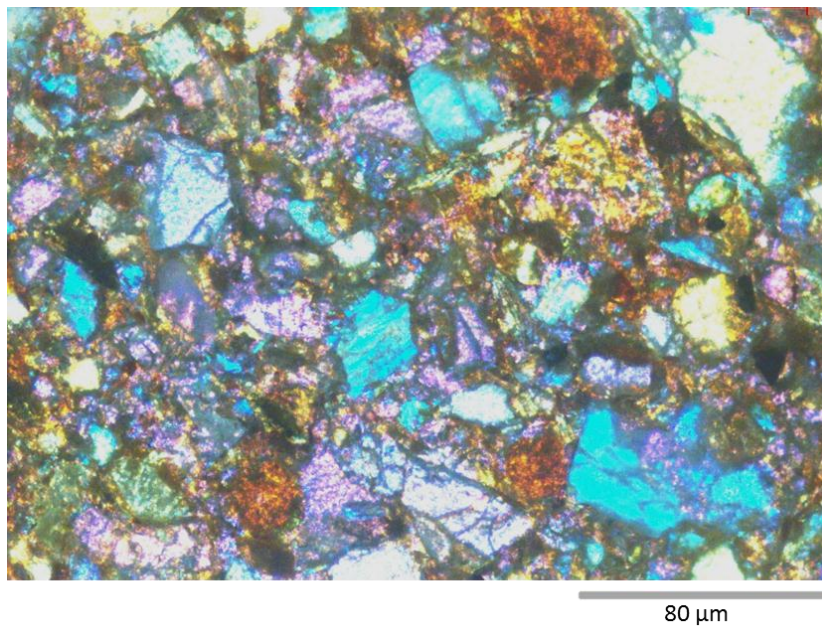
Corpo de prova 1%SH comercial com armazenamento de dois meses  
(Estrutura vertical)



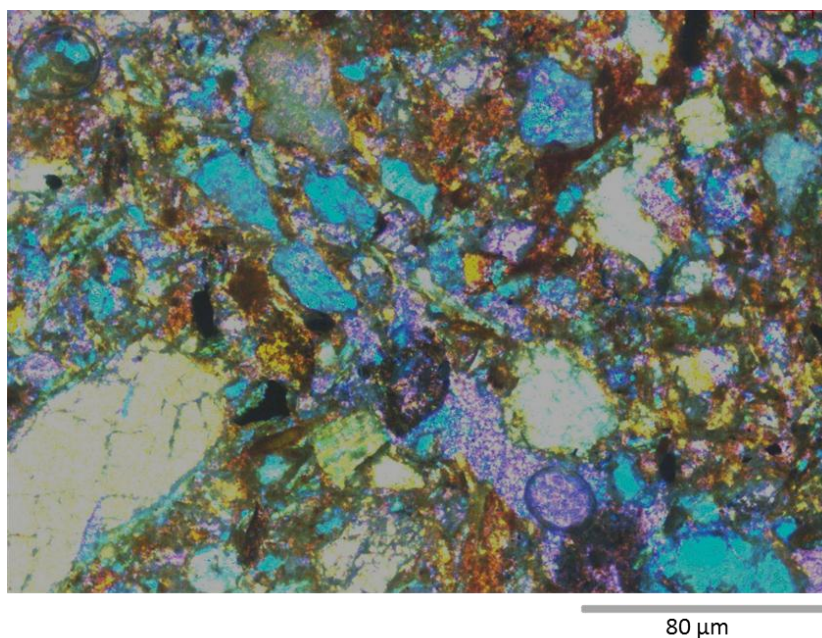
Corpo de prova 1%SH comercial com armazenamento de dois meses  
(Estrutura horizontal)



A seguir serão apresentadas as imagens das lâminas dos corpos de prova com armazenamento de cinco meses observadas no microscópio ótico com aumento de 50 x.

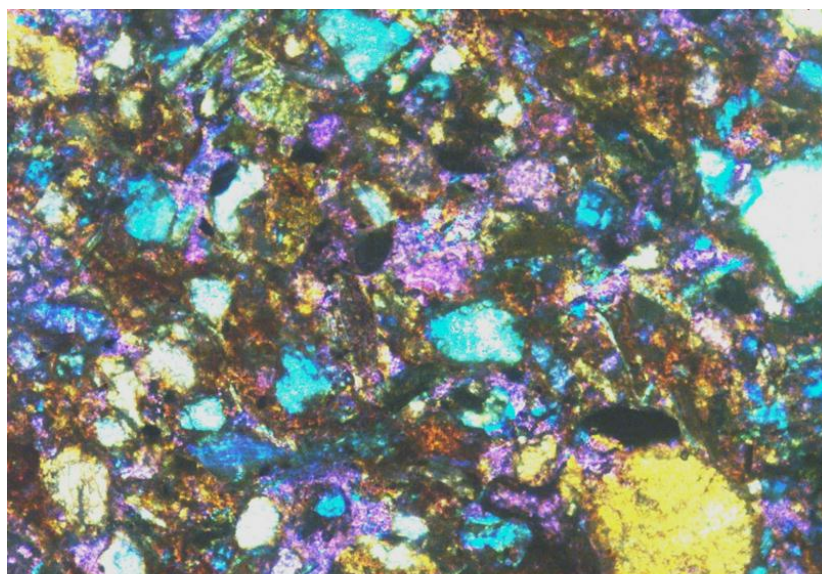


Corpo de prova 0%SH PUC-Rio com cinco meses de armazenamento  
(Estrutura vertical)



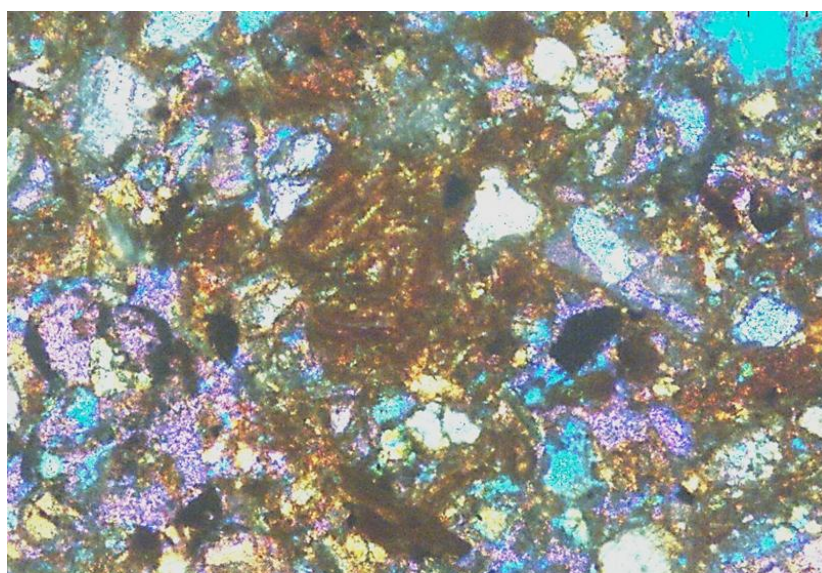
Corpo de prova 0%SH PUC-Rio com cinco meses de armazenamento  
(Estrutura horizontal)





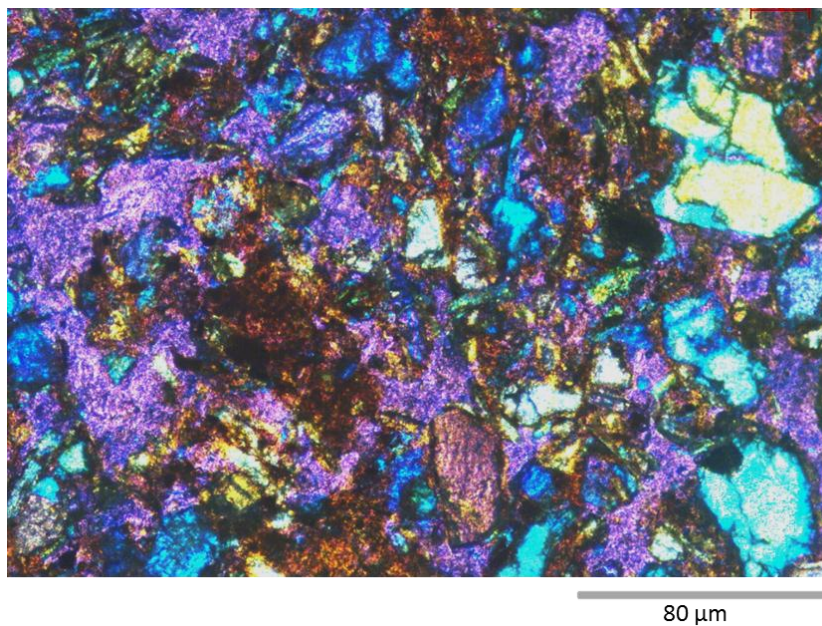
80 μm

Corpo de prova 0,5 %SH PUC-Rio com cinco meses de armazenamento  
(Estrutura vertical)

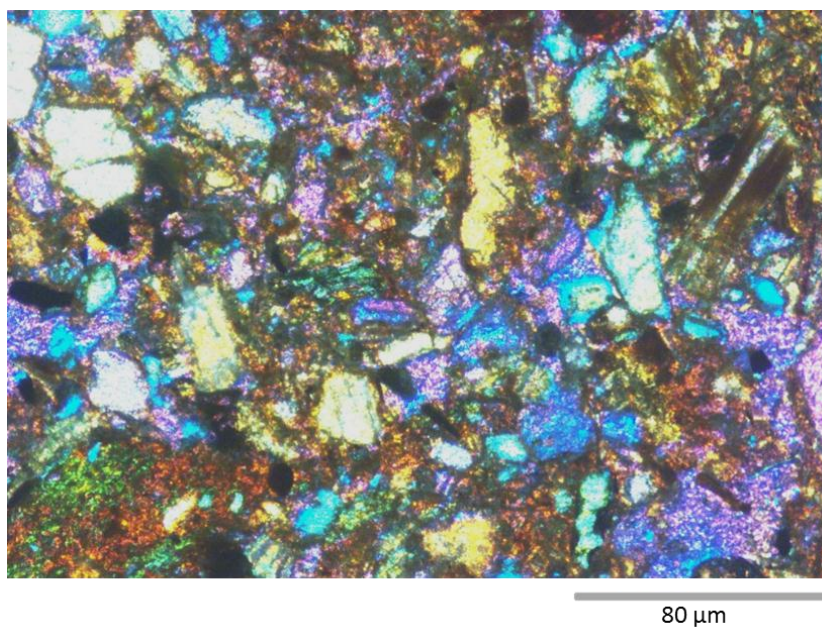


80 μm

Corpo de prova 0,5 %SH PUC-Rio com cinco meses de armazenamento  
(Estrutura horizontal)

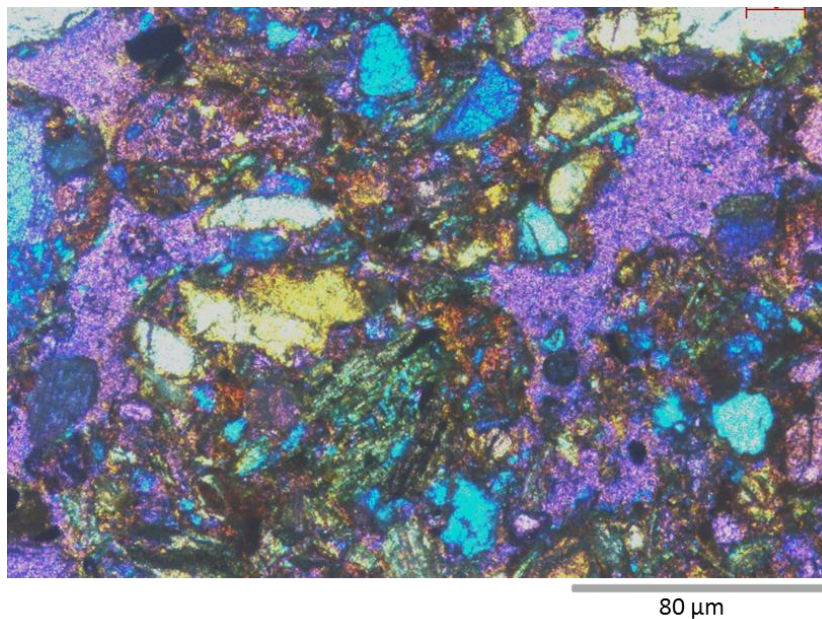


Corpo de prova 1%SH PUC-Rio com cinco meses de armazenamento  
(Estrutura vertical)

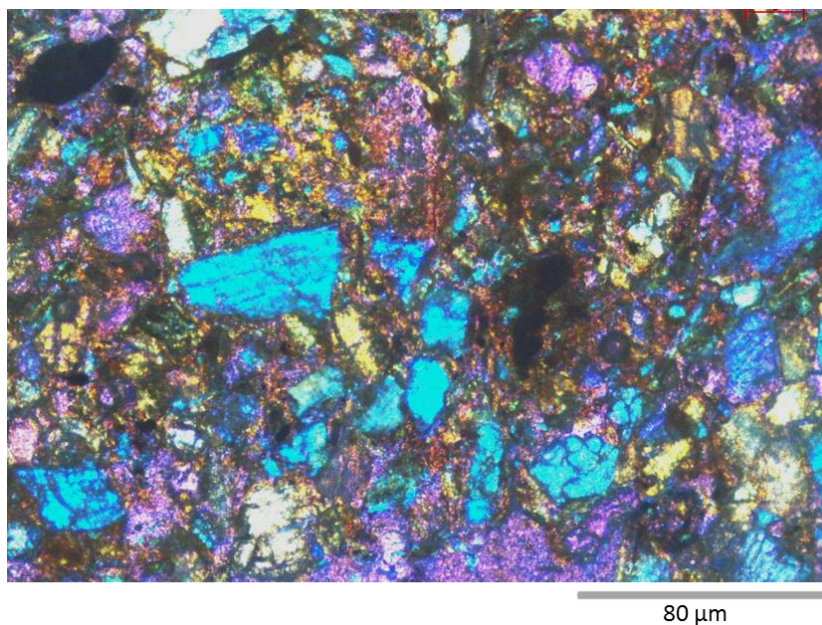


Corpo de prova 1%SH PUC-Rio com cinco meses de armazenamento  
(Estrutura horizontal)

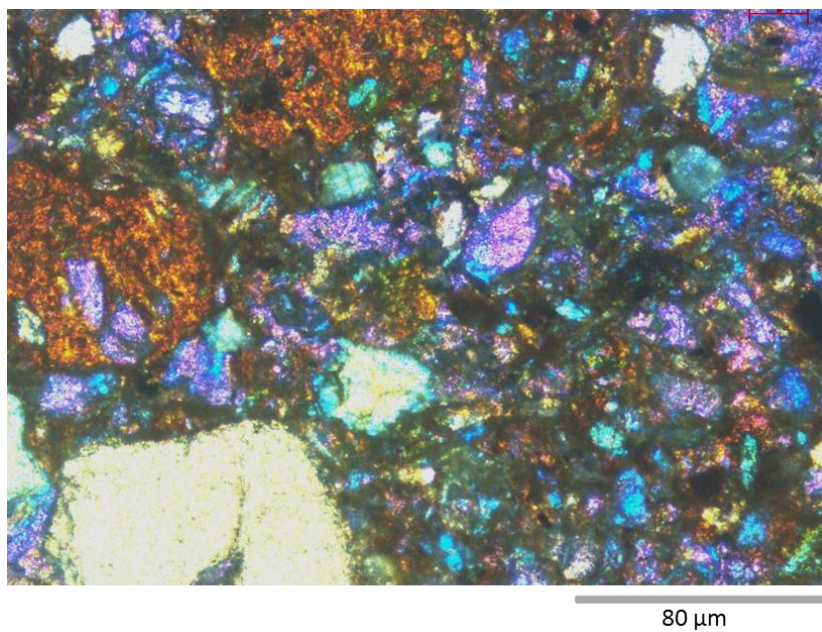




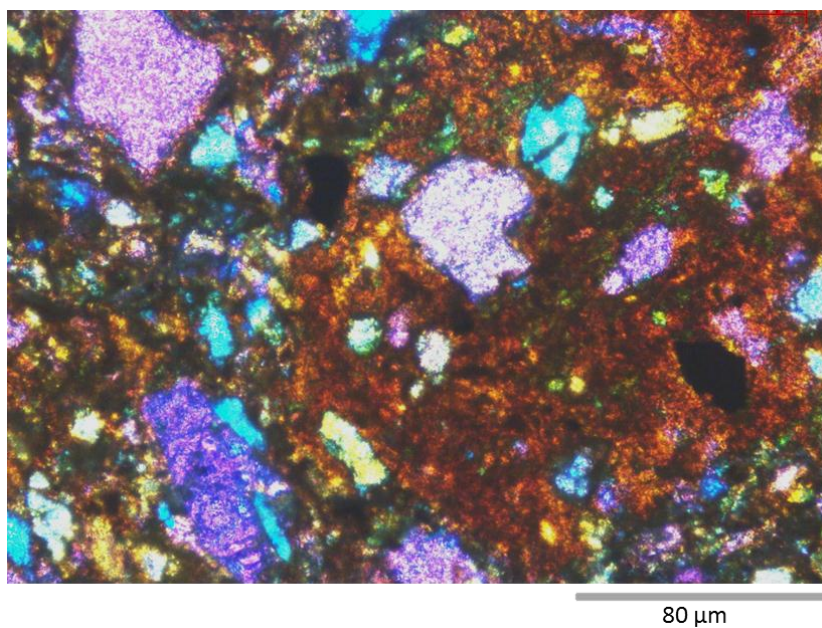
Corpo de prova 3%SH PUC-Rio com cinco meses de armazenamento  
(Estrutura vertical)



Corpo de prova 3%SH PUC-Rio com cinco meses de armazenamento  
(Estrutura horizontal)

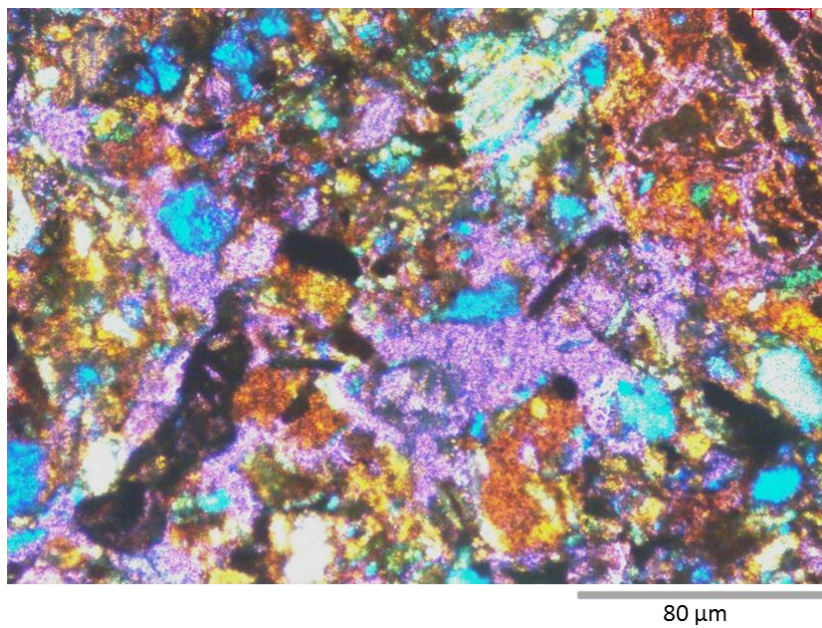


Corpo de prova 5%SH PUC-Rio com cinco meses de armazenamento  
(Estrutura vertical)

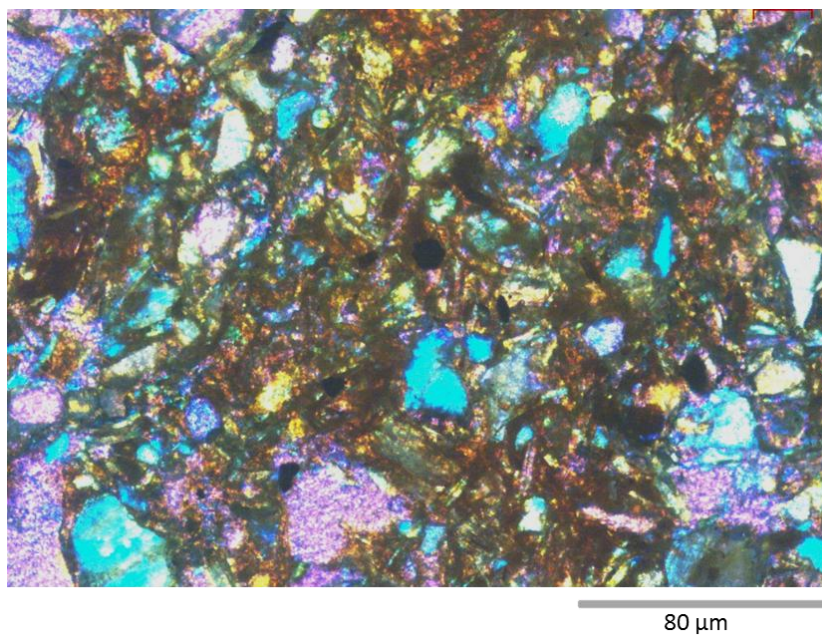


Corpo de prova 5%SH PUC-Rio com cinco meses de armazenamento  
(Estrutura horizontal)



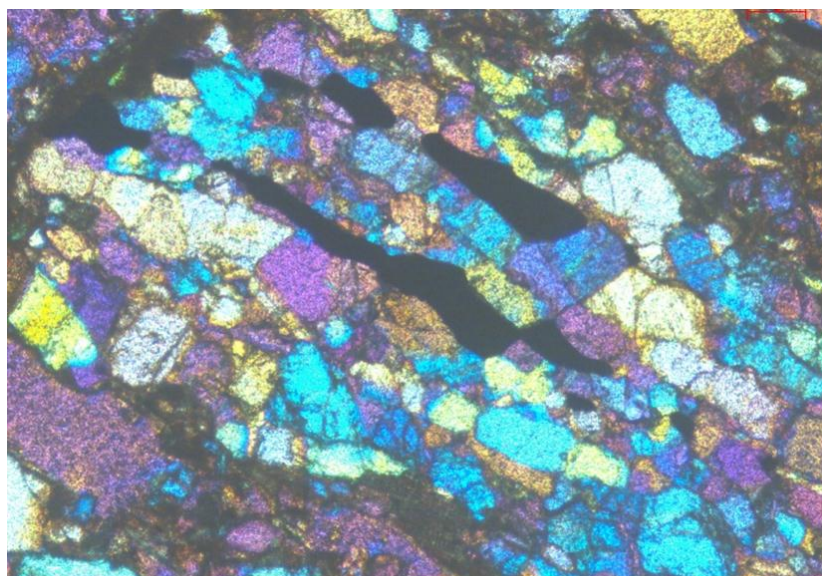


Corpo de prova 1%SH comercial com cinco meses de armazenamento  
(Estrutura vertical)



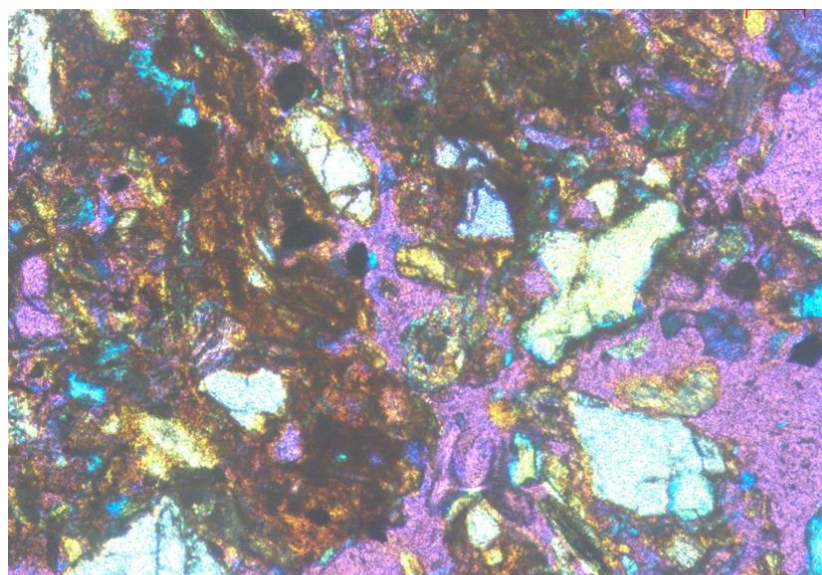
Corpo de prova 1%SH comercial com cinco meses de armazenamento  
Estrutura horizontal

A seguir serão apresentadas as imagens das lâminas dos corpos de prova com armazenamento de um ano observadas no microscópio ótico com aumento de 50 vezes.



80 μm

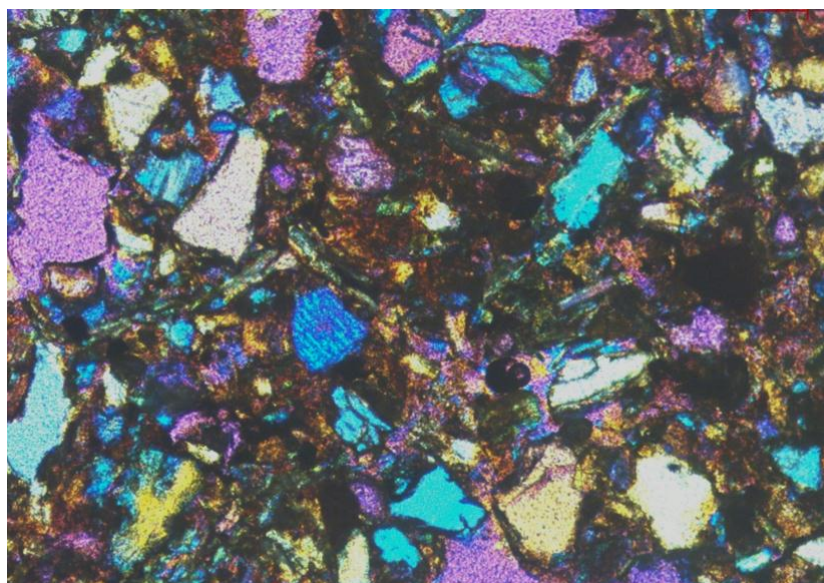
Corpo de prova 0%SH PUC-Rio com um ano de armazenamento  
Estrutura vertical



80 μm

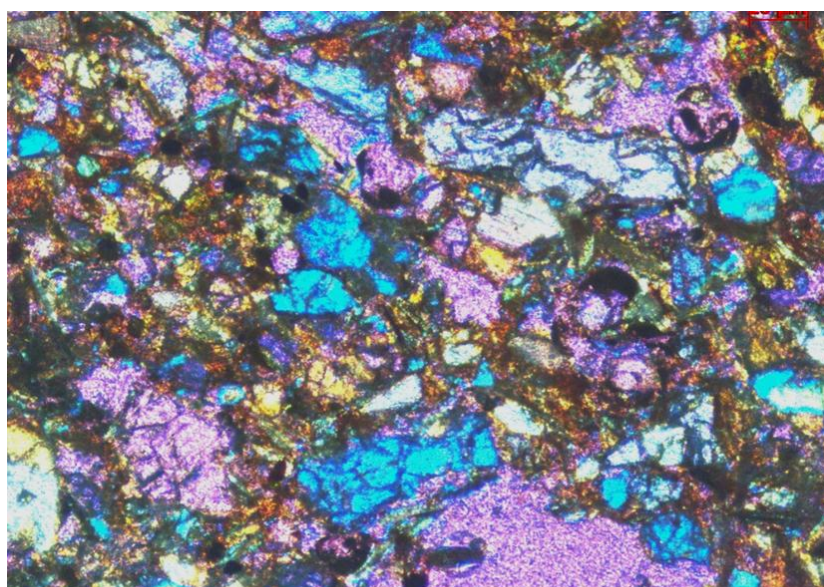
Corpo de prova 0%SH PUC-Rio com um ano de armazenamento  
(Estrutura horizontal)





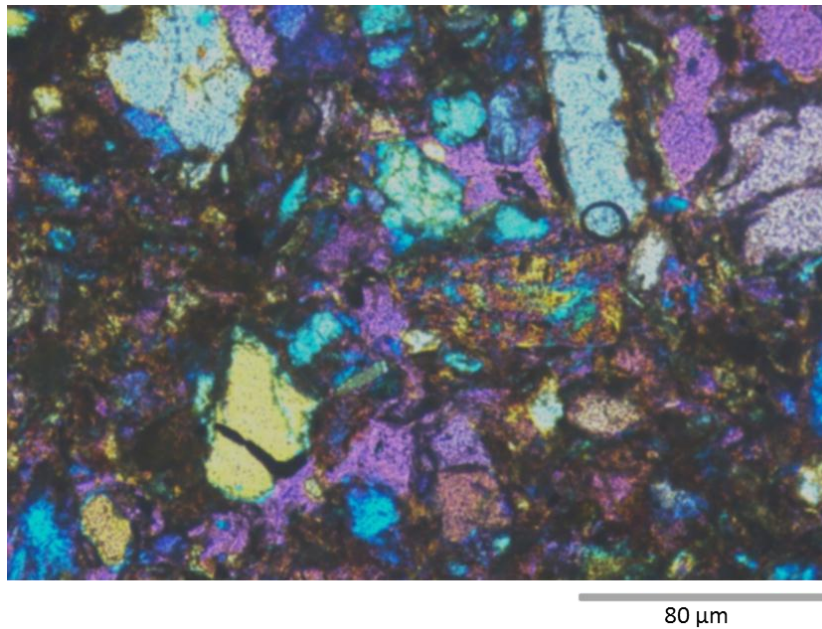
80 μm

Corpo de prova 0,5%SH PUC-Rio com um ano de armazenamento  
(Estrutura vertical)

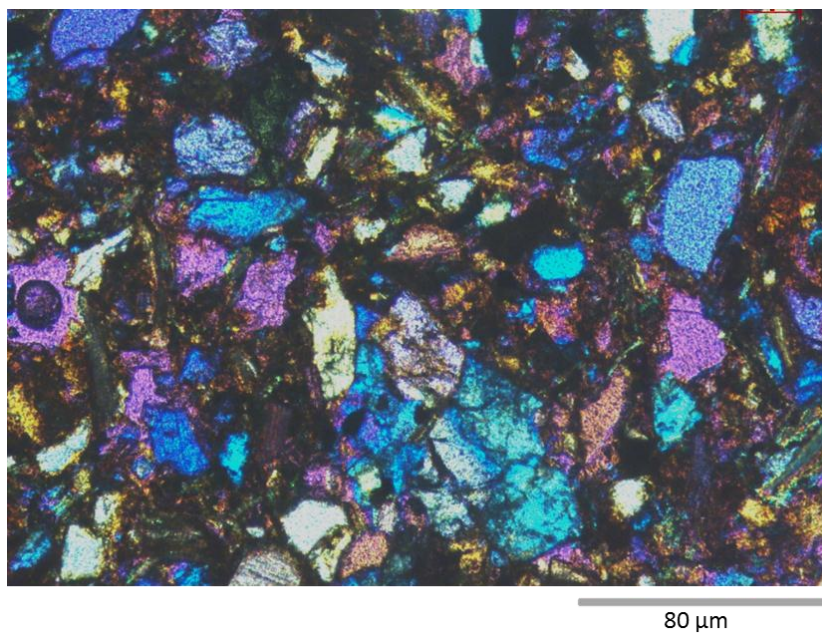


80 μm

Corpo de prova 0,5 %SH PUC-Rio com um ano de armazenamento  
(Estrutura horizontal )

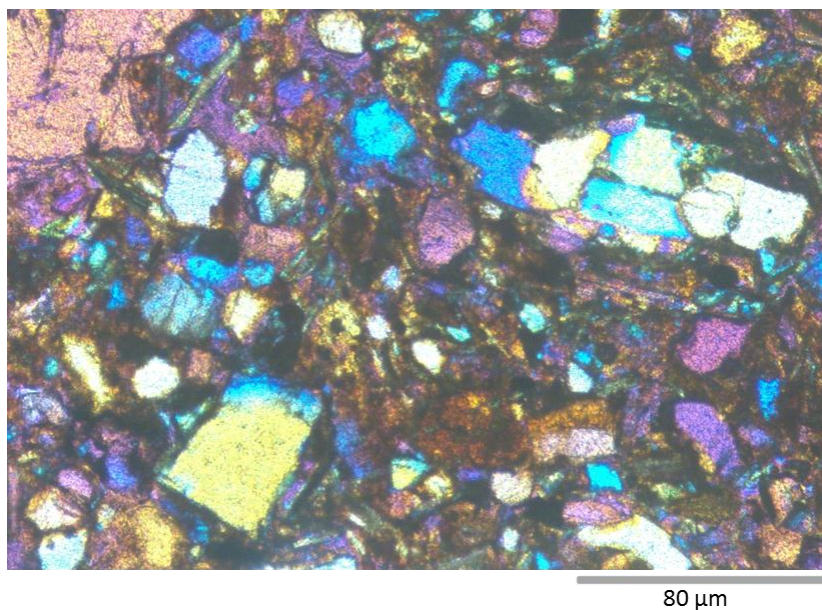


Corpo de prova 1%SH PUC-Rio com um ano de armazenamento  
(Estrutura vertical )

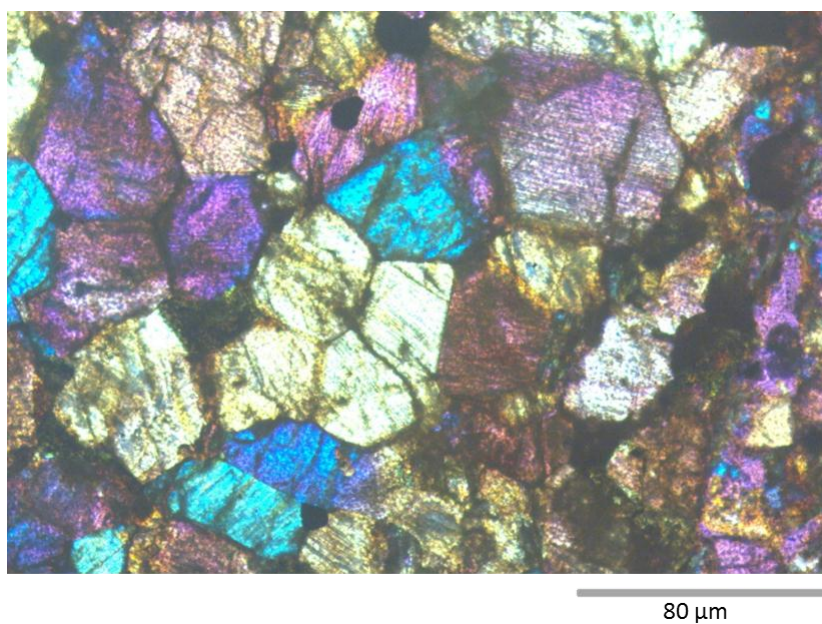


Corpo de prova 1%SH PUC-Rio com um ano de armazenamento  
(Estrutura horizontal)

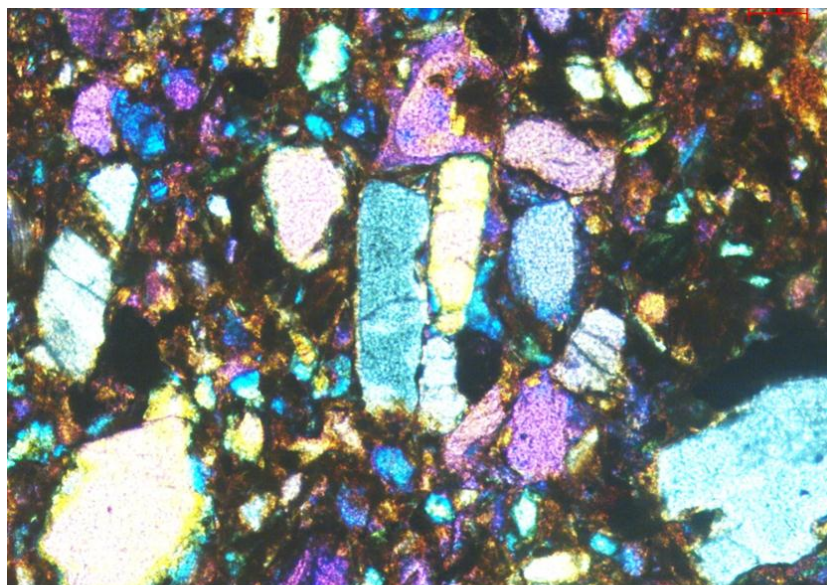




Corpo de prova 3%SH PUC-Rio com um ano de armazenamento  
(Estrutura vertical)

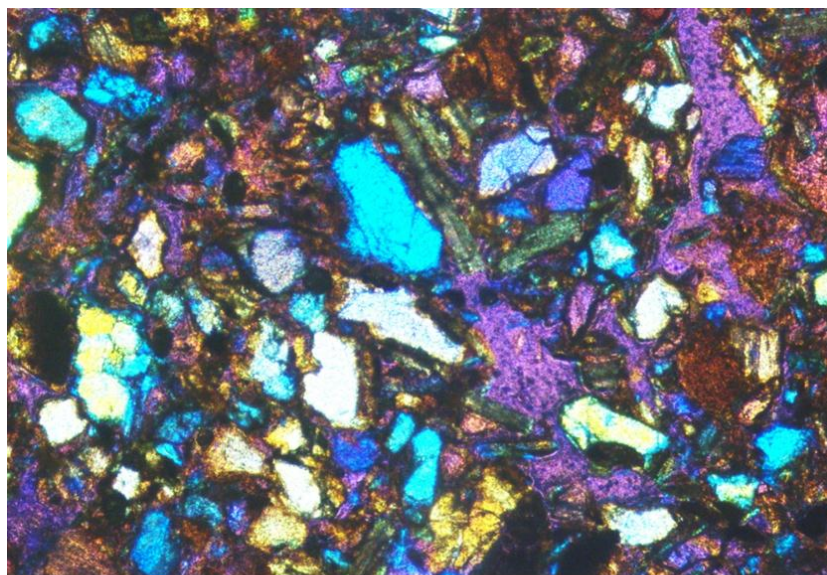


Corpo de prova 3%SH PUC-Rio com um ano de armazenamento  
(Estrutura horizontal)



80 μm

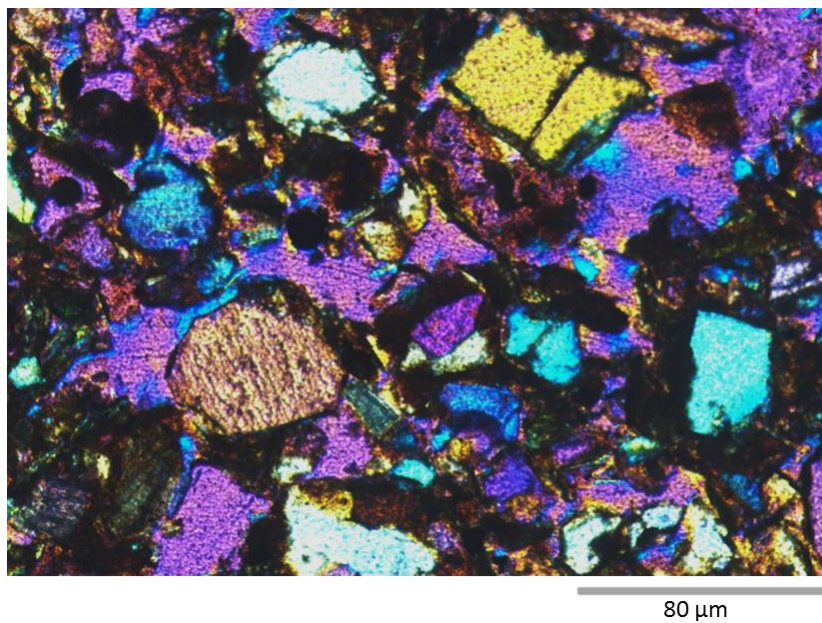
Corpo de prova 5%SH PUC-Rio com um ano de armazenamento  
(Estrutura vertical)



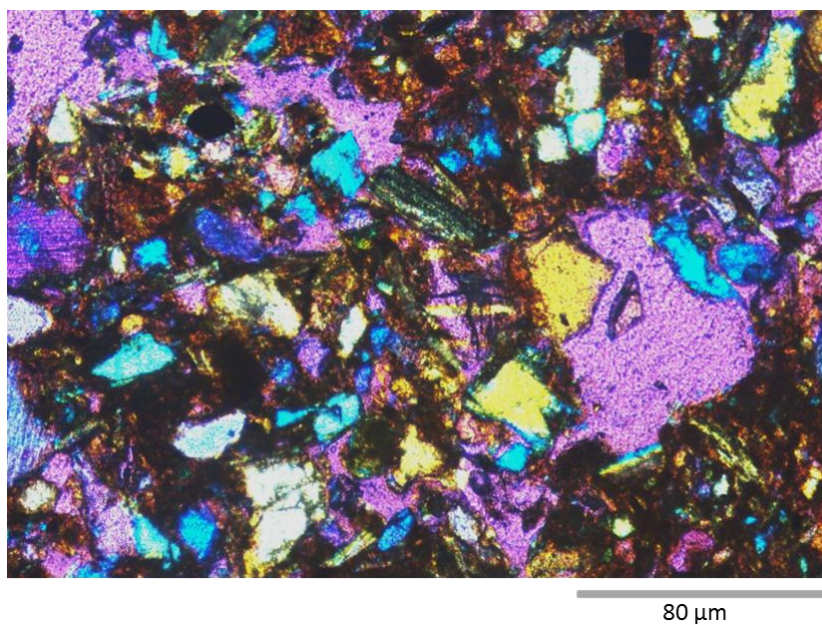
80 μm

Corpo de prova 5%SH PUC-Rio com um ano de armazenamento  
(Estrutura horizontal).





Corpo de prova 1%SH comercial com um ano de armazenamento  
(Estrutura vertical)



Corpo de prova 1%SH comercial com um ano de armazenamento  
(Estrutura horizontal)