

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JULIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU

**USO DE LODO DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA E DE ESGOTO
URBANO COMO CONDICIONADOR DE SOLO, COM ÊNFASE NAS
PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO**

MARCELO DE MARCHI COLINO

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da Unesp - Campus de Botucatu, para obtenção do título de Mestre em Agronomia - Área de concentração em Irrigação e Drenagem.

BOTUCATU-SP
Fevereiro – 2006

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JULIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU

**USO DE LODO DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA E DE ESGOTO
URBANO COMO CONDICIONADOR DE SOLO, COM ÊNFASE NAS
PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO**

MARCELO DE MARCHI COLINO

ORIENTADOR: Prof. Dr. Raimundo Leite Cruz

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da Unesp - Campus de Botucatu, para obtenção do título de Mestre em Agronomia - Área de concentração em Irrigação e Drenagem.

BOTUCATU-SP
Fevereiro – 2006

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E
TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO - SERVIÇO TÉCNICO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO
UNESP - FCA - LAGEADO - BOTUCATU (SP)

Colino, Marcelo de Marchi, 1980-
C696u Uso de lodo de estações de tratamento de água e de
 esgoto urbano como condicionador de solo, com ênfase nas
 propriedades físicas do solo/ Marcelo de Marchi Colino. -
 Botucatu : [s.n.], 2006.
 xv, 116 f. : il. color, gráfs, tabs.

 Dissertação (mestrado)-Universidade Estadual Paulista,
 Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2006
 Orientador: Raimundo Leite Cruz
 Inclui bibliografia.

1. Lodo de esgoto. 2. Água - Estações de tratamento. 3.
 Solos - Estrutura. 4. Mecânica do solo. I.Cruz, Raimundo
 Leite. II. Universidade Estadual Paulista "Júlio de
 Mesquita Filho" (Campus de Botucatu). Faculdade de
 Ciências Agrônômicas. III. Título.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

**TÍTULO: USO DE LODO DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA E DE
ESGOTO URBANO COMO CONDICIONADOR DE SOLO, COM ÊNFASE
NAS PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO.**

ALUNO: MARCELO DE MARCHI COLINO

ORIENTADOR: PROF. DR. RAIMUNDO LEITE CRUZ

Aprovado pela Comissão Examinadora



PROF. DR. RAIMUNDO LEITE CRUZ



PROF. DR. IRAE AMARAL GUERRINI



PROF. DR. MARCELO ZAIAT

Data da Realização: 17 de fevereiro de 2006.

Aos meus pais, Layre Colino Júnior e Maria José De Marchi Colino, aos meus irmãos Layre e André, pela oportunidade e apoio que me deram em cursar o curso de Pós Graduação.

Dedico

Ao meu amigo e colega de
faculdade e mestrado Jayme Laperuta Neto
pelo apoio e colaboração para a realização
deste experimento

Agradeço

A todos aqueles que colaboraram, de qualquer forma, para a realização deste trabalho, em especial, aos amigos Pedro, Israel e Gilberto.

Agradeço

Em especial ao amigo e Prof. Dr. Raimundo Leite Cruz por ter confiado na minha capacidade profissional, pela orientação, pelos ensinamentos e colaboração em todas as etapas desse trabalho.

Agradeço

SUMÁRIO

1. RESUMO	01
2. SUMMARY	02
3. INTRODUÇÃO	04
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	06
4.1 Lodo de Tratamento de Esgoto	06
4.1.1 Aspectos gerais	06
4.1.2 Aplicação de lodo de esgoto na agricultura	07
4.2 Lodo de Tratamento de Água	08
4.3 Águas residuárias	09
4.4 Curva de retenção de água no solo	10
4.5 Condutividade hidráulica de solo saturado	11
4.6 Índices físicos	12
5. MATERIAL E MÉTODOS	13
5.1 Localização do experimento	13
5.2 Delineamento experimental	14
5.3 Caracterização dos tipos de solo	17
5.3.1 Solo de textura grossa	17
5.3.1.1 Índices físicos	17
5.3.1.2 Condutividade hidráulica de solo saturado	18
5.3.1.3 Curva de retenção de água no solo	18
5.3.2 Solo de textura fina	19
5.3.2.1 Índices físicos	19

5.3.2.2 Condutividade hidráulica de solo saturado	20
5.3.2.3 Curva de retenção de água no solo	20
5.4 Caracterização dos tipos de lodo	20
5.4.1 Lodo proveniente de Estação da Tratamento de Água de Botucatu	21
5.4.2 Lodo de esgoto proveniente da Estação de Tratamento de Franca	21
5.4.3 Lodo de esgoto proveniente da Estação de Tratamento do Lageado	22
5.5 Tipo de irrigação	22
5.6 Tipos de Água	22
5.7 Legendas	23
5.8 Ensaio de laboratório	23
5.8.1 Preparo das amostras	24
5.8.2 Determinação dos índices físicos	24
5.8.2.1 Umidade	25
5.8.2.2 Massa específica	25
5.8.2.3 Massa específica dos sólidos	26
5.8.2.4 Massa específica aparente seca	26
5.8.2.5 Massa específica saturada	27
5.8.2.6 Massa específica submersa	27
5.8.2.7 Índice de vazios	27
5.8.2.8 Porosidade	27
5.8.2.9 Grau de saturação	28
5.8.3 Determinação da condutividade hidráulica de solo saturado	28
5.8.4 Determinação da curva característica de retenção de água no solo	30
5.9 Testes estatísticos	31
6. RESULTADOS	32
6.1 Primeira época de amostragem	32
6.1.1 Índices físicos	32
6.1.2 Condutividade hidráulica de solo saturado	34
6.1.3 Curva de retenção de água no solo	35
6.2 Segunda época de amostragem	53

6.2.1 Índices físicos	53
6.2.2 Condutividade hidráulica de solo saturado	55
6.2.3 Curva de retenção de água no solo	56
6.3 Terceira época de amostragem	75
6.3.1 Índices físicos	75
6.3.2 Condutividade hidráulica de solo saturado	76
6.3.3 Curva de retenção de água no solo	78
7. DISCUSSÃO	96
7.1 Índices físicos	96
7.1.1 Umidade	96
7.1.2 Porosidade	97
7.1.3 Massa específica	98
7.1.4 Massa específica dos sólidos	98
7.1.5 Massa específica saturada	99
7.1.6 Massa específica submersa	99
7.1.7 Grau de saturação	100
7.1.8 Índice de vazios	100
7.1.9 Massa específica aparente seca	101
7.2 Condutividade hidráulica	102
7.2.1 Primeira época de amostragem	102
7.2.2 Segunda época de amostragem	104
7.2.3 Terceira época de amostragem	105
7.3 Curva de retenção de água no solo	106
7.3.1 Primeira época de amostragem	106
7.3.2 Segunda época de amostragem	108
7.3.3 Terceira época de amostragem	109
8. CONCLUSÃO	111
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	113

LISTA DE QUADROS XI

LISTA DE FIGURAS XII

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Índices físicos obtidos para o solo de textura grossa	18
Quadro 2. Índices físicos obtidos para o solo de textura fina	19
Quadro 3. Índices físicos obtidos para a primeira época de amostragem	32
Quadro 4. Valores de k_0 obtidos a partir da mistura de solo com lodo	34
Quadro 5. Índices físicos obtidos para a segunda época de amostragem	54
Quadro 6. Valores de k_0 obtidos a partir da mistura de solo com lodo	55
Quadro 7. Índices físicos obtidos para a terceira época de amostragem	75
Quadro 8. Valores de k_0 obtidos a partir da mistura de solo com lodo	77
Quadro 9. Valores encontrados para umidade	96
Quadro 10. Valores encontrados para porosidade	97
Quadro 11. Valores encontrados para massa específica dos sólidos	98
Quadro 12. Valores encontrados para massa específica saturada	99
Quadro 13. Valores encontrados para massa específica submersa	100
Quadro 14. Valores encontrados para o grau de saturação	100
Quadro 15. Valores encontrados para o índice de vazios	101
Quadro 16. Valores encontrados para a massa específica aparente seca	101
Quadro 17. Comparação entre as condutividades hidráulica da primeira época de amostragem	102
Quadro 18. Comparação entre as condutividades hidráulica da segunda época de amostragem	104
Quadro 19. Comparação entre as condutividades hidráulica da terceira época de amostragem	105
Quadro 20. Análise da curva de retenção de água das amostras	107
Quadro 21. Análise da curva de retenção de água das amostras	108
Quadro 22. Análise da curva de retenção de água das amostras	109

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Vista da estufa da estação de tratamento de esgoto do Lageado	14
Figura 2. Um dos tipos de solo secando ao ar	15
Figura 3. Um dos tipos de solo sendo peneirado com a peneira de malha 2,0mm	15
Figura 4. Processo de montagem dos vasos	16
Figura 5. Processo de coleta das amostras	17
Figura 6. Processo de preparo das amostras.....	24
Figura 7. Uma das etapas da determinação da massa específica dos sólidos	26
Figura 8. Vista do permeômetro de carga constante	29
Figura 9. Vista das câmaras de pressão de Richards	31
Figura 10. Curva de retenção de água obtida a partir do solo de textura grossa	19
Figura 11. Curva de retenção de água obtida a partir do solo de textura fina	20
Figura 12. Curva de retenção de água no solo da amostra 1-1-1-1	35
Figura 13. Curva de retenção de água no solo da amostra 1-1-1-2	36
Figura 14. Curva de retenção de água no solo da amostra 1-1-1-3	36
Figura 15. Curva de retenção de água no solo da amostra 1-1-2-4	37
Figura 16. Curva de retenção de água no solo da amostra 1-1-2-5	37
Figura 17. Curva de retenção de água no solo da amostra 1-1-2-6	38
Figura 18. Curva de retenção de água no solo da amostra 1-2-1-1	38
Figura 19. Curva de retenção de água no solo da amostra 1-2-1-2	39
Figura 20. Curva de retenção de água no solo da amostra 1-2-1-3	39
Figura 21. Curva de retenção de água no solo da amostra 1-2-1-4	40
Figura 22. Curva de retenção de água no solo da amostra 1-2-1-5	40
Figura 23. Curva de retenção de água no solo da amostra 1-2-1-6	41
Figura 24. Curva de retenção de água no solo da amostra 1-3-1-7	41
Figura 25. Curva de retenção de água no solo da amostra 1-3-1-8	42
Figura 26. Curva de retenção de água no solo da amostra 1-3-1-9	42
Figura 27. Curva de retenção de água no solo da amostra 1-3-2-4	43
Figura 28. Curva de retenção de água no solo da amostra 1-3-2-5	43
Figura 29. Curva de retenção de água no solo da amostra 1-3-2-6	44

Figura 30. Curva de retenção de água no solo da amostra 2-1-1-1	44
Figura 31. Curva de retenção de água no solo da amostra 2-1-1-2	45
Figura 32. Curva de retenção de água no solo da amostra 2-1-1-3	45
Figura 33. Curva de retenção de água no solo da amostra 2-1-1-7	46
Figura 34. Curva de retenção de água no solo da amostra 2-1-1-8	46
Figura 35. Curva de retenção de água no solo da amostra 2-1-1-9	47
Figura 36. Curva de retenção de água no solo da amostra 2-2-2-1	47
Figura 37. Curva de retenção de água no solo da amostra 2-2-2-2	48
Figura 38. Curva de retenção de água no solo da amostra 2-2-2-3	48
Figura 39. Curva de retenção de água no solo da amostra 2-2-2-4	49
Figura 40. Curva de retenção de água no solo da amostra 2-2-2-5	49
Figura 41. Curva de retenção de água no solo da amostra 2-2-2-6	50
Figura 42. Curva de retenção de água no solo da amostra 2-3-1-7	50
Figura 43. Curva de retenção de água no solo da amostra 2-3-1-8	51
Figura 44. Curva de retenção de água no solo da amostra 2-3-1-9	51
Figura 45. Curva de retenção de água no solo da amostra 2-3-2-7	52
Figura 46. Curva de retenção de água no solo da amostra 2-3-2-8	52
Figura 47. Curva de retenção de água no solo da amostra 2-3-2-9	53
Figura 48. Curva de retenção de água no solo da amostra 1-1-2-1	57
Figura 49. Curva de retenção de água no solo da amostra 1-1-2-2	57
Figura 50. Curva de retenção de água no solo da amostra 1-1-2-3	58
Figura 51. Curva de retenção de água no solo da amostra 1-1-2-7	58
Figura 52. Curva de retenção de água no solo da amostra 1-1-2-8	59
Figura 53. Curva de retenção de água no solo da amostra 1-1-2-9	59
Figura 54. Curva de retenção de água no solo da amostra 1-2-1-7	60
Figura 55. Curva de retenção de água no solo da amostra 1-2-1-8	60
Figura 56. Curva de retenção de água no solo da amostra 1-2-1-9	61
Figura 57. Curva de retenção de água no solo da amostra 1-2-2-1	61
Figura 58. Curva de retenção de água no solo da amostra 1-2-2-2	62
Figura 59. Curva de retenção de água no solo da amostra 1-2-2-3	62
Figura 60. Curva de retenção de água no solo da amostra 1-3-1-4	63

Figura 61. Curva de retenção de água no solo da amostra 1-3-1-5	63
Figura 62. Curva de retenção de água no solo da amostra 1-3-1-6	64
Figura 63. Curva de retenção de água no solo da amostra 1-3-2-1	64
Figura 64. Curva de retenção de água no solo da amostra 1-3-2-2	65
Figura 65. Curva de retenção de água no solo da amostra 1-3-2-3	65
Figura 66. Curva de retenção de água no solo da amostra 2-1-1-4	66
Figura 67. Curva de retenção de água no solo da amostra 2-1-1-5	66
Figura 68. Curva de retenção de água no solo da amostra 2-1-1-6	67
Figura 69. Curva de retenção de água no solo da amostra 2-1-2-7	67
Figura 70. Curva de retenção de água no solo da amostra 2-1-2-8	68
Figura 71. Curva de retenção de água no solo da amostra 2-1-2-9	68
Figura 72. Curva de retenção de água no solo da amostra 2-2-1-1	69
Figura 73. Curva de retenção de água no solo da amostra 2-2-1-2	69
Figura 74. Curva de retenção de água no solo da amostra 2-2-1-3	70
Figura 75. Curva de retenção de água no solo da amostra 2-2-2-7	70
Figura 76. Curva de retenção de água no solo da amostra 2-2-2-8	71
Figura 77. Curva de retenção de água no solo da amostra 2-2-2-9	71
Figura 78. Curva de retenção de água no solo da amostra 2-3-1-1	72
Figura 79. Curva de retenção de água no solo da amostra 2-3-1-2	72
Figura 80. Curva de retenção de água no solo da amostra 2-3-1-3	73
Figura 81. Curva de retenção de água no solo da amostra 2-3-1-4	73
Figura 82. Curva de retenção de água no solo da amostra 2-3-1-5	74
Figura 83. Curva de retenção de água no solo da amostra 2-3-1-6	74
Figura 84. Curva de retenção de água no solo da amostra 1-1-1-5	78
Figura 85. Curva de retenção de água no solo da amostra 1-2-2-5	78
Figura 86. Curva de retenção de água no solo da amostra 1-3-1-2	79
Figura 87. Curva de retenção de água no solo da amostra 1-3-1-3	79
Figura 88. Curva de retenção de água no solo da amostra 1-3-2-8	80
Figura 89. Curva de retenção de água no solo da amostra 2-1-2-5	80
Figura 90. Curva de retenção de água no solo da amostra 2-2-1-4	81
Figura 91. Curva de retenção de água no solo da amostra 2-2-1-8	81

Figura 92. Curva de retenção de água no solo da amostra 2-2-1-9	82
Figura 93. Curva de retenção de água no solo da amostra 2-3-2-1	82
Figura 94. Curva de retenção de água no solo da amostra 2-3-2-6	83
Figura 95. Curva de retenção de água no solo da amostra 1-1-1-4	83
Figura 96. Curva de retenção de água no solo da amostra 1-1-1-6	84
Figura 97. Curva de retenção de água no solo da amostra 1-1-1-7	84
Figura 98. Curva de retenção de água no solo da amostra 1-1-1-8	85
Figura 99. Curva de retenção de água no solo da amostra 1-1-1-9	85
Figura 100. Curva de retenção de água no solo da amostra 1-2-2-4	86
Figura 101. Curva de retenção de água no solo da amostra 1-2-2-6	86
Figura 102. Curva de retenção de água no solo da amostra 1-2-2-7	87
Figura 103. Curva de retenção de água no solo da amostra 1-2-2-8	87
Figura 104. Curva de retenção de água no solo da amostra 1-2-2-9	88
Figura 105. Curva de retenção de água no solo da amostra 1-3-1-1	88
Figura 106. Curva de retenção de água no solo da amostra 1-3-2-7	89
Figura 107. Curva de retenção de água no solo da amostra 1-3-2-9	89
Figura 108. Curva de retenção de água no solo da amostra 2-1-2-1	90
Figura 109. Curva de retenção de água no solo da amostra 2-1-2-2	90
Figura 110. Curva de retenção de água no solo da amostra 2-1-2-3	91
Figura 111. Curva de retenção de água no solo da amostra 2-1-2-4	91
Figura 112. Curva de retenção de água no solo da amostra 2-1-2-6	92
Figura 113. Curva de retenção de água no solo da amostra 2-2-1-5	92
Figura 114. Curva de retenção de água no solo da amostra 2-2-1-6	93
Figura 115. Curva de retenção de água no solo da amostra 2-2-1-7	93
Figura 116. Curva de retenção de água no solo da amostra 2-3-2-2	94
Figura 117. Curva de retenção de água no solo da amostra 2-3-2-3	94
Figura 118. Curva de retenção de água no solo da amostra 2-3-2-4	95
Figura 119. Curva de retenção de água no solo da amostra 2-3-2-5	95

1. RESUMO

O lodo proveniente das estações de Tratamento de Água e Esgoto Urbano é um material volumoso que sobra nas estações, causando vários transtornos e problemas de ordem ambiental. O emprego deste material, rico em matéria orgânica, na agricultura, é ao que parece a proposta mais viável.

O objetivo deste trabalho foi estudar as mudanças nas propriedades físicas de dois tipos de solos, um de textura fina (latossolo roxo) e outro de textura grossa (areia quartzosa), após incorporação de três tipos de lodos provenientes do tratamento de água e de esgoto urbano. As variáveis avaliadas foram os índices físicos (massa específica, massa específica aparente seca, massa específica dos solos, massa específica saturada, massa específica submersa, umidade, porosidade e índices de vazios), condutividade hidráulica de solo saturado e a curva de retenção de água no solo.

Adotou-se o delineamento de blocos ao acaso, em esquema fatorial $2 \times 3 \times 2 \times 3 \times 3$, sendo 2 tipos de solo, 3 tipos de lodo, 2 qualidades de água, 3 épocas de amostragem com 3 repetições de cada amostra.

Os resultados mostram que nas condições abordadas, os lodos produzidos pelas Estações de Tratamento de Água e Esgoto Urbano, podem ser utilizados na agricultura, como condicionadores de solo, levando a melhoria nas características físicas dos solos avaliados neste experimento.

2. SUMMARY

USE OF SILT OF STATIONS OF TREATMENT OF WATER AND URBAN SEWER AS SOIL CONDITIONING BASED ON THE PHYSICAL PROPERTIES OF THE SOIL. Botucatu, 2006. 116p. Dissertação (Mestrado em Agronomia / Irrigação e Drenagem), Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista.

Author: Marcelo De Marchi Colino

Adviser: Prof. Dr. Raimundo Leite Cruz

The silt proceeding from the stations of Treatment of Water and Urban Sewer is a voluminous material that surplus in the stations, causing some upheavals and problems of ambient order. The use of this material, rich in organic substance, in the agriculture, is to that seems the proposal most viable.

The objective of this work was to study the changes in the physical properties of two types of soil, one of fine texture and another one of thick texture, after incorporation of three types of silts proceeding from the treatment of water and urban sewer.

The delineation of blocks to perhaps was adopted, in factorial project $2 \times 3 \times 2 \times 3 \times 3$, being 2 types of soil, 3 types of silt, 2 qualities of water, 3 times of sampling with 3 repetitions of each sample.

The results show that in the boarded conditions, the silt produced per the Stations of Water Treatment and Urban Sewer, can be used in agriculture, as soil conditioning, taking the improvement in the physical characteristics of ground evaluated in this experiment.

3. INTRODUÇÃO

Ao fazermos todas as nossas atividades cotidianas utilizando água, poluímos a água que estava limpa. Essa poluição é constituída de uma mistura de detritos contendo restos de alimentos, detergentes, urina, fezes e outras excretas. É nesse processo que a água limpa se transforma em esgoto.

Como característica do populacional da população nos centros urbanos e as facilidades proporcionadas pela tecnologia, o consumo de produtos industrializados e de alimentos sofre um incremento. Em conseqüência, temos quantidades de resíduos gerados maior do que a capacidade do ambiente de degradar, ocasionando inúmeros problemas devido ao seu acúmulo.

Entre os resíduos gerados, os esgotos e o lixo são os que mais se destacam. No caso do esgoto, atualmente, a maior parte dele é lançada nos rios e cursos d'água sem o devido tratamento, comprometendo a quantidade e qualidade dos recursos hídricos. Já no caso do lixo é recomendado seu depósito em aterros sanitários, mas na maioria das cidades, isso é feito a céu aberto.

Sem o tratamento e disposição final adequados, estes resíduos podem causar sérios problemas ambientais e sanitários, como a contaminação do solo e das águas de superfície e subsuperfície, transmissão de doenças ou até mesmo a liberação de odores desagradáveis.

Nos últimos anos, os órgãos públicos competentes vem procurando implantar uma nova consciência política e ambiental, visando procurar soluções técnicas e economicamente viáveis para a disposição final desses resíduos.

Atualmente, diversos usos alternativos têm sido desenvolvidos, como agregados leves para construção civil, fabricação de tijolos e cerâmicas, fonte de energia para a produção de cimento e conversão de lodo em óleo combustível (Tsutiya, 2001).

No caso do lodo de esgoto, a aplicação deste resíduo em terras agrícolas tem-se tornado cada vez mais atraente, pelos altos custos e impactos ambientais relacionados com os demais métodos de disposição, pela presença de nutrientes e matéria orgânica no lodo e pela necessidade de redução nos custos na agricultura (Galdo et al., 2004).

Neste contexto, são de extrema importância as pesquisas sobre a aplicação de lodos de tratamento de água e esgoto na agricultura e seus efeitos.

Diante do exposto, idealizou-se um projeto, conduzido em condições de campo, objetivando-se avaliar a eficiência do uso de lodo de estações de tratamento de água e esgoto urbano como condicionadores de solo, segundo seus aspectos físicos.

No presente trabalho, as variáveis avaliadas foram os índices físicos (massa específica, massa específica aparente seca, massa específica dos solos, massa específica saturada, massa específica submersa, umidade, porosidade e índices de vazios), condutividade hidráulica de solo saturado e a curva de retenção de água no solo.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 Lodo de Tratamento de Esgoto

4.1.1 Aspectos gerais

Segundo Fernandes (2000), o esgoto é o resíduo proveniente das descargas domésticas, industriais e rurais. Contém em média 99,9% de água e 0,01% de sólidos. A parte sólida é constituída de 70% de material orgânico (proteínas, gorduras, etc.) e 30% de material inorgânico, constituído principalmente por areia, sais e metais.

De acordo com Ferreira (1999), os esgotos podem ser classificados com domésticos ou industriais. Os domésticos são constituídos por despejos domésticos, águas pluviais e de infiltração, enquanto que os industriais são provenientes da utilização de água para diversas finalidades, com características próprias conforme a finalidade da indústria e do tipo de tratamento utilizado, entre outros fatores.

Ao final de todos os processos de tratamento de esgoto, tem-se um resíduo denominado lodo de esgoto que se caracteriza por apresentar, em concentrações variáveis segundo sua origem, água (componente majoritário), matéria orgânica, elementos minerais (nutrientes de plantas e outros metais pesados), parasitas intestinais humanos e compostos orgânicos complexos (Marques et. al., 2000).

Existem algumas possibilidades para a utilização do lodo de esgoto (biossólido), porém, a que desperta maior interesse é a que preconiza o seu uso como fonte de nutrientes

para as plantas ou como condicionador de solos cultivados, por promover melhoria da fertilidade dos solos, economia com fertilizantes minerais, reciclagem de nutrientes, ao mesmo tempo em que contribui para a preservação ambiental (Marques et al. 2000).

Entretanto, os biossólidos podem, por outro lado, poluir o meio ambiente devido aos seguintes aspectos: presença de metais pesados e organismos patogênicos.

De um modo geral, a grande maioria dos biossólidos gerados nas ETEs no Brasil, podem ser utilizados na agricultura, pois atendem aos requisitos de qualidade para uso agrícola. Aliás, o uso agrícola é uma forma mundialmente aceita para a destinação final de biossólidos, pois apresentam em sua constituição teores elevados de matéria orgânica, macro e micro nutrientes para as plantas (Tsutiya, 2000).

4.1.2 Aplicação de lodo de esgoto na agricultura

O lodo de esgoto é um resíduo que pode ser utilizado como condicionador das propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, devido ao seu teor de matéria orgânica e nutrientes (Melo et al., 2001).

Segundo Guerrini et al. (2004), que em seu experimento trabalhou com substratos compostos por biossólidos e casca de arroz carbonizada, a medida que se eleva a dose de biossólido nas amostras, ocorre uma diminuição na porosidade, mesmo com a elevação proporcionada em microporosidade, proporcionando uma maior capacidade em reter água. Esta característica de materiais com altos valores de matéria também foi observado por Moraes Neto et al. (2001).

O lodo de esgoto também vem sendo utilizado com sucesso em espécies florestais. Gonçalves et al. (2000) apresentam informações sobre o potencial do uso do lodo de esgoto para o cultivo do eucalipto.

De acordo com Kocsis et al. (2003), os solos que receberam a adição de lodo de esgoto apresentaram maior umidade, podendo chegar a 4,0%, enquanto que os solos sem adição de lodo não ultrapassam 3,00%, comprovando a melhora da retenção de umidade no solo.

Entretanto, poucos trabalhos mostram o efeito do lodo sobre as propriedades físicas do solo, embora indiquem o aumento da matéria orgânica no solo. Entre os possíveis efeitos

da aplicação de matéria orgânica ao solo está a maior agregação do solo, devido a sua atuação como agente cimentante entre as partículas do solo.

4.2 Lodo de Tratamento de Água

Os serviços públicos de abastecimento devem fornecer sempre água de boa qualidade. As análises e os exames das águas obtidas nos mananciais com a frequência desejável revelarão a necessidade ou a dispensabilidade de qualquer processo corretivo.

O tratamento de água deverá ser adotado e realizado apenas depois de demonstrada a sua necessidade e, sempre que a purificação for necessária, compreender somente os processos imprescindíveis à obtenção da qualidade que se deseja (CETESB, 1987).

A necessidade de tratamento e os processos exigidos deverão ser determinados com base nas inspeções sanitárias e nos resultados representativos de exames e análise.

O processo primário, no tratamento de águas superficiais, consiste na clarificação química através da coagulação, decantação e filtração. Os lagos possuem uma qualidade mais uniforme ao longo do ano, e requerem um grau de tratamento inferior ao requerido pelas águas de rios. A purificação natural resulta na redução de turbidez, bactérias coliformes, cor e eliminação das variações diárias. Por outro lado, o desenvolvimento de algas pode causar aumento na turbidez e pode produzir gostos e odores de difícil remoção, durante o outono e o inverno.

As duas principais origens de resíduos, no processo de tratamento de água, são o lodo dos decantadores, resultante da coagulação química ou abrandamento, e a água de lavagem de filtros. Essas descargas são altamente variáveis em composição, contendo materiais concentrados, removidos da água bruta, mais os coagulantes utilizados no tratamento (Hammer, 1979).

Historicamente, o método de disposição desses resíduos constava da descarga num rio ou lago, sem tratamento algum. Essa disposição era justificada pelo fato de que à água de lavagem dos filtros e ao lodo dos decantadores que eram retornados ao curso d'água, não adicionada de impureza alguma, mas sim se faria retornar o material que estava originalmente presente na água do rio.

Hoje em dia, tal argumento não é mais aceito, pois a qualidade da água é degradada pela captação da água, e as substâncias químicas usadas no tratamento introduzem novos poluentes.

Existem algumas possibilidades para a disposição final dos resíduos das estações de tratamento de água, como descarregar-se nos cursos d'água, conduzir-se em tubulações para o sistema de tratamento de esgoto para posterior tratamento, ou podem ser descarregados em lagos.

Uma variedade de métodos alternativos são disponíveis, entretanto, devido as características particulares de cada tipo de resíduo das estações, nenhum método de disposição final pode ser universalmente aplicado.

Uma disposição desse resíduo apresentada neste trabalho é de sua utilização como condicionador de solos, entretanto muito poucos trabalhos mostram o efeito do lodo sobre as propriedades físicas do solo.

4.3 Águas residuárias

O desequilíbrio dos recursos hídricos e crescimento da população nos grandes centros urbanos obrigam a priorização do uso das águas de superfície para o abastecimento público e para a geração de energia elétrica. Como consequência, surge a idéia do reuso de águas residuárias (Leon et al., 1999).

Para a agricultura, o uso da água residuária é uma alternativa importante, pois, permite o aproveitamento em potencial das águas e dos nutrientes dos esgotos para o crescimento e desenvolvimento das plantas.

Assim como a água residuária, o lodo de esgoto tem grande importância na agricultura devido ao seu elevado conteúdo de nutrientes minerais, como o nitrogênio, fósforo e micronutrientes, além da matéria orgânica, cujos efeitos se fazem sentir a longo prazo, a resistência a erosão e ativando a sua vida microbológica (Tsutiya, 2001).

No Brasil, a prática do uso de esgotos para a irrigação de hortaliças e de algumas culturas forrageiras é relativamente difundida. Entretanto, constitui-se em um procedimento não regulamentado e tem se desenvolvido com precário planejamento ou controle.

Na maioria das vezes é inconsciente por parte do usuário, que utiliza águas altamente poluídas de córregos e rios adjacentes para irrigação de vegetais, ignorando que esteja exercendo uma prática danosa à saúde pública dos consumidores e provocando impactos ambientais negativos. Em termos de reuso industrial, a prática começa a se implementar em algumas cidades em função dos elevados custos da água potável, mas ainda associada a iniciativas isoladas.

De modo geral, a gestão de Recursos Hídricos no Brasil tem tido avanços significativos em termos de capacitação técnico-científica e humana, porém ainda persistem importantes carências de caráter técnico. Estas impõem ao setor de saneamento básico uma necessidade de pesquisa e desenvolvimento buscando novos processos, ou alternativas tecnológicas, para equacionar de maneira viável desafios ambientais e contribuir para o avanço científico, formação de recursos humanos na área ambiental e transferência das inovações ao setor produtivo.

4.4 Curva de retenção de água no solo

As curvas de retenção de água são classicamente construídas com dados obtidos pela metodologia proposta por RICHARDS, 1965, determinando uma coleção de pares de umidade do solo correspondente a dado potencial matricial aplicado. O sistema consta de panela de pressão, placa cerâmica porosa e equipamentos de produção e controle de pressão, podendo usar tanto amostras indeformadas como deformadas.

Segundo Hillel (1998) e Richards (1965), a estrutura do solo exerce influência na retenção de água desde valores próximos a zero até valores entre -100 a -200 kPa. Na metodologia descrita por Richards, a extração de água ocorre por diferença de potencial entre a placa porosa, a amostra de solo e o fluxo de água é exponencialmente reduzido quando o potencial matricial torna-se mais negativo, principalmente quando se aproxima de -1500 kPa, gastando um tempo muito grande para atingir o equilíbrio da umidade na amostra.

Outro método mais antigo, porém pouco usado devido a limitações de equipamento, é a medida do potencial da água por psicrômetros de termopar. Com o enorme avanço da eletrônica, hoje existe no mercado aparelhos de alta resolução, com sofisticados acessórios, que possibilitam determinar o potencial da água no solo.

Basicamente, este aparelho mede a umidade relativa de uma câmara que se encontra em equilíbrio com o potencial da água numa amostra de solo interna a ela, estimando o potencial pela relação termodinâmica da umidade relativa com potencial matricial da água no solo. Este método emprega predominantemente amostras deformadas, sendo mais recomendado para medir potenciais mais negativos ou menores do que -100 kPa.

Costa (1979) diz que a influência da textura do solo é muito grande na sua capacidade de retenção de água. Entretanto, solos das mesma classe de textura podem ter curvas de retenção de água diferentes, não só devido as diferenças de granulometria nas mesmas classes de textura, mas também, devido a diferenças de teor de matéria orgânica, diferenças de microestrutura, entre outros fatores.

Segundo Dourado Neto et al. (1990), o conhecimento da relação funcional entre a umidade do solo e o seu potencial matricial na zona radicular da cultura é fundamental na irrigação, visando um aproveitamento mais racional da água.

4.5 Condutividade hidráulica de solo saturado

A condutividade hidráulica de um solo saturado traduz a maior ou menor facilidade com que a água atravessa o solo. Ela é uma propriedade que não depende apenas do solo, mas sim das características intrínsecas ao próprio solo (porosidade, distribuição dimensional dos poros, ou seja, da geometria do espaço poral) e das características do fluído (densidade e viscosidade).

Libardi (1995) apresenta claramente o método de determinação da condutividade hidráulica do solo saturado para amostras com estrutura indeformada aplicando a equação de Darcy-Buckingham. A apreciação da magnitude que a condutividade pode ser encontrada foi disposta em classes por O'Neal em 1952 (Klute, 1965).

De acordo com Hillel (1972), a condutividade hidráulica depende das propriedades do fluido e do material poroso e um dos fatores que a afetam é a estabilidade dos agregados com a composição química do complexo de troca.

Shainberg & Letey (1984) relatam que a condutividade hidráulica depende do teor de sódio e da concentração total de sais da solução percolante. Elevada condutividade

hidráulica pode ser mantida, mesmo com altos valores de porcentagem de sódio intercambiável, se a concentração da solução é superior a um determinado nível crítico.

4.6 Índices Físicos

As propriedades físicas do solo são modificadas de acordo com o tipo de uso e cultivo a que ele é submetido. Algumas mudanças ocorrem num período curto de tempo ou mesmo em uma simples prática de preparo (Vieira, 1981).

A massa específica do solo é uma propriedade relativamente instável. Ela varia de solo para solo e, até mesmo, dentro de um mesmo solo, dependendo principalmente do teor de matéria orgânica, da profundidade e do cultivo empregado (Gavande, 1976).

Existe uma estreita relação entre a massa específica do solo e seus outros atributos, como a porosidade, macroporosidade e seu teor de matéria orgânica. Do ponto de vista de Kiehl et al. (1972), para uma correta interpretação dos resultados da massa específica do solo, é necessário compará-los com outras informações, como a massa específica das partículas, distribuição dos poros por tamanho e grau de agregação.

Segundo Grohman (1972), dentre as propriedades físicas do solo sujeitas a alterações pelo cultivo, a porosidade, por estar relacionada com o volume e com a distribuição dos espaços porosos, merece especial atenção, visto que nesses espaços se processam os principais fenômenos para a produção vegetal.

De acordo com Baver (1956), a variação da porosidade depende do tamanho das partículas e do grau de agregação, e a matéria orgânica tem papel importante, uma vez que favorece a formação de agregados, com conseqüente aumento na porosidade.

Para Reichard (1988), o solo é um reservatório de água para as plantas, e todas as práticas de manejo de água, em agricultura, visam a manutenção de seu nível de água em condições ideais para o desenvolvimento das culturas. Apesar de ser um reservatório aberto para a atmosfera e para os horizontes mais profundos do perfil, retém umidade pela interação com a matriz do solo.

5. MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 Localização do experimento

O experimento foi conduzido na estufa localizada na área experimental do Departamento de Engenharia Rural da Faculdade de Ciências Agronômicas pertencente a Universidade Estadual Paulista (FCA-UNESP), Campus de Botucatu-SP. A Figura 1 mostra a estufa onde foi conduzido o experimento.



Figura 1. Vista da estufa da estação de tratamento de esgoto do lageado.

5.2 Delineamento experimental

O experimento foi constituído por duas qualidades de água, dois tipos de solo, três tipos de lodo, com três repetições, sendo estipulada três épocas de amostragem, dando o total de 108 parcelas. Antes do preparo das parcelas, os solos e os lodos foram secos ao ar e peneirados com a peneira de malha de 2,0mm (TFSA).

A Figura 2 mostra um tipo de solo secando ao ar, enquanto que a Figura 3 mostra o solo sendo peneirado.



Figura 2. Um dos tipos de solo secando ao ar.



Figura 3. Um dos tipos de solo sendo peneirado com a peneira de malha 2,0mm.

Os tratamentos foram preparados em recipientes com capacidade de 9,50 litros, sendo preenchidos com a mistura de solo e lodo na seguinte proporção de 70 % do volume de solo com os 30 % restantes preenchidos com lodo. A Figura 4 ilustra esse processo.



Figura 4. Processo de montagem dos vasos.

Os vasos foram dispostos em estufa de vegetação de modo que metade delas fosse irrigada com água tratada pela SABESP, enquanto que a outra metade com água residuária.

A irrigação foi feita com a utilização de uma mangueira de jardim e um Becker para o controle da lâmina de água aplicada nos vasos.

Ao todo, foram três épocas de coleta de amostras, sendo a primeira no início do experimento, a segunda um mês após e a terceira e última após dois meses do início do experimento. A Figura 5 ilustra o processo de coleta das amostras.



Figura 5. Processo de coleta das amostras.

Essas amostras foram analisadas quanto às suas propriedades físicas (condutividade hidráulica de solo saturado, curva característica de retenção de água no solo e índices físicos).

A partir dessas análises, foi observada a eficiência desses materiais como condicionadores de solo na agricultura.

5.3 Caracterização dos tipos de solo

Foram utilizados dois tipos de solos, sendo um de textura fina (latossolo roxo) e outro de textura grossa (areia quartzosa), provenientes da região onde foi conduzido o experimento. Esses tipos de solos foram analisados separadamente do lodo, obtendo-se assim as características físicas dos mesmos para posterior comparação com a mistura.

5.3.1 Solo de textura grossa

5.3.1.1 Índices físicos

O Quadro 1 apresenta os índices físicos obtidos para o solo de textura grossa.

Quadro 1. Índices físicos obtidos para o solo de textura grossa.

Índice	Und	Valor	Índice	Und	Valor
Teor de umidade (U)	%	1,92	Massa específica saturada (ρ_{sat})	$g.cm^{-3}$	1,95
Porosidade (η)	%	41,88	Massa específica submersa (ρ_{sub})	$g.cm^{-3}$	0,95
Massa específica (ρ)	$g.cm^{-3}$	1,56	Grau de saturação (S_r)	%	7,01
Massa específica dos sólidos (ρ_s)	$g.cm^{-3}$	2,63	Índice de vazios (e)	-	0,72
Massa específica aparente seca (ρ_d)				$g.cm^{-3}$	1,53

5.3.1.2 Condutividade hidráulica de solo saturado

O valor da condutividade hidráulica de solo saturado encontrado para o solo de textura grossa é de $2,1496 \cdot 10^{-3} cm.s^{-1}$;

5.3.1.3 Curva de retenção de água no solo

A Figura 10 apresenta a curva de retenção de água no solo para o solo de textura grossa.

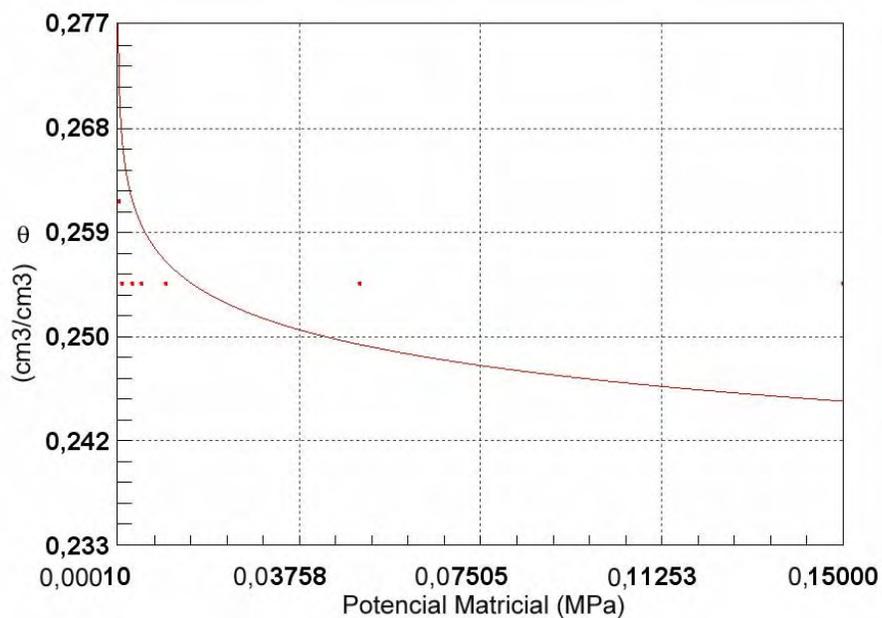


Figura 10. Curva de retenção de água obtida a partir do solo de textura grossa.

5.3.2 Solo de textura fina

5.3.2.1 Índices físicos

O Quadro 2 apresenta os índices físicos obtidos para o solo de textura fina.

Quadro 2. Índices físicos obtidos para o solo de textura fina.

Índice	Und	Valor	Índice	Und	Valor
Teor de umidade (U)	%	2,30	Massa específica saturada (ρ_{sat})	$g.cm^{-3}$	1,80
Porosidade (η)	%	51,94	Massa específica submersa (ρ_{sub})	$g.cm^{-3}$	0,80
Massa específica (ρ)	$g.cm^{-3}$	1,31	Grau de saturação (S_r)	%	5,66
Massa específica dos sólidos (ρ_s)	$g.cm^{-3}$	2,66	Índice de vazios (e)	-	1,08
Massa específica aparente seca (ρ_d)				$g.cm^{-3}$	1,28

5.3.2.2 Condutividade hidráulica de solo saturado

O valor da condutividade hidráulica de solo saturado encontrado para o solo de textura fina é de $3,0486 \cdot 10^{-3} \text{ cm.s}^{-1}$

5.3.2.3 Curva de retenção de água no solo

A Figura 11 apresenta a curva de retenção de água no solo para o solo de textura fina.

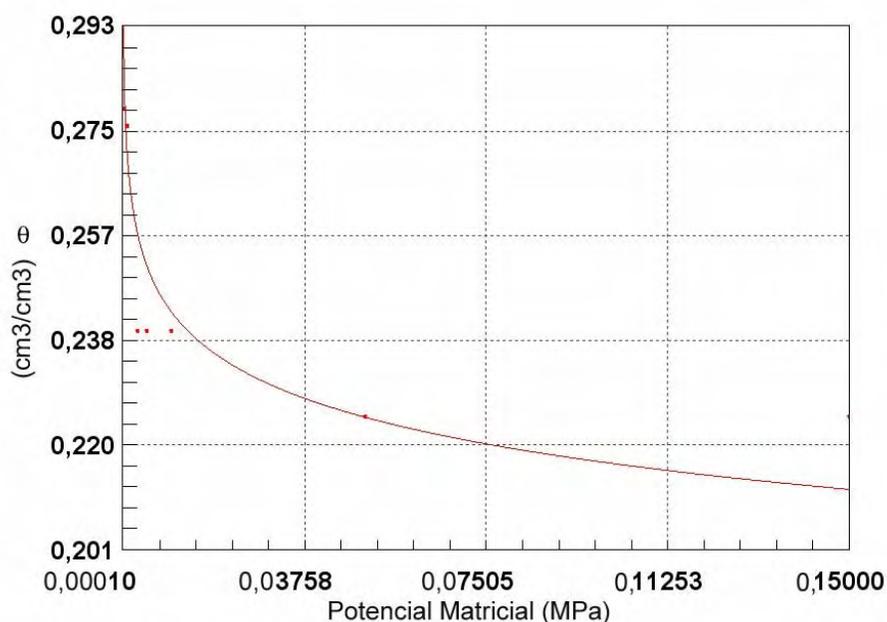


Figura 11. Curva de retenção de água obtida a partir do solo de textura fina.

5.4 Caracterização dos tipos de lodo

Os lodos utilizados foram fornecidos pela Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP) Escritório de Botucatu e pela própria FCA.

Ao todo, foram três tipos de lodo:

- Proveniente da estação de tratamento de esgoto da cidade de Franca-SP;
- Proveniente da estação de tratamento de água da cidade de Botucatu;

- Proveniente da estação de tratamento de esgoto da Fazenda Experimental Lageado, localizada na cidade de Botucatu-SP.

5.4.1 Lodo proveniente da Estação de Tratamento de Água de Botucatu

A Estação de Tratamento de Água de Botucatu existente é do tipo convencional, com capacidade nominal para 330 l.s^{-1} , com a particularidade de ter sido uma das precursoras no Brasil na utilização de decantadores de escoamento vertical.

Nesta estação de tratamento, a água passa por varias unidades, que são: caixa de chegada (medição e mistura da água bruta), flocculador, decantador, caixa de reunião e mistura de água decantada, filtros, canal de água filtrada e sistema de aplicação de produtos químicos.

O lodo utilizado neste experimento é proveniente da unidade do decantador. Os decantadores utilizado são do tipo tubular e o lodo é oriundo do processo de limpeza desses decantadores.

5.4.2 Lodo de esgoto proveniente da Estação de Tratamento de Franca

A estação de tratamento de esgotos de Franca utiliza o processo de lodo ativado convencional para tratamento do esgoto da cidade. Esses são predominantemente domésticos, não havendo contribuição significativa de efluentes industriais.

A estação atende aproximadamente 80% da população da cidade. Uma parte equivalente a 18% é tratada em 7 outras estações de tratamento (6 sistemas com lagoas de estabilização e um 1 lodo ativado por aeração prolongada). Apenas 2% do esgoto coletado (sub bacia do Jardim Dermínio), não recebe tratamento, devido a impossibilidade da instalação de interceptores às margens do córrego, deterioradas por processo erosivo.

Nesta estação de tratamento, as unidades que compõem a fase líquida do processo são: gradeamento (grade grossa e grade fina), caixas de areia aeradas, medição de vazão do esgoto afluente, Estação Elevatória de esgoto bruto, decantadores primários, tanques de aeração, decantadores secundários e Estação Elevatória de recirculação de lodo.

O lodo utilizado neste experimento é proveniente da unidade dos decantadores secundários.

Nos decantadores secundários ocorre a decantação e adensamento do lodo que, conduzido para o centro dos tanques retorna ao tanque de aeração através da Estação Elevatória de Recirculação.

5.4.3 Lodo de esgoto proveniente da Estação de Tratamento do Lageado

O lodo de esgoto proveniente da Estação de Tratamento do Lageado tem como origem a colônia de moradores da fazenda, que é composta por quinze casas e aproximadamente 65 habitantes, diferentemente da estação de tratamento da SABESP da cidade de Franca, que atende toda a cidade.

Nesta estação de tratamento biológico, o esgoto doméstico passa por diferentes caixas de fibrocimento. Nas três primeiras caixas há decantação, separando o material sólido mais grosseiro; na quarta, o material vai para caixas com brita e terra, onde há uma filtração melhor. Em seguida, o resíduo líquido passa por leito filtrante composto por três partes de casca de arroz e uma parte de solo de textura média, além de diferentes espécies aquáticas (junco, aguapé e taboa), que retiram mais matéria orgânica da água (Augusto et al., 2003).

O lodo utilizado neste experimento tem origem das caixas destinadas ao processo de decantação do esgoto.

5.5 Tipo de irrigação

O experimento foi irrigado com a utilização de uma mangueira de jardim e um Becker, onde o volume necessário para se atingir a capacidade de campo da amostra era selecionado e posteriormente aplicado ao vaso de amostra.

5.6 Tipo de Água

Foram utilizadas duas qualidades de água na execução do experimento, uma proveniente do sistema de abastecimento urbano, isto é, tratada pela SABESP e outro do tipo residuária, proveniente da estação de tratamento de esgoto da Fazenda Experimental Lageado.

5.7 Legendas

Para esse experimento, as amostras foram simbolizadas pela seguinte legenda:

S-L-A-R

Onde:

- S – tipo de solo utilizado;
- L – tipo de lodo utilizado;
- A – tipo de água utilizada para a irrigação;
- R – repetição.

Para os tipos de solo, utilizou-se a seguinte numeração:

- 1 – solo de textura grossa;
- 2 – solo de textura fina.

Para os tipos de lodo, utilizou-se a seguinte numeração:

- 1 – lodo de esgoto da Estação de Tratamento de Esgoto do Lageado;
- 2 – lodo de esgoto da Estação de Tratamento de Franca – SP;
- 3 – lodo da Estação de Tratamento de Água de Botucatu – SP.

Para os tipos de água, utilizou-se a seguinte numeração:

- 1 – água tratada pela SABESP;
- 2 – água residuária.

Para cada tipo de mistura foram feitas três repetições.

5.8 Ensaio de laboratório

Os ensaios de laboratório foram conduzidos no laboratório de Relações Água-Solo localizado no Departamento de Engenharia Rural da Faculdade de Ciências Agronômicas pertencente a Universidade Estadual Paulista (FCA-UNESP), Campus de Botucatu-SP.

5.8.1 Preparo das amostras

As amostras utilizadas nos ensaios para a determinação dos índices físicos, da curva característica de retenção de água no solo e de condutividade hidráulica de solo saturado foram moldadas em anéis de alumínio com diâmetro de 4,0cm e altura de 2,5cm.

Antes de preencher os anéis com solo, o mesmo foi passado novamente pela peneira de malha 2,0mm. Após isso, os anéis foram preenchidos e depois rasados com a espátula.

A Figura 6 ilustra o preparo das amostras.



Figura 6. Processo de preparo das amostras.

5.8.2 Determinação dos índices físicos

Alguns índices físicos, como a massa específica, a massa específica dos sólidos, a massa específica aparente seca, a massa específica saturada e o teor de umidade foram calculados diretamente, enquanto que a porosidade, a massa específica submersa, o grau de saturação e o índice de vazios foram calculados através de expressões que correlacionam os índices.

Para o cálculo dos índices físicos, foram moldados dois anéis para cada amostra. Esses anéis foram pesados e descontados a sua tara, obtendo-se assim a massa (m) de solo misturado com lodo de cada anel. Com as dimensões de cada anel foi possível calcular o seu volume (V).

Uma das amostras de cada tipo de mistura foi saturada por vinte e quatro horas e pesada em seguida, descontando-se a tara do anel, obtendo assim a sua massa saturada (m_{sat}), enquanto que a outra amostra foi colocada na estufa a 105°C por um período de vinte e quatro horas. Em seguida, a amostra foi pesada e sua tara descontada, obtendo-se assim a sua massa seca (m_s).

Com esses dados, através da equação (1), foi calculado a massa de água (m_w) presente em cada amostra.

$$m_w = m - m_s \quad (\text{g}) \quad (1)$$

Depois de repetir esse procedimento para todas as amostras, iniciou-se o cálculo dos índices físicos.

5.8.2.1 Umidade

O cálculo do teor de umidade de cada amostra deu-se através da aplicação direta da equação (2).

$$U = \left(\frac{m_w}{m_s} \right) * 100 \quad (\%) \quad (2)$$

5.8.2.2 Massa específica

A massa específica foi calculada através da aplicação da equação (3).

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (\text{g.cm}^{-3}) \quad (3)$$

5.8.2.3 Massa específica dos sólidos

A massa específica dos sólidos foi calculada em laboratório através do método do picnômetro, através da equação (4).

$$\rho_s = \frac{100}{Pa + 100 - Pas} \quad (\text{g.cm}^{-3}) \quad (4)$$

A Figura 7 ilustra umas das etapas do processo da determinação da massa específica dos sólidos.

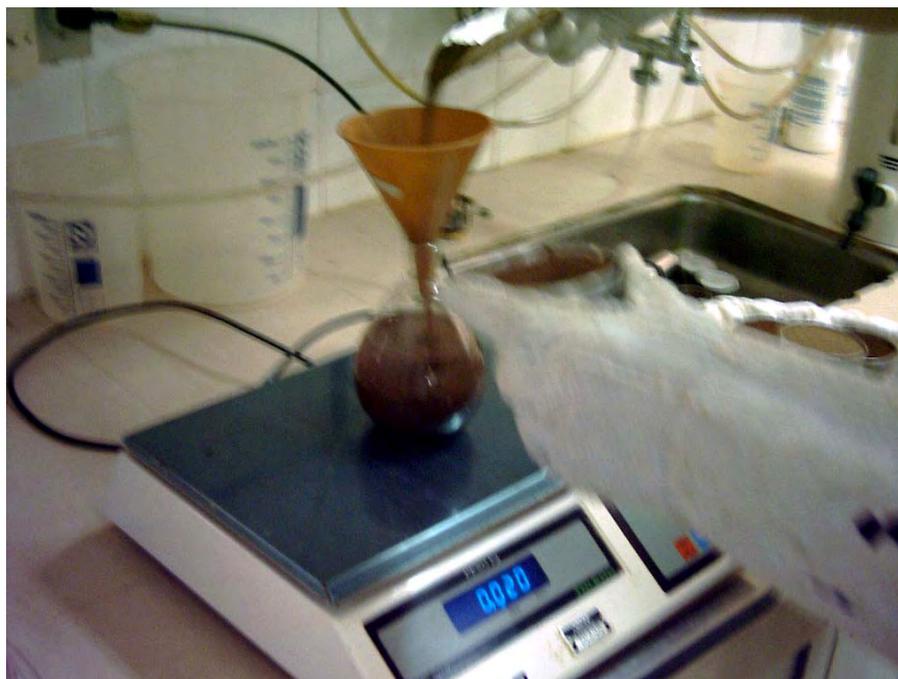


Figura 7. Uma das etapas da determinação da massa específica dos sólidos.

5.8.2.4 Massa específica aparente seca

A massa específica aparente seca foi calculada através da aplicação da equação (5).

$$\rho d = \frac{ms}{V} \quad (\text{g.cm}^{-3}) \quad (5)$$

5.8.2.5 Massa específica saturada

A massa específica saturada foi calculada através da aplicação da equação (6).

$$\rho_{sat} = \frac{msat}{V} \quad (\text{g.cm}^{-3}) \quad (6)$$

5.8.2.6 Massa específica submersa

A massa específica submersa não pode ser calculada diretamente. Ela foi determinada através da aplicação da equação (7).

$$\rho_{sub} = \rho_{sat} - \rho_w \quad (\text{g.cm}^{-3}) \quad (7)$$

Onde ρ_w é a massa específica da água e tem valor igual a $1,0\text{g.cm}^{-3}$.

5.8.2.7 Índice de vazios

O índice de vazios não pode ser calculado diretamente. Ele foi determinado através da aplicação da equação (8).

$$e = \frac{\rho_s}{\rho_d} - 1 \quad (8)$$

5.8.2.8 Porosidade

A porosidade não pode ser calculada diretamente. Ela foi determinada através da aplicação da equação (9).

$$\eta = \left(\frac{e}{e+1} \right) * 100 \quad (\%) \quad (9)$$

5.8.2.9 Grau de saturação

O grau de saturação não pode ser calculado diretamente. Ele foi determinada através da aplicação da equação (10).

$$Sr = \left(\frac{\rho_s * U}{\rho_w * e} \right) * 100 \quad (\text{g.cm}^{-3}) \quad (10)$$

Onde ρ_w é a massa específica da água e tem valor igual a $1,0 \text{ g.cm}^{-3}$.

5.8.3 Determinação da condutividade hidráulica de solo saturado

A condutividade hidráulica de solo saturado foi determinada utilizando-se o permeâmetro de carga constante.

Para a utilização deste aparelho foi preparado um anel para cada amostra. Antes do início do experimento, esses anéis foram saturados por um período de vinte e quatro horas. Após a saturação da amostra, foi conectado um anel de acrílico transparente vazio adicional ao topo da amostra por meio de um fita adesiva a prova da água. Em seguida foi colocado água no cilindro adicional até $\frac{3}{4}$ de seu volume. Rapidamente, a mostra foi transferida para um suporte e a bureta de Mariotte foi ativada, conforme mostra a Figura 8.

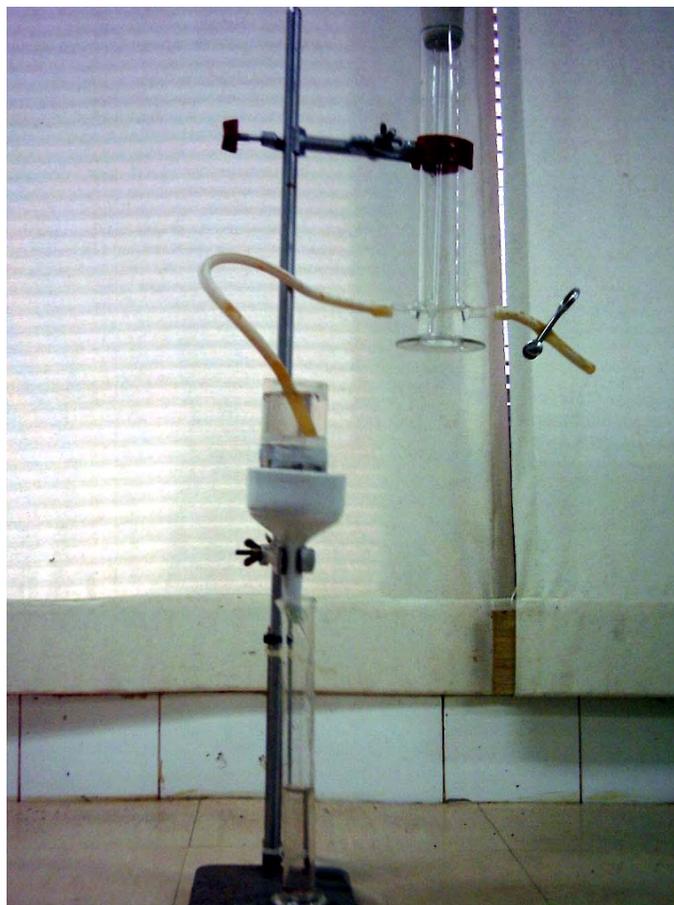


Figura 8. Vista do permeômetro de carga constante.

Quando a condição de “steady-state” (quando o volume de água que passa pelo cilindro adicional se estabiliza e mantém-se constante com o tempo) foi atingido, começou-se a marcar um tempo arbitrário (t) e o volume (V) que passou pela amostra no período. A determinação do volume (V) que passa pela amostra no tempo (t) foi repetida cinco vezes, obtendo-se assim uma média aritmética do volume. A altura da coluna da água (h) no anel adicional representa o potencial de pressão no topo da amostra.

O comprimento da amostra (L) é a própria altura do anel de alumínio e como o diâmetro também é conhecido, foi calculado a área (A) da seção transversal da amostra.

Com esses dados, através da equação (11) foi possível calcular a condutividade hidráulica de solo saturado.

$$Ko = \frac{V * L}{A * t(h + L)} \quad (\text{cm.s}^{-1}) \quad (11)$$

5.8.4 Determinação da curva característica de retenção de água no solo

O método mais tradicional e utilizado para elaboração das curvas características do solo nesta dissertação, é o da câmara de pressão de Richards (existem dois tipos de aparelhos, um denominado panela de pressão e outro de alta microporosidade, denominado placa ou membrana de Richards). Entretanto, também são ressaltados alguns obstáculos oferecidos por esta metodologia. Dentre estes se pode destacar a histerese, a determinação correta do ponto de equilíbrio entre a pressão aplicada e a água retida no solo, o tempo para construção da curva e o alto custo do material .

Consta, em síntese, de uma câmara de pressão ligada à atmosfera por intermédio de uma placa ou membrana de celofane, sobre a qual é colocada a amostra de solo. A parte inferior à placa acha-se sob pressão atmosférica. A amostra de solo é colocada sobre a placa e saturada com água por um período de 24 horas. Em seguida, aplica-se uma pressão (0,1 a 15 atm dependendo do tipo de aparelho) à câmara. Devido a esta pressão, a água é retirada do solo até que o equilíbrio se estabeleça e, nestas condições, o solo terá um teor de umidade.

As amostras de solo são colocadas (quando saturadas) no aparelho e uma pressão é aplicada. No equilíbrio, a amostra é retirada do aparelho para sua medida de umidade. Para diferentes valores de pressão, obtém-se valores de umidade correspondentes ao potencial mátrico e a curva de retenção de água pode ser montada.

A Figura 9 mostra o conjunto de câmaras de pressão de Richards utilizado para a elaboração das curvas de retenção de água no solo apresentadas nessa dissertação.



Figura 9. Vista das câmaras de pressão de Richards.

5.9 Testes estatísticos

Os resultados foram analisados estatisticamente, aplicando-se o teste F de acordo com seus respectivos esquemas de variância. Quando constatada interação significativa, as médias foram testadas através do teste de Tukey a $P \leq 0,05$.

As análises de variância e teste de médias foram realizados por meio do programa estatístico SAS for Windows V.8 (SAS Institute Inc., 2001).

6. RESULTADOS

6.1 Primeira época de amostragem

A primeira época de amostragem corresponde ao início do experimento, ou seja, logo após a mistura de cada tipo de solo com cada tipo de lodo e a montagem dos vasos, foi efetuada a primeira coleta de amostras, denominada primeira época de amostragem.

A seguir encontram-se os resultados obtidos para a primeira época de amostragem.

6.1.1 Índices físicos

Os índices físicos para cada tipo de mistura de solo com lodo se encontram no Quadro 3.

Quadro 3. Índices físicos obtidos para a primeira época de amostragem.

Amostra	U (%)	η (%)	ρ (g.cm ⁻³)	ρ_s (g.cm ⁻³)	ρ_{sat} (g.cm ⁻³)	ρ_{sub} (g.cm ⁻³)	S _r (%)	e	ρ_d (g.cm ⁻³)
2-3-2-7	1,82	53,94	1,23	2,63	1,72	0,72	4,08	1,17	1,21
1-3-1-8	1,75	46,91	1,42	2,63	1,89	0,89	4,88	0,88	1,40
1-1-1-1	1,75	22,09	1,42	1,79	1,80	0,80	11,08	0,28	1,39
2-1-1-1	2,08	55,78	1,07	2,38	1,52	0,52	3,93	1,26	1,05

2-2-2-6	2,94	54,44	1,23	2,63	1,66	0,66	6,47	1,19	1,20
1-2-1-5	1,69	44,64	1,57	2,78	1,80	0,80	5,84	0,81	1,54
2-3-2-8	1,82	53,94	1,23	2,63	1,72	0,72	4,08	1,17	1,21
1-3-1-9	1,75	46,91	1,42	2,63	1,89	0,89	4,88	0,88	1,40
1-1-1-2	1,75	22,09	1,42	1,79	1,80	0,80	11,08	0,28	1,39
2-1-1-2	2,08	55,78	1,07	2,38	1,52	0,52	3,93	1,26	1,05
2-2-2-4	2,94	54,44	1,23	2,63	1,66	0,66	6,47	1,19	1,20
1-2-1-6	1,69	44,64	1,57	2,78	1,80	0,80	5,84	0,81	1,54
2-3-2-9	1,82	53,94	1,23	2,63	1,72	0,72	4,08	1,17	1,21
1-3-1-7	1,75	46,91	1,42	2,63	1,89	0,89	4,88	0,88	1,40
1-1-1-3	1,75	22,09	1,42	1,79	1,80	0,80	11,08	0,28	1,39
2-1-1-3	2,08	55,78	1,07	2,38	1,52	0,52	3,93	1,26	1,05
2-2-2-5	2,94	54,44	1,23	2,63	1,66	0,66	6,47	1,19	1,20
1-2-1-4	1,69	44,64	1,57	2,78	1,80	0,80	5,84	0,81	1,54
2-3-1-7	1,82	53,94	1,23	2,63	1,72	0,72	4,08	1,17	1,21
1-3-2-4	1,75	46,91	1,42	2,63	1,89	0,89	4,88	0,88	1,40
1-1-2-4	1,75	22,09	1,42	1,79	1,80	0,80	11,08	0,28	1,39
2-1-1-7	2,08	55,78	1,07	2,38	1,52	0,52	3,93	1,26	1,05
2-2-2-1	2,94	54,44	1,23	2,63	1,66	0,66	6,47	1,19	1,20
1-2-1-1	1,69	44,64	1,57	2,78	1,80	0,80	5,84	0,81	1,54
2-3-1-8	1,82	53,94	1,23	2,63	1,72	0,72	4,08	1,17	1,21
1-3-2-5	1,75	46,91	1,42	2,63	1,89	0,89	4,88	0,88	1,40
1-1-2-5	1,75	22,09	1,42	1,79	1,80	0,80	11,08	0,28	1,39
2-1-1-8	2,08	55,78	1,07	2,38	1,52	0,52	3,93	1,26	1,05
2-2-2-2	2,94	54,44	1,23	2,63	1,66	0,66	6,47	1,19	1,20
1-2-1-2	1,69	44,64	1,57	2,78	1,80	0,80	5,84	0,81	1,54
2-3-1-9	1,82	53,94	1,23	2,63	1,72	0,72	4,08	1,17	1,21
1-3-2-6	1,75	46,91	1,42	2,63	1,89	0,89	4,88	0,88	1,40
1-1-2-6	1,75	22,09	1,42	1,79	1,80	0,80	11,08	0,28	1,39

2-1-1-9	2,08	55,78	1,07	2,38	1,52	0,52	3,93	1,26	1,05
2-2-2-3	2,94	54,44	1,23	2,63	1,66	0,66	6,47	1,19	1,20
1-2-1-3	1,69	44,64	1,57	2,78	1,80	0,80	5,84	0,81	1,54

Legenda: U – umidade, η – porosidade, ρ – massa específica, ρ_s – massa específica dos sólidos, ρ_{sat} – massa específica saturada, ρ_{sub} – massa específica submersa, S_r – grau de saturação, e – índice de vazios, ρ_d – massa específica aparente seca e amostra: S-L-A-R (Solo – Lodo – Água – Repetição).

6.1.2 Condutividade hidráulica de solo saturado

A condutividade hidráulica para solo saturado (k_0) a partir de cada tipo de mistura de solo com lodo se encontra no Quadro 4.

Quadro 4. Valores de k_0 obtidos a partir da mistura de solo com lodo.

Amostra	Unidade	K_0
2-1-1-1	cm.s ⁻¹	4,4361*10 ⁻²
2-2-2-6	cm.s ⁻¹	3,9177*10 ⁻²
1-1-1-1	cm.s ⁻¹	4,5271*10 ⁻²
1-3-1-8	cm.s ⁻¹	9,4313*10 ⁻³
1-2-1-5	cm.s ⁻¹	2,2918*10 ⁻²
2-3-2-7	cm.s ⁻¹	1,5303*10 ⁻²
2-1-1-2	cm.s ⁻¹	4,4361*10 ⁻²
2-2-2-4	cm.s ⁻¹	3,9177*10 ⁻²
1-1-1-2	cm.s ⁻¹	4,5271*10 ⁻²
1-3-1-9	cm.s ⁻¹	9,4313*10 ⁻³
1-2-1-6	cm.s ⁻¹	2,2918*10 ⁻²
2-3-2-8	cm.s ⁻¹	1,5303*10 ⁻²
2-1-1-3	cm.s ⁻¹	4,4361*10 ⁻²
2-2-2-5	cm.s ⁻¹	3,9177*10 ⁻²
1-1-1-3	cm.s ⁻¹	4,5271*10 ⁻²
1-3-1-7	cm.s ⁻¹	9,4313*10 ⁻³
1-2-1-4	cm.s ⁻¹	2,2918*10 ⁻²
2-3-2-9	cm.s ⁻¹	1,5303*10 ⁻²
2-1-1-7	cm.s ⁻¹	4,4361*10 ⁻²
2-2-2-1	cm.s ⁻¹	3,9177*10 ⁻²
1-1-2-4	cm.s ⁻¹	4,5271*10 ⁻²
1-3-2-4	cm.s ⁻¹	9,4313*10 ⁻³
1-2-1-1	cm.s ⁻¹	2,2918*10 ⁻²
2-3-1-7	cm.s ⁻¹	1,5303*10 ⁻²
2-1-1-8	cm.s ⁻¹	4,4361*10 ⁻²

2-2-2-2	cm.s ⁻¹	3,9177*10 ⁻²
1-1-2-5	cm.s ⁻¹	4,5271*10 ⁻²
1-3-2-5	cm.s ⁻¹	9,4313*10 ⁻³
1-2-1-2	cm.s ⁻¹	2,2918*10 ⁻²
2-3-1-8	cm.s ⁻¹	1,5303*10 ⁻²
2-1-1-9	cm.s ⁻¹	4,4361*10 ⁻²
2-2-2-3	cm.s ⁻¹	3,9177*10 ⁻²
1-1-2-6	cm.s ⁻¹	4,5271*10 ⁻²
1-3-2-6	cm.s ⁻¹	9,4313*10 ⁻³
1-2-1-3	cm.s ⁻¹	2,2918*10 ⁻²
2-3-1-9	cm.s ⁻¹	1,5303*10 ⁻²

Legenda: amostra: S-L-A-R. (Solo – Lodo – Água – Repetição).

6.1.3 Curva de retenção de água no solo

As Figuras de 12 a 47 apresentam as curvas de retenção de água no solo para cada mistura.

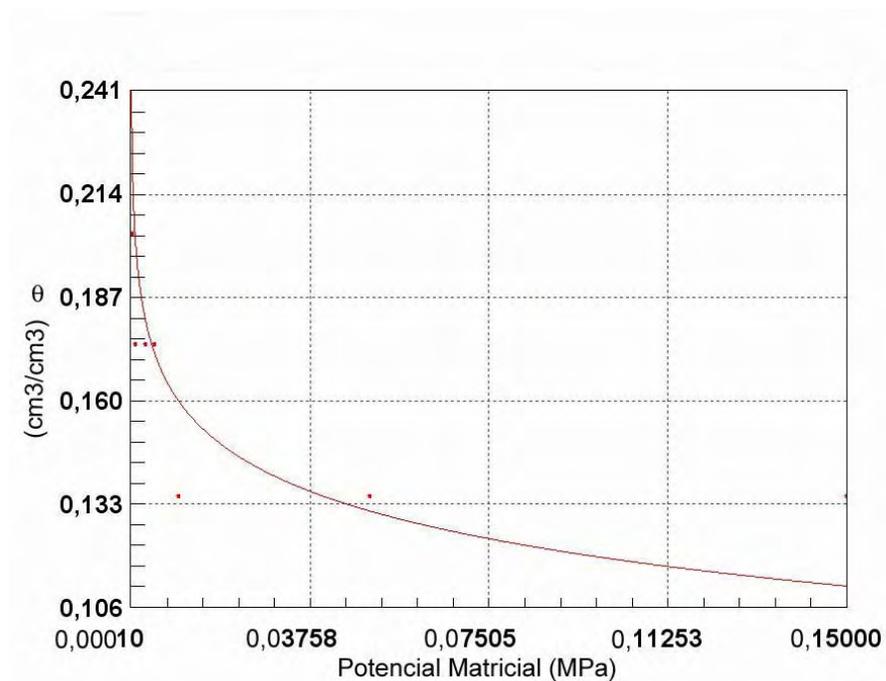


Figura 12. Curva de retenção de água no solo da amostra 1-1-1-1.

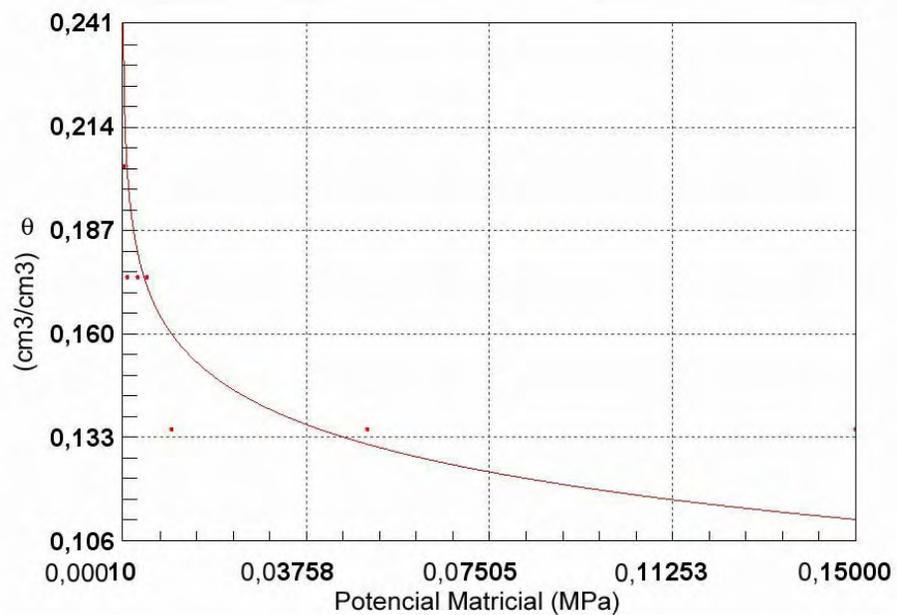


Figura 13. Curva de retenção de água no solo da amostra 1-1-1-2.

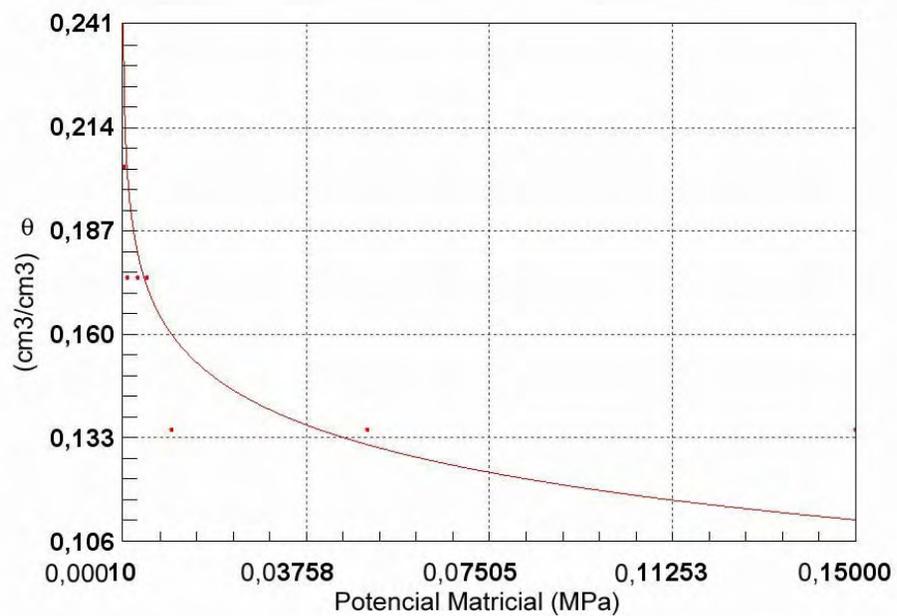


Figura 14. Curva de retenção de água no solo da amostra 1-1-1-3.

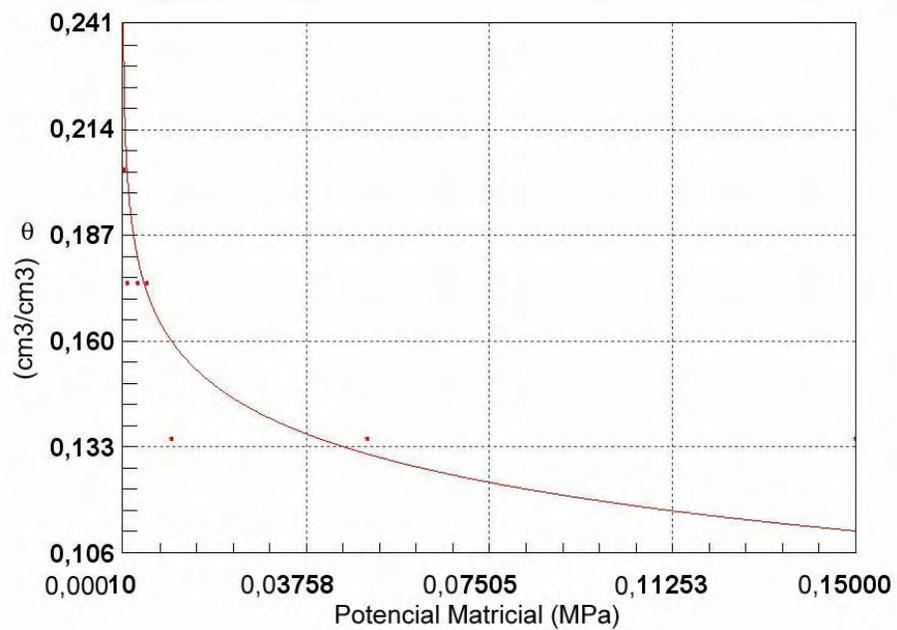


Figura 15. Curva de retenção de água no solo da amostra 1-1-2-4.

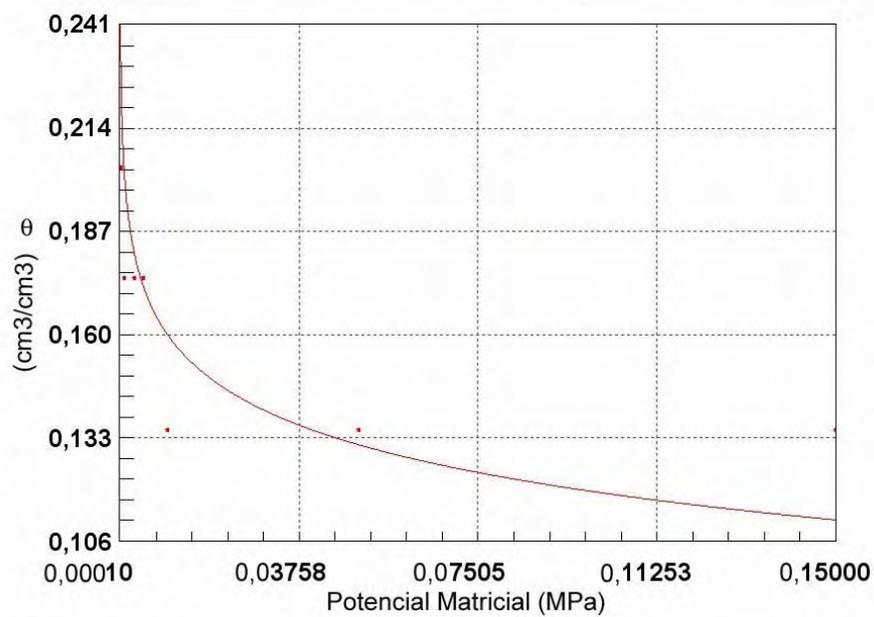


Figura 16. Curva de retenção de água no solo da amostra 1-1-2-5.

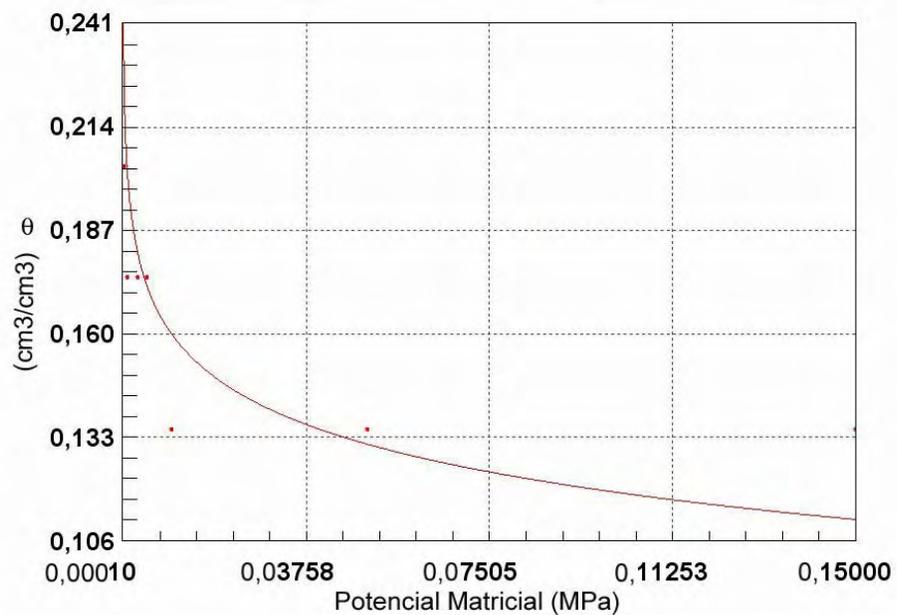


Figura 17. Curva de retenção de água no solo da amostra 1-1-2-6.

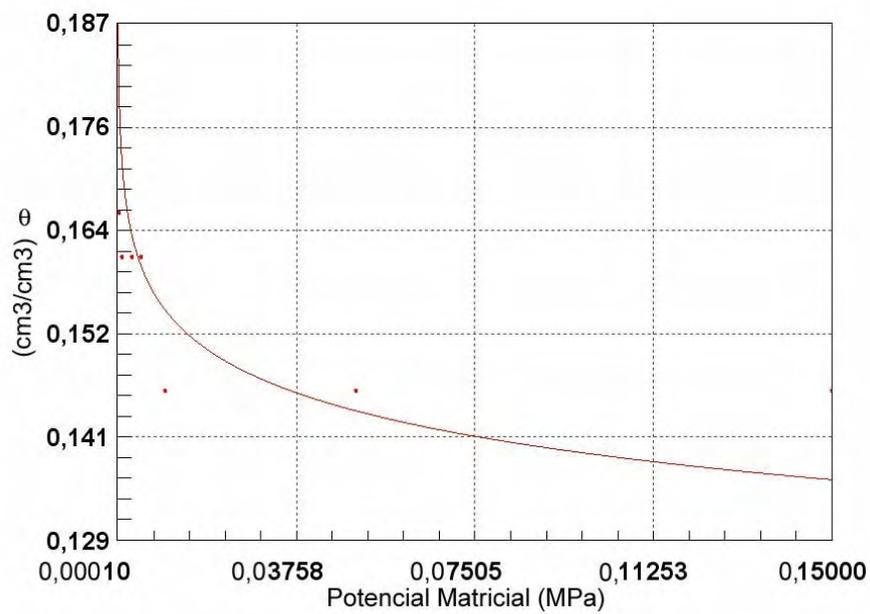


Figura 18. Curva de retenção de água no solo da amostra 1-2-1-1.

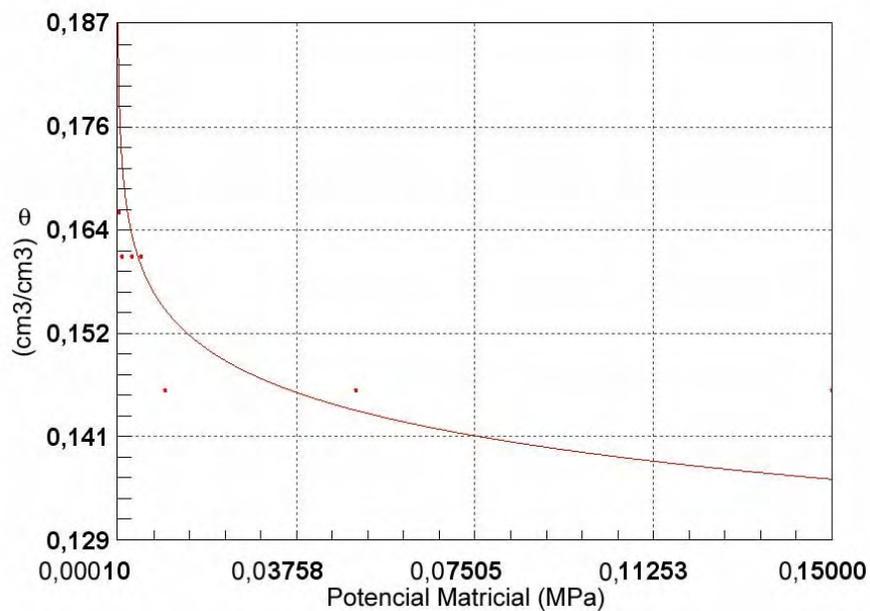


Figura 19. Curva de retenção de água no solo da amostra 1-2-1-2.

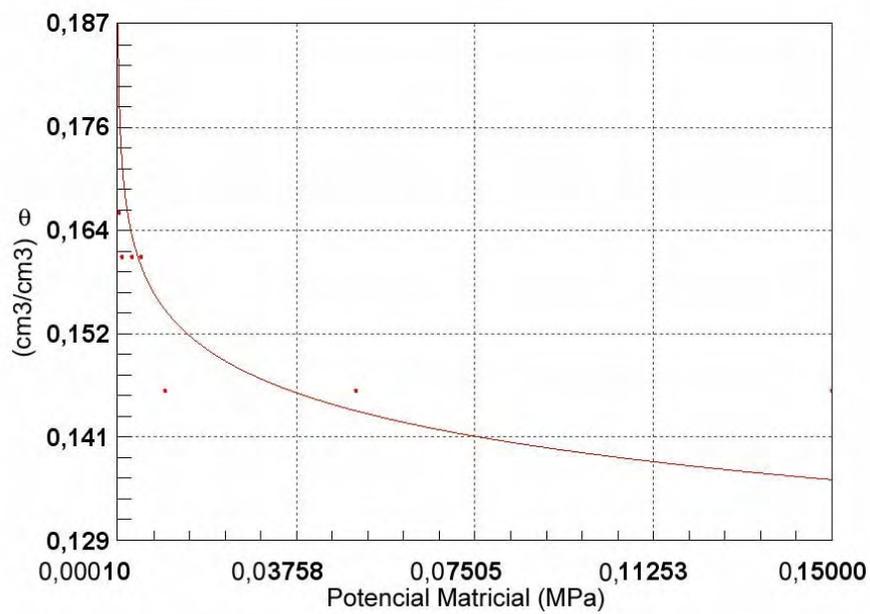


Figura 20. Curva de retenção de água no solo da amostra 1-2-1-3.

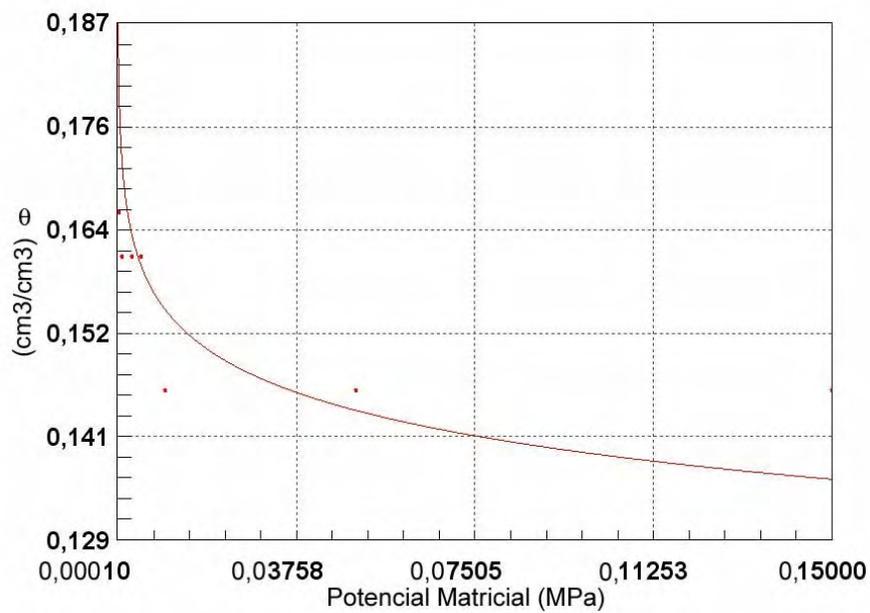


Figura 21. Curva de retenção de água no solo da amostra 1-2-1-4.

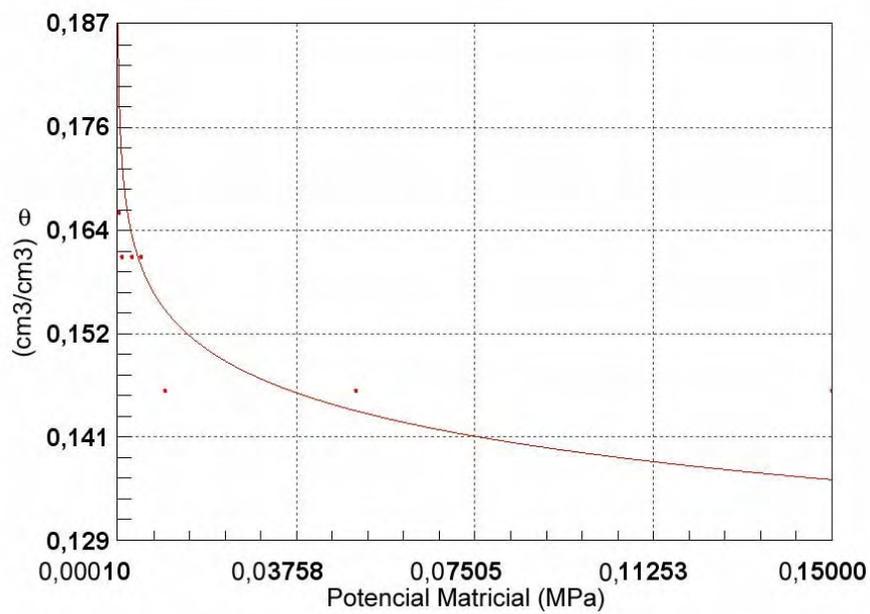


Figura 22. Curva de retenção de água no solo da amostra 1-2-1-5.

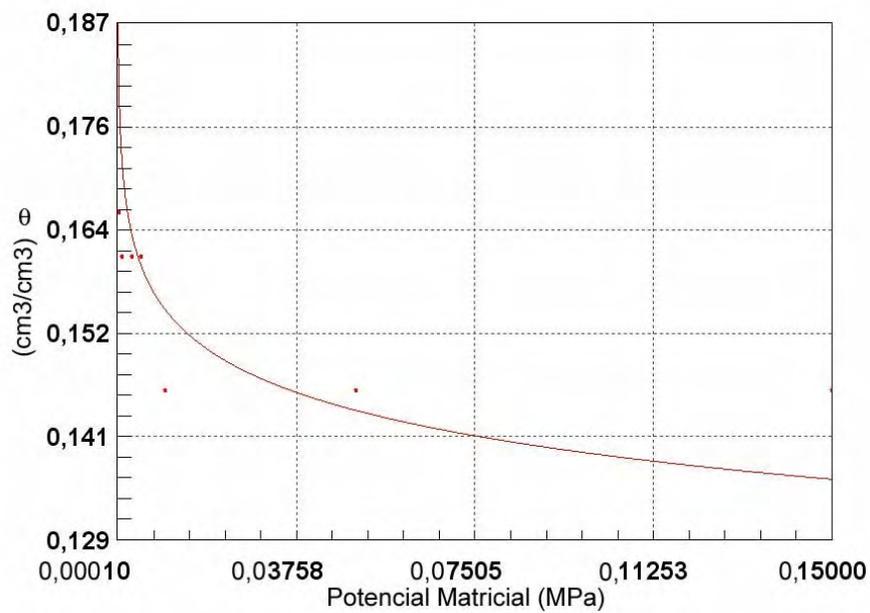


Figura 23. Curva de retenção de água no solo da amostra 1-2-1-6.

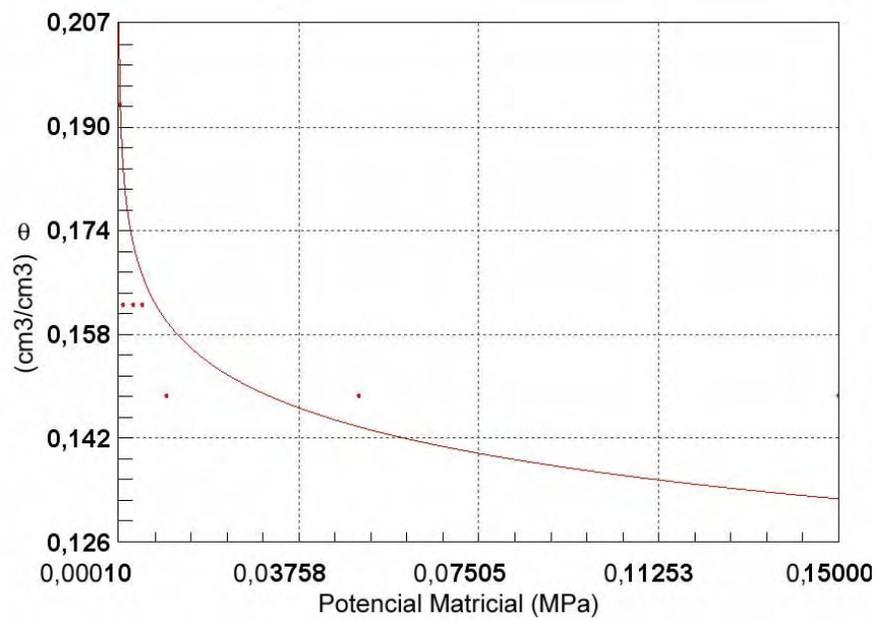


Figura 24. Curva de retenção de água no solo da amostra 1-3-1-7.

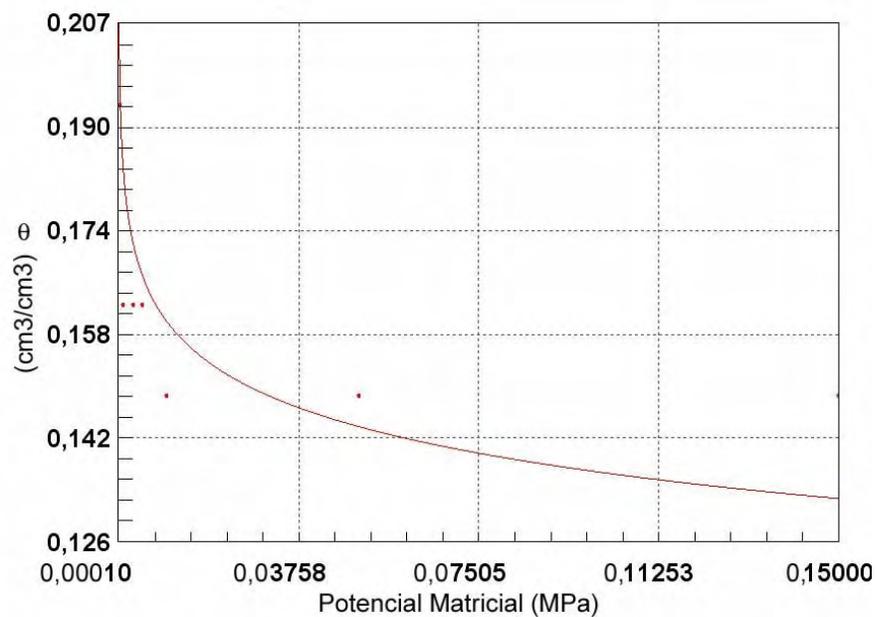


Figura 25. Curva de retenção de água no solo da amostra 1-3-1-8.

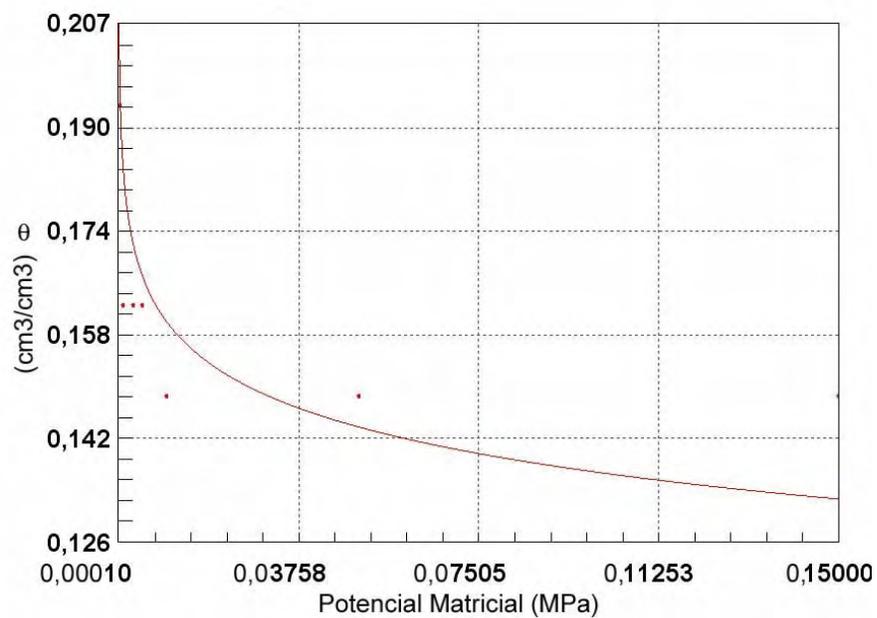


Figura 26. Curva de retenção de água no solo da amostra 1-3-1-9.

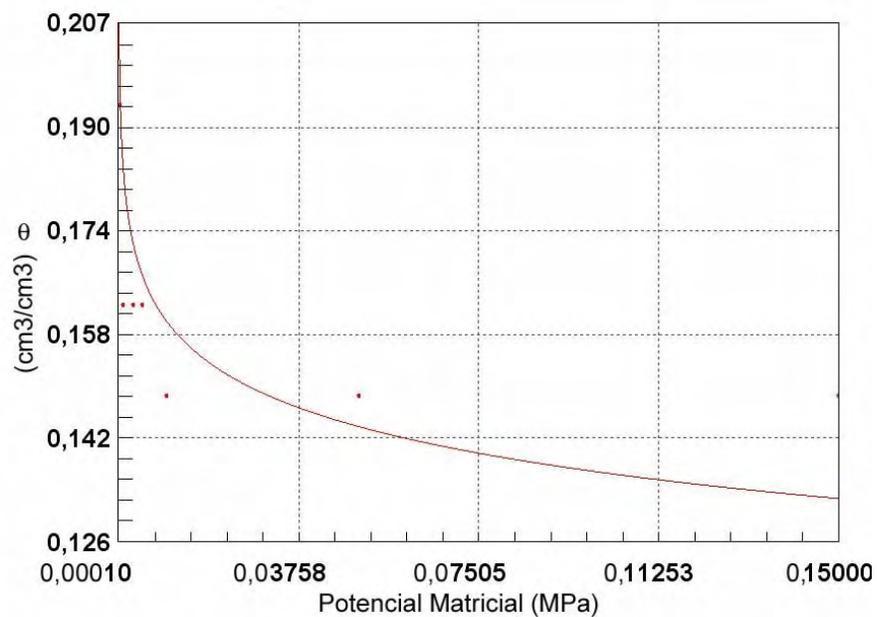


Figura 27. Curva de retenção de água no solo da amostra 1-3-2-4.

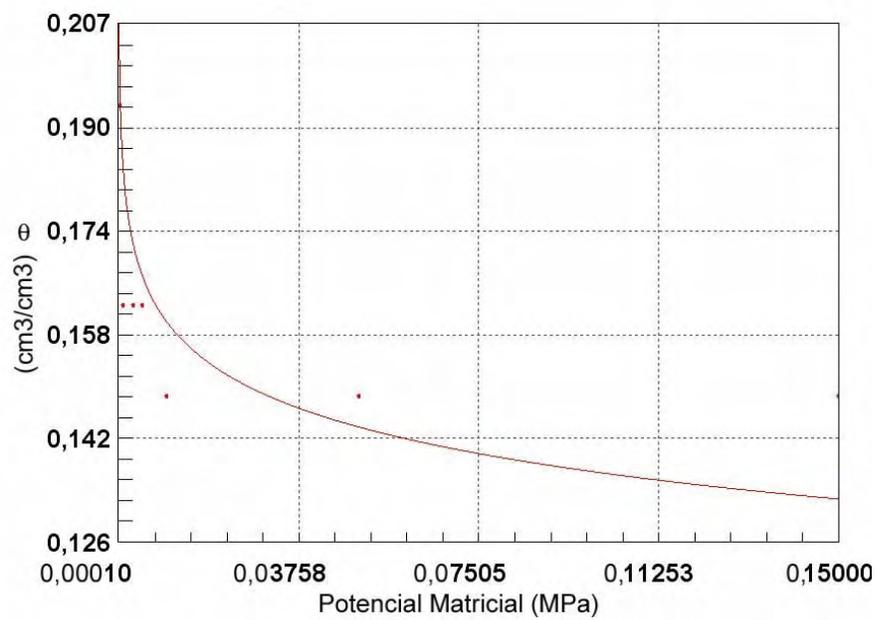


Figura 28. Curva de retenção de água no solo da amostra 1-3-2-5.

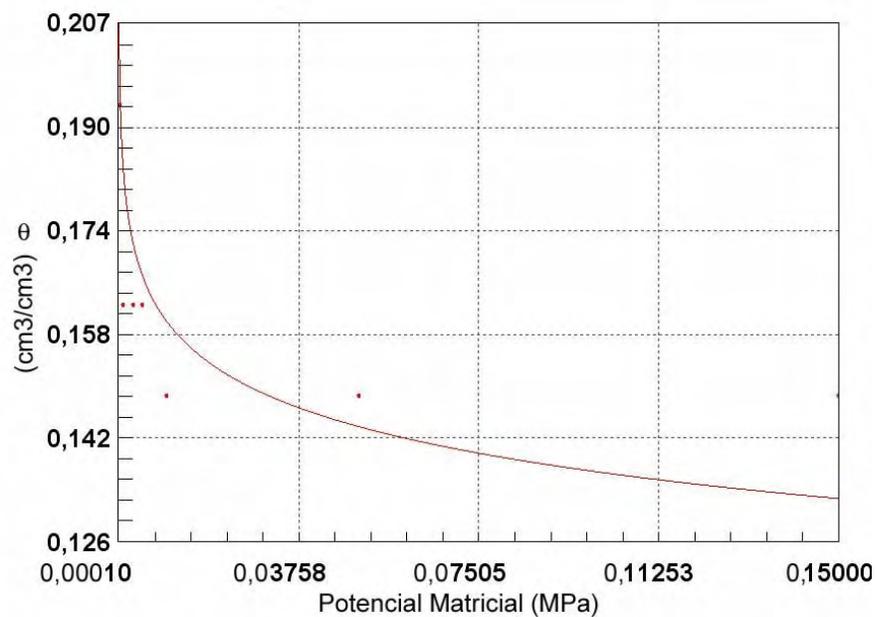


Figura 29. Curva de retenção de água no solo da amostra 1-3-2-6.

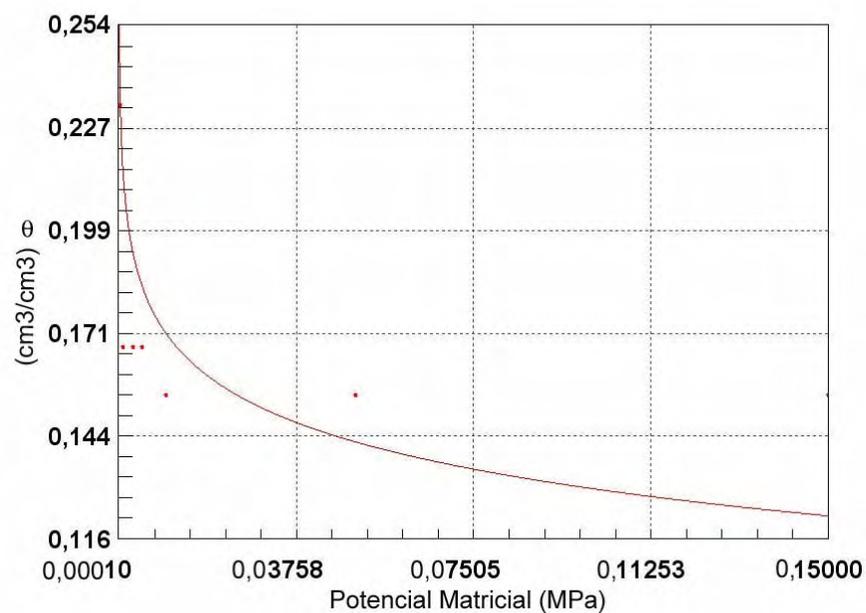


Figura 30. Curva de retenção de água no solo da amostra 2-1-1-1.

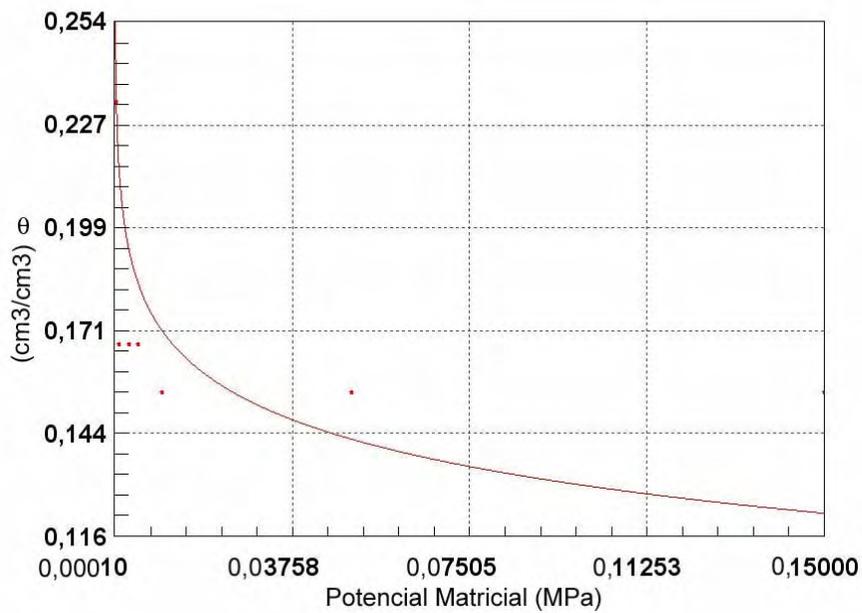


Figura 31. Curva de retenção de água no solo da amostra 2-1-1-2.

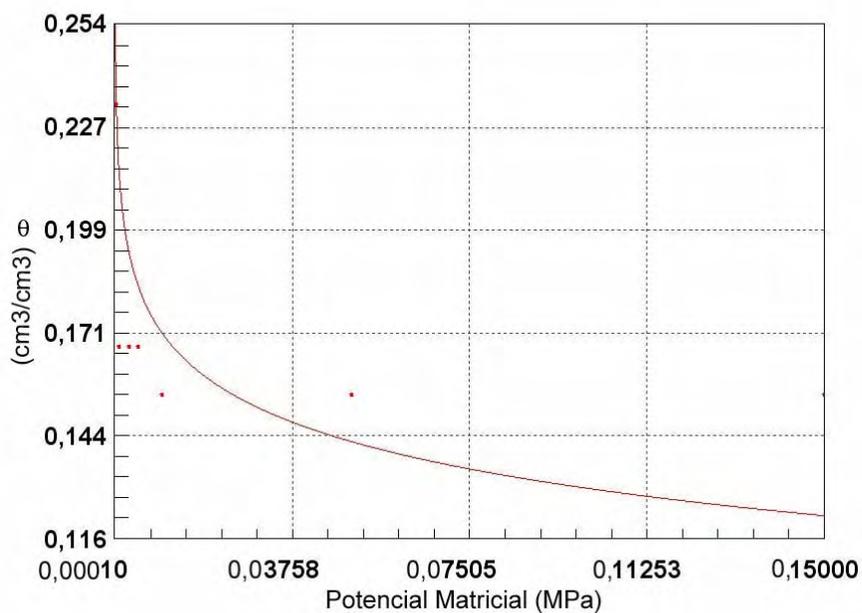


Figura 32. Curva de retenção de água no solo da amostra 2-1-1-3.

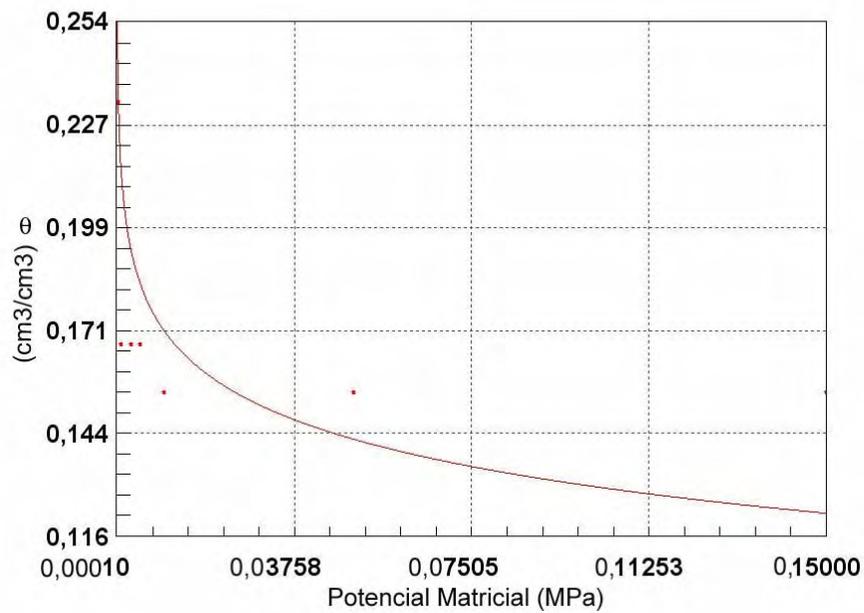


Figura 33. Curva de retenção de água no solo da amostra 2-1-1-7.

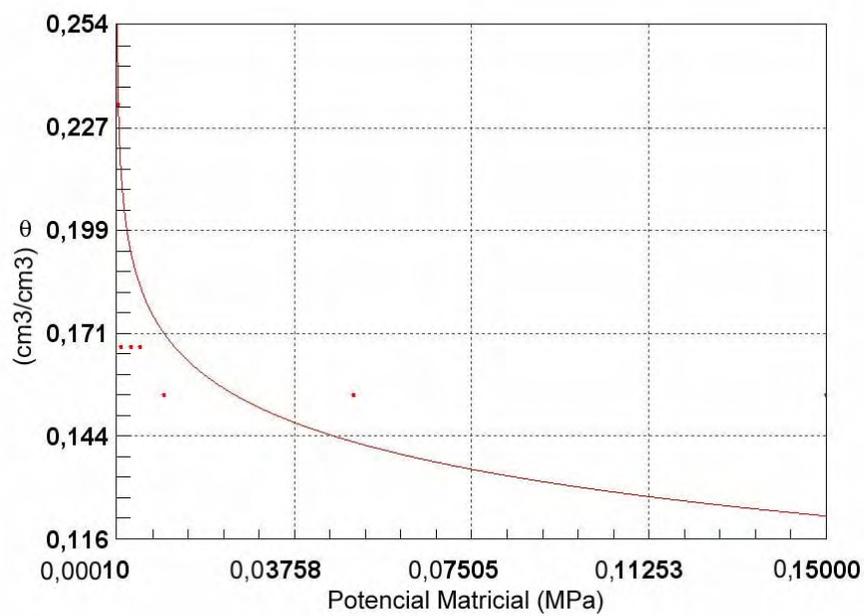


Figura 34. Curva de retenção de água no solo da amostra 2-1-1-8.

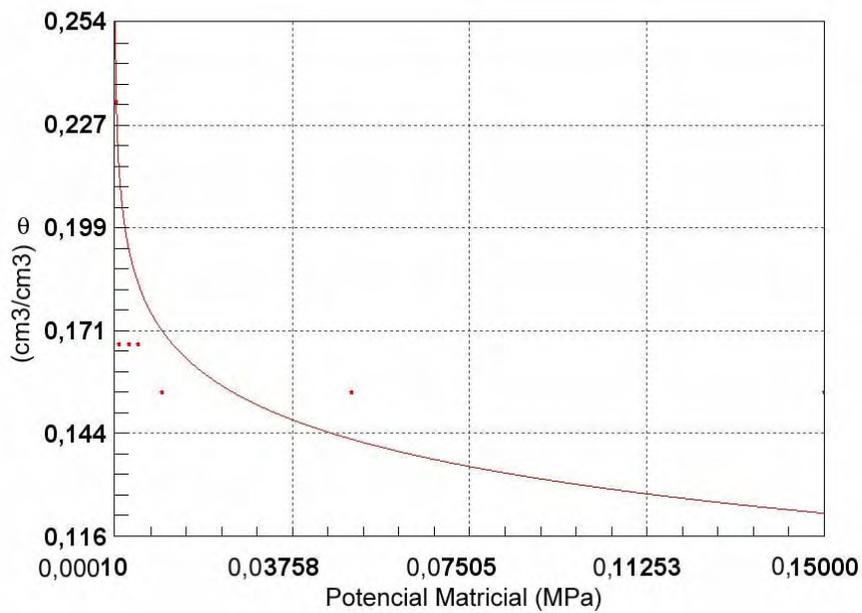


Figura 35. Curva de retenção de água no solo da amostra 2-1-1-9.

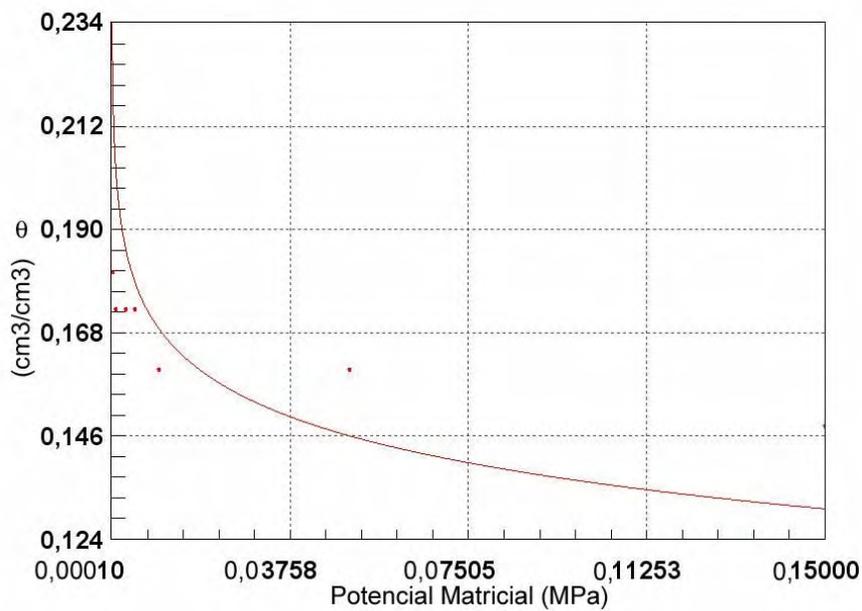


Figura 36. Curva de retenção de água no solo da amostra 2-2-2-1.

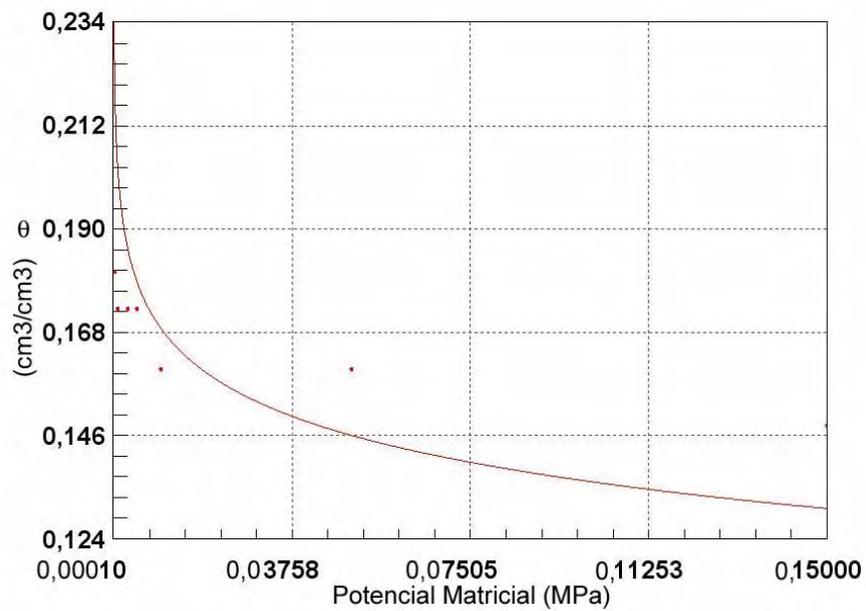


Figura 39. Curva de retenção de água no solo da amostra 2-2-2-4.

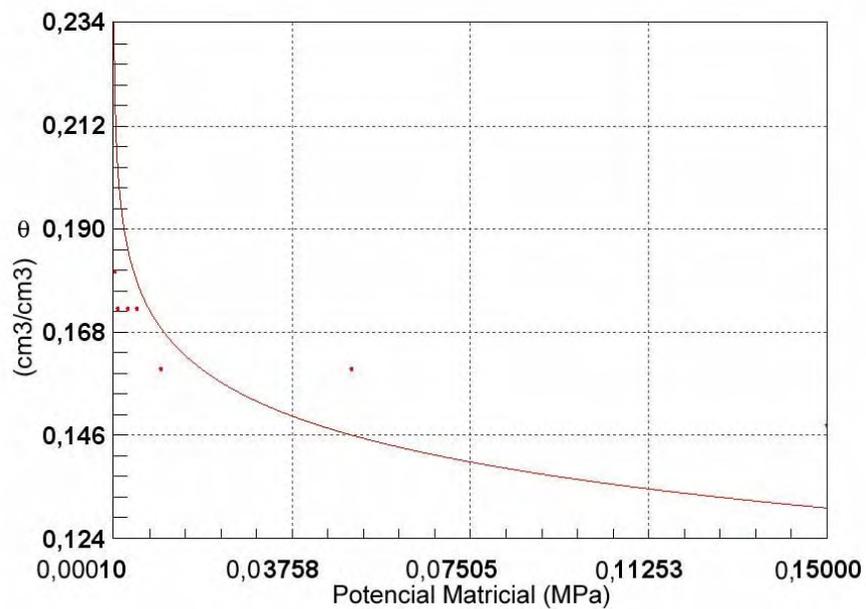


Figura 40. Curva de retenção de água no solo da amostra 2-2-2-5.

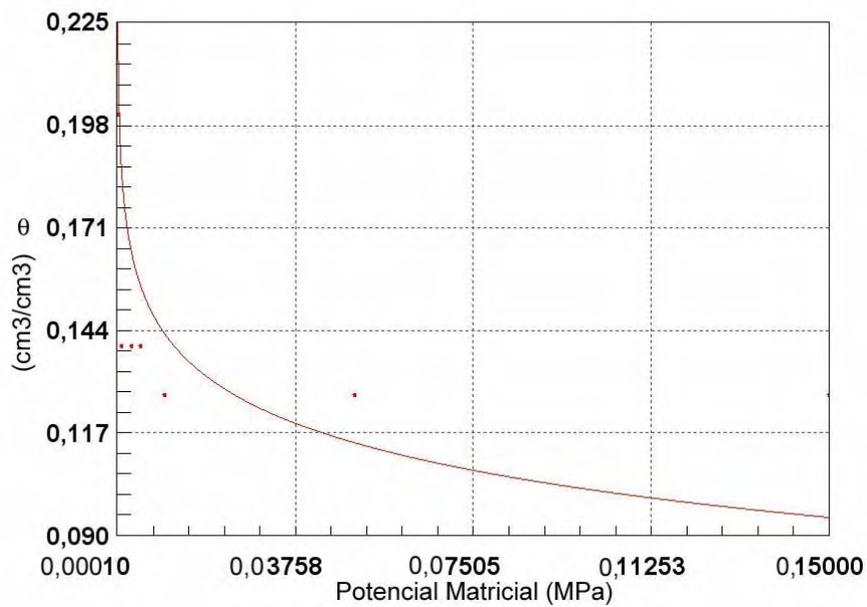


Figura 43. Curva de retenção de água no solo da amostra 2-3-1-8.

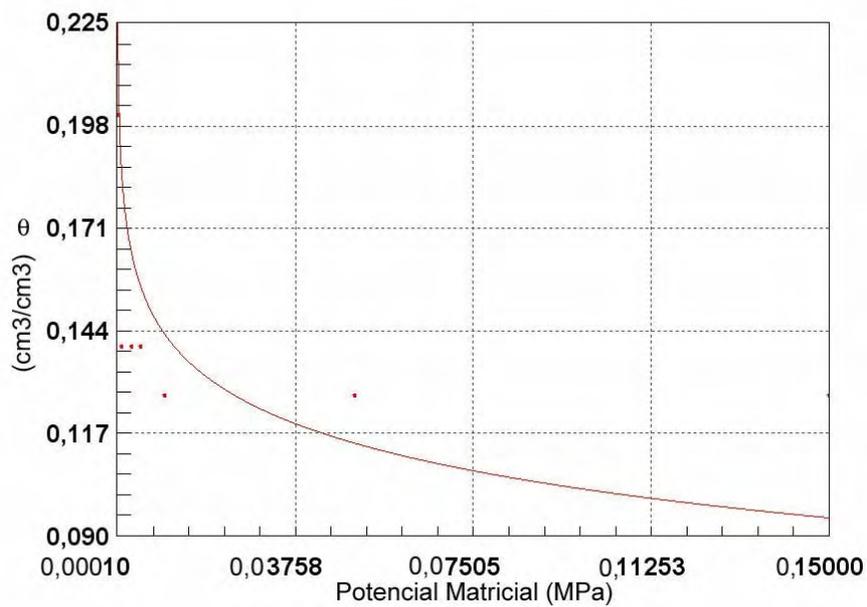


Figura 44. Curva de retenção de água no solo da amostra 2-3-1-9.

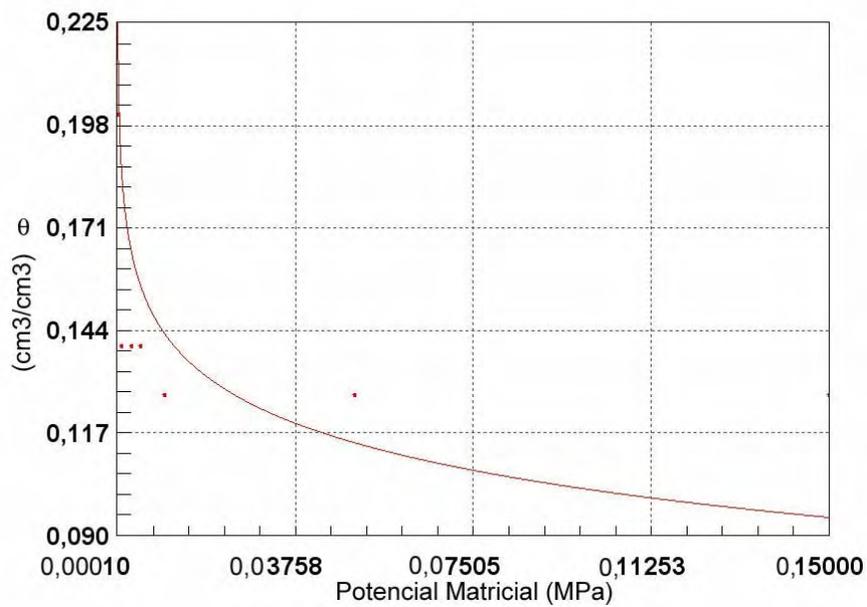


Figura 45. Curva de retenção de água no solo da amostra 2-3-2-7.

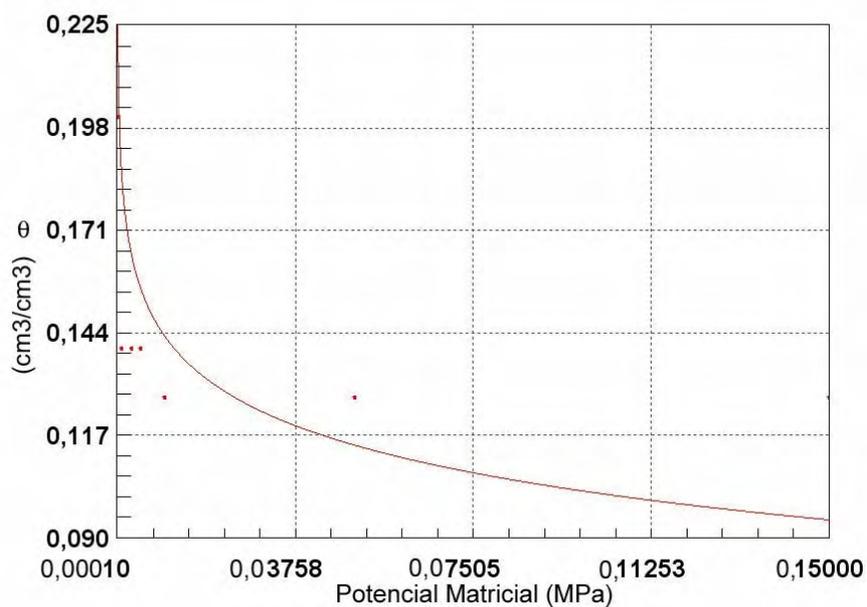


Figura 46. Curva de retenção de água no solo da amostra 2-3-2-8.

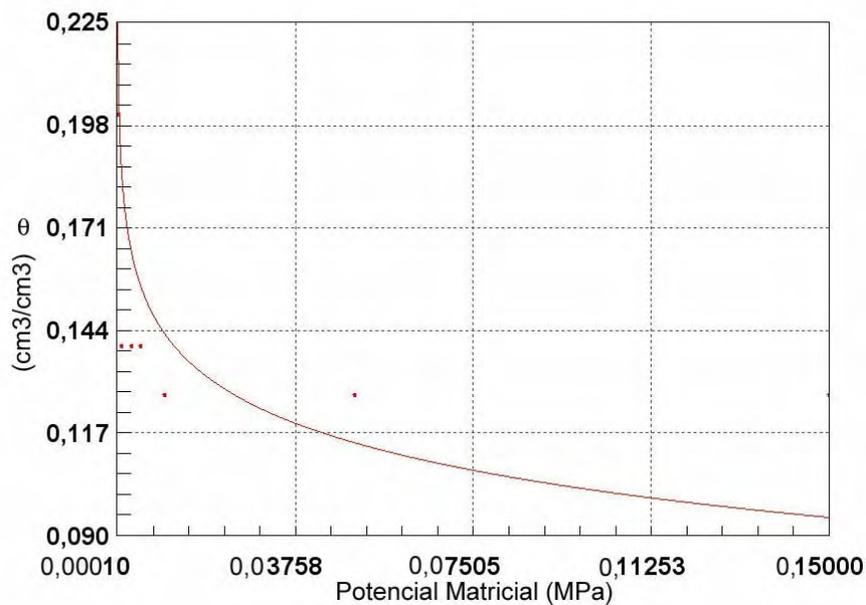


Figura 47. Curva de retenção de água no solo da amostra 2-3-2-9.

6.2 Segunda época de amostragem

A segunda época de amostragem corresponde ao período de quarenta e cinco dias após o início do experimento, ou seja, uma parcela das amostras foi irrigada com água residuária, enquanto que a outra foi irrigada com água tratada pela SABESP. Essas amostras coletadas nesse período foram denominadas de 2º época de amostragem.

A seguir encontram-se os resultados obtidos para a segunda época de amostragem.

6.2.1 Índices físicos

Os índices físicos para cada tipo de mistura de solo com lodo se encontram no Quadro 5.

Quadro 5. Índices físicos obtidos para a segunda época de amostragem.

Amostra	U (%)	η (%)	ρ (g.cm ⁻³)	ρ_s (g.cm ⁻³)	ρ_{sat} (g.cm ⁻³)	ρ_{sub} (g.cm ⁻³)	S _r (%)	e	ρ_d (g.cm ⁻³)
1-1-2-2	5,56	59,87	1,01	2,38	1,26	0,26	8,86	1,49	0,96
2-1-2-8	2,08	55,78	1,07	2,38	1,52	0,52	3,93	1,26	1,05
2-1-1-5	8,57	62,86	1,01	2,50	1,51	0,51	12,66	1,69	0,93
2-2-1-2	6,41	60,66	1,10	2,63	1,57	0,57	10,93	1,54	1,03
2-2-2-7	2,94	54,44	1,23	2,63	1,66	0,66	6,47	1,19	1,20
2-1-2-9	9,09	66,71	0,96	2,63	1,19	0,19	11,93	2,00	0,88
1-1-2-7	6,67	60,21	1,06	2,50	1,38	0,38	11,02	1,51	0,99
1-3-2-3	1,75	46,91	1,42	2,63	1,89	0,89	4,88	0,88	1,40
2-2-2-9	2,94	54,44	1,23	2,63	1,66	0,66	6,47	1,19	1,20
1-1-2-8	1,75	22,09	1,42	1,79	1,80	0,80	11,08	0,28	1,39
1-1-2-1	6,67	60,21	1,06	2,50	1,38	0,38	11,02	1,51	0,99
2-1-1-4	3,47	53,78	1,02	2,50	1,38	0,38	12,77	1,65	0,94
1-1-2-9	1,75	22,09	1,42	1,79	1,80	0,80	11,08	0,28	1,39
2-2-2-8	2,94	54,44	1,23	2,63	1,66	0,66	6,47	1,19	1,20
1-2-2-3	3,45	53,84	1,19	2,50	1,45	0,45	7,39	1,17	1,15
2-3-1-1	13,25	60,40	1,25	2,50	1,51	0,51	24,16	1,53	1,10
2-2-1-1	7,32	58,64	1,17	2,63	1,57	0,57	13,57	1,42	1,09
1-3-2-2	2,20	51,72	1,23	2,50	1,32	0,32	5,13	1,07	1,21
1-2-1-8	2,27	58,01	1,19	2,78	1,26	0,26	4,57	1,38	1,17
2-3-1-6	10,00	59,65	1,17	2,63	1,38	0,38	17,79	1,48	1,06
1-3-2-1	4,44	54,61	1,25	2,63	1,45	0,45	9,72	1,20	1,40
2-3-1-5	7,32	58,64	1,17	2,63	1,63	0,63	13,57	1,42	1,09
1-2-1-7	2,08	54,20	1,30	2,78	1,38	0,38	4,90	1,18	1,27
2-2-1-3	7,50	61,83	1,14	2,78	1,51	0,51	12,87	1,62	1,06
1-3-1-4	3,37	55,11	1,22	2,63	1,26	0,26	7,22	1,23	1,18
2-1-1-6	3,37	52,78	1,22	2,50	1,26	0,26	7,54	1,12	1,18
2-3-1-3	16,25	57,55	1,23	2,50	1,57	0,57	29,96	1,36	1,06

1-2-1-9	14,63	56,49	1,25	2,50	1,45	0,45	28,18	1,30	1,09
1-3-1-6	13,64	55,62	1,33	2,63	1,38	0,38	28,62	1,25	1,17
2-3-1-2	1,33	13,64	58,01	2,78	1,57	0,57	27,44	1,38	1,17
2-3-1-4	13,25	60,40	1,25	2,50	1,45	0,45	7,39	1,17	1,15
1-2-2-2	11,83	55,63	1,38	2,78	1,45	0,45	26,23	1,25	1,23
2-1-2-7	9,09	66,71	0,96	2,63	1,19	0,19	11,93	2,00	0,88
1-1-2-3	1,75	22,09	1,42	1,79	1,80	0,80	11,08	0,28	1,39
1-3-1-5	4,49	52,78	1,23	2,50	1,26	0,26	10,05	1,12	1,18
1-2-2-1	3,45	53,84	1,19	2,50	1,45	0,45	7,39	1,17	1,15

Legenda: U – umidade, η – porosidade, ρ – massa específica, ρ_s – massa específica dos sólidos, ρ_{sat} – massa específica saturada, ρ_{sub} – massa específica submersa, S_r – grau de saturação, e – índice de vazios, ρ_a – massa específica aparente seca e amostra: S-L-A-R. (Solo – Lodo – Água – Repetição).

6.2.2 Condutividade hidráulica de solo saturado

A condutividade hidráulica para solo saturado (k_0) a partir de cada tipo de mistura de solo com lodo se encontra no Quadro 6.

Quadro 6. Valores de k_0 obtidos a partir da mistura de solo com lodo.

Amostra	Unidade	K_0
1-2-2-2	cm.s ⁻¹	7,5688*10 ⁻²
2-3-1-3	cm.s ⁻¹	8,2940*10 ⁻³
1-2-2-1	cm.s ⁻¹	4,5910*10 ⁻³
2-3-1-4	cm.s ⁻¹	2,9243*10 ⁻²
2-1-2-8	cm.s ⁻¹	3,1280*10 ⁻²
2-1-2-9	cm.s ⁻¹	2,3118*10 ⁻²
1-1-2-7	cm.s ⁻¹	1,8789*10 ⁻²
1-1-2-9	cm.s ⁻¹	6,3300*10 ⁻²
1-2-1-9	cm.s ⁻¹	9,8980*10 ⁻³
2-1-2-7	cm.s ⁻¹	8,4965*10 ⁻²
1-2-2-3	cm.s ⁻¹	6,8865*10 ⁻²
1-3-2-3	cm.s ⁻¹	6,0290*10 ⁻³
1-3-1-5	cm.s ⁻¹	1,22563*10 ⁻¹
1-1-2-1	cm.s ⁻¹	8,2638*10 ⁻²
1-3-1-4	cm.s ⁻¹	2,14486*10 ⁻¹
1-1-2-3	cm.s ⁻¹	1,19734*10 ⁻¹

1-1-2-2	cm.s ⁻¹	2,22547*10 ⁻²
1-3-1-6	cm.s ⁻¹	1,1052*10 ⁻²
2-1-1-4	cm.s ⁻¹	1,9614*10 ⁻²
1-3-2-1	cm.s ⁻¹	2,0163*10 ⁻²
1-3-2-2	cm.s ⁻¹	2,2547*10 ⁻²
2-2-1-1	cm.s ⁻¹	6,7438*10 ⁻³
2-1-2-9	cm.s ⁻¹	7,5040*10 ⁻²
1-2-1-8	cm.s ⁻¹	4,3104*10 ⁻²
2-3-1-6	cm.s ⁻¹	3,6120*10 ⁻²
2-2-2-8	cm.s ⁻¹	1,1677*10 ⁻²
2-1-1-6	cm.s ⁻¹	8,6454*10 ⁻²
2-3-1-5	cm.s ⁻¹	3,3093*10 ⁻²
2-3-1-1	cm.s ⁻¹	9,9553*10 ⁻²
1-2-1-7	cm.s ⁻¹	6,4040*10 ⁻²
2-3-1-2	cm.s ⁻¹	5,5758*10 ⁻²
2-2-2-7	cm.s ⁻¹	1,05896*10 ⁻¹
2-2-1-2	cm.s ⁻¹	2,2523*10 ⁻²
2-2-1-3	cm.s ⁻¹	1,13582*10 ⁻¹
2-1-1-5	cm.s ⁻¹	3,8773*10 ⁻²
1-1-2-8	cm.s ⁻¹	2,6947*10 ⁻²

Legenda: amostra: S-L-A-R. (Solo – Lodo – Água – Repetição).

6.2.3 Curva de retenção de água no solo

As Figuras de 48 a 83 apresentam as curvas de retenção de água no solo para cada mistura.

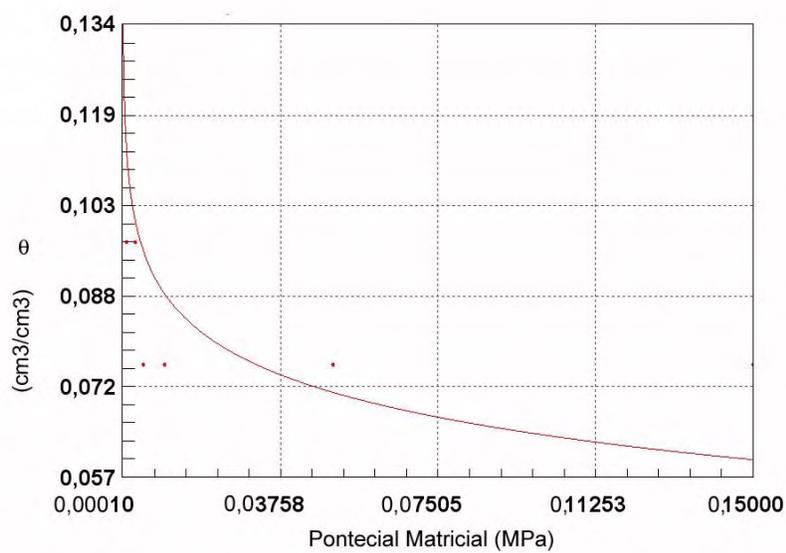


Figura 48. Curva de retenção de água no solo da amostra 1-1-2-1.

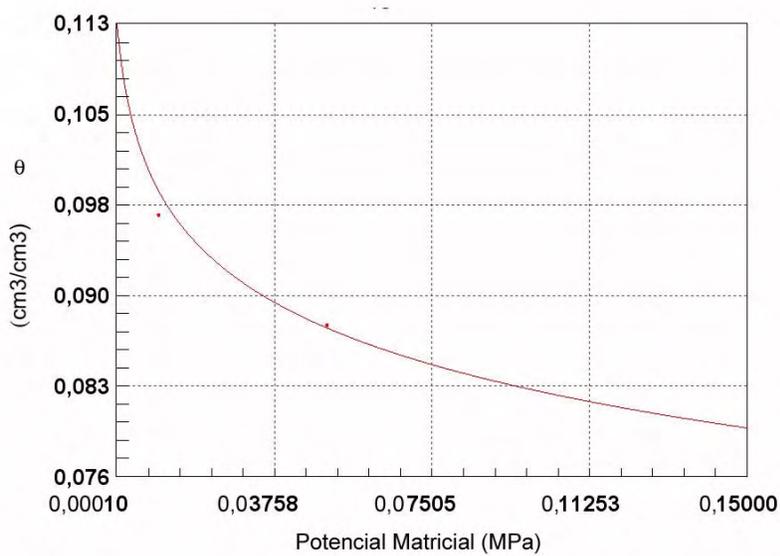


Figura 49. Curva de retenção de água no solo da amostra 1-1-2-2.

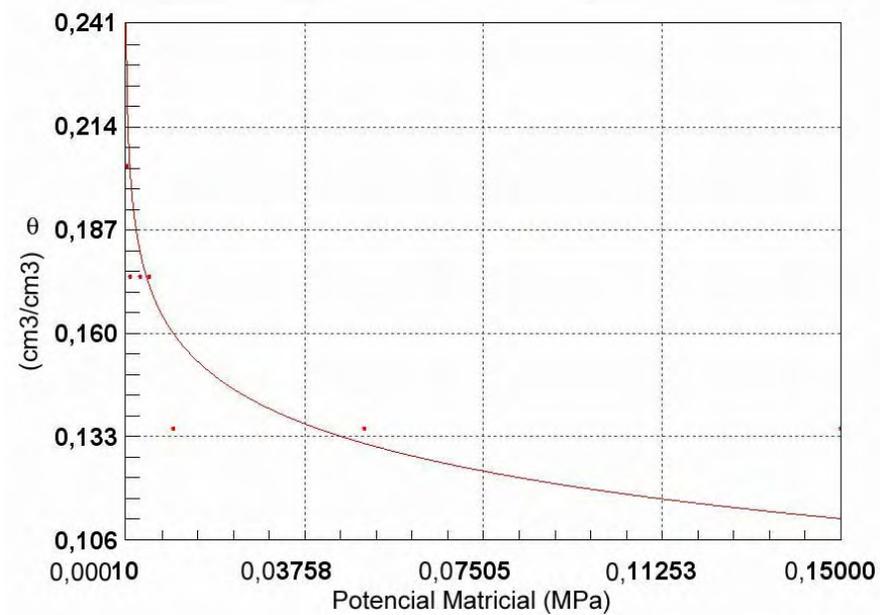


Figura 50. Curva de retenção de água no solo da amostra 1-1-2-3.

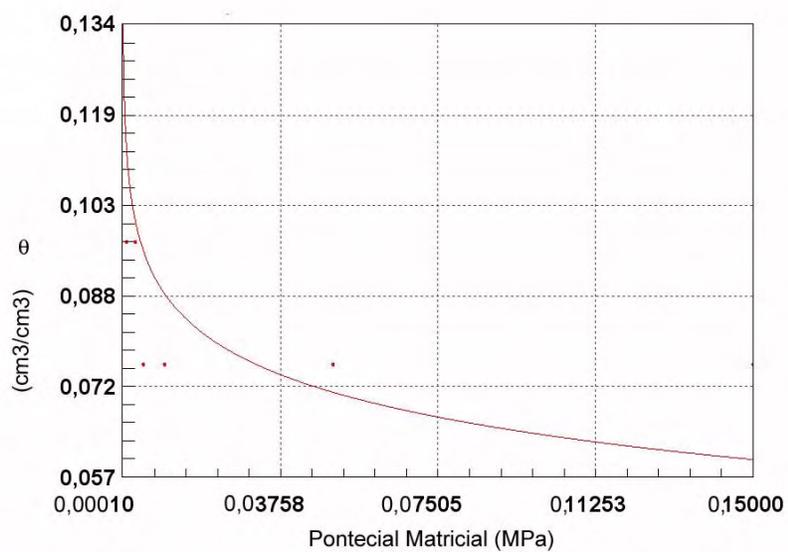


Figura 51. Curva de retenção de água no solo da amostra 1-1-2-7.

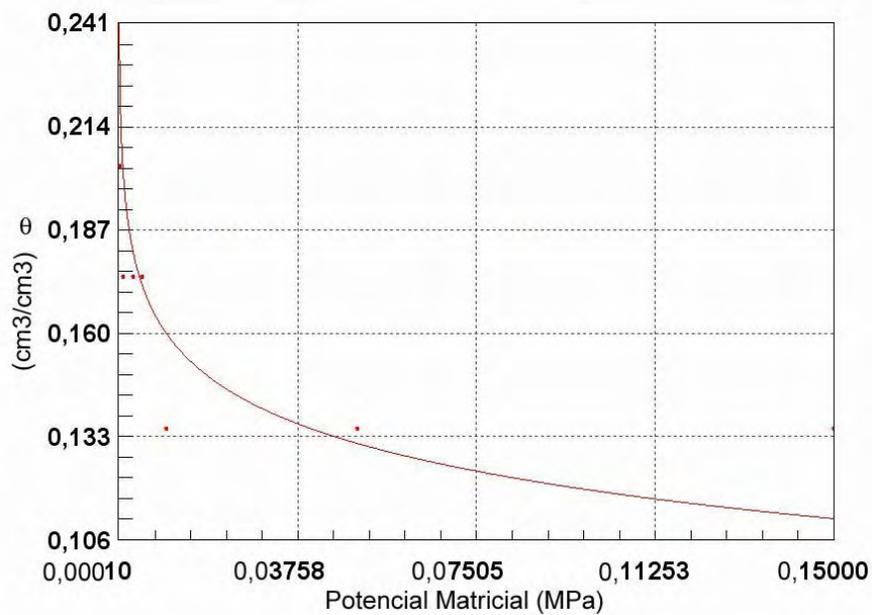


Figura 52. Curva de retenção de água no solo da amostra 1-1-2-8.

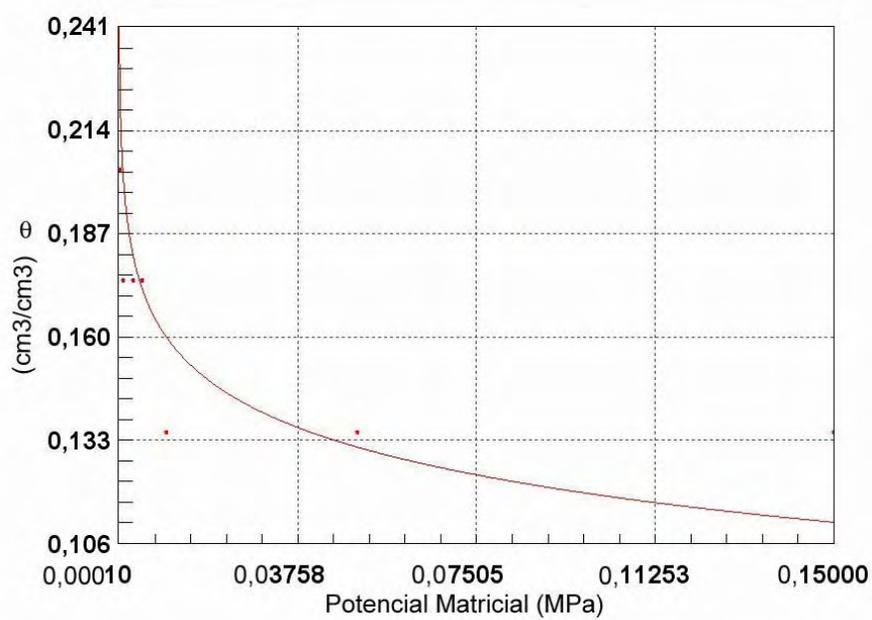


Figura 53. Curva de retenção de água no solo da amostra 1-1-2-9.

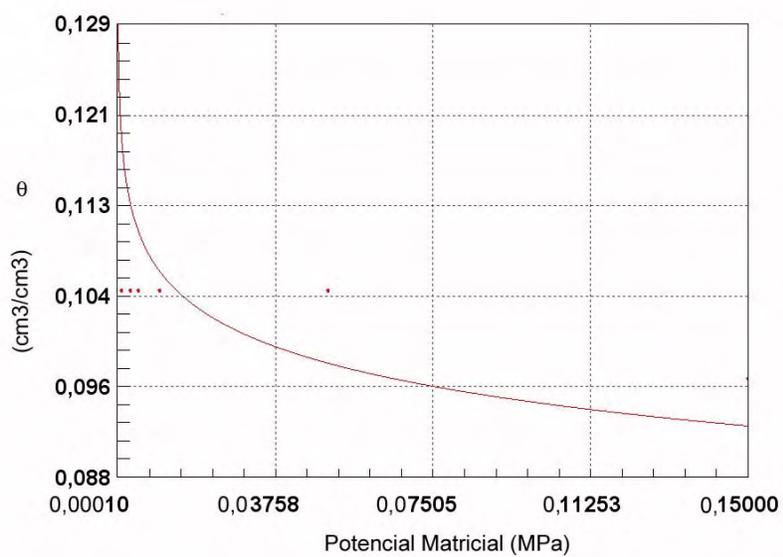


Figura 54. Curva de retenção de água no solo da amostra 1-2-1-7.

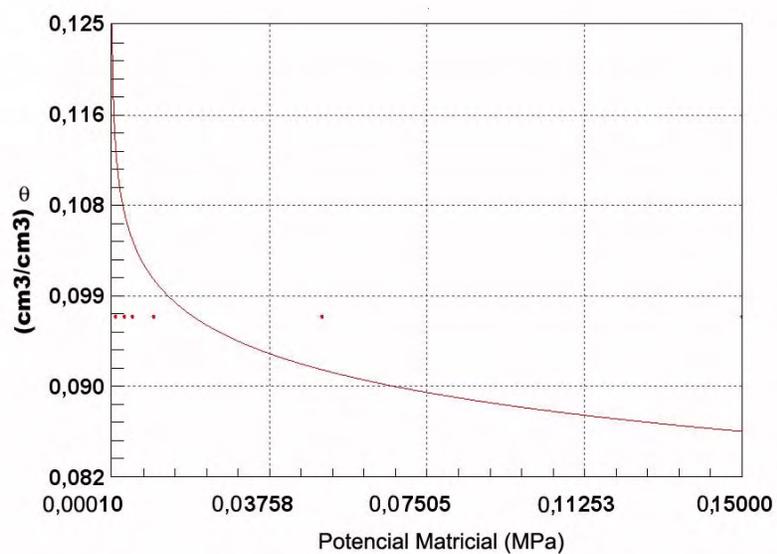


Figura 55. Curva de retenção de água no solo da amostra 1-2-1-8.

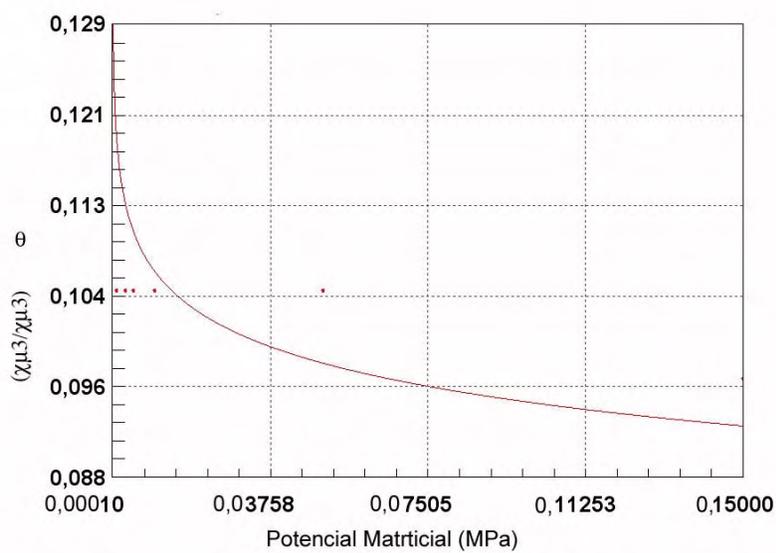


Figura 56. Curva de retenção de água no solo da amostra 1-2-1-9.

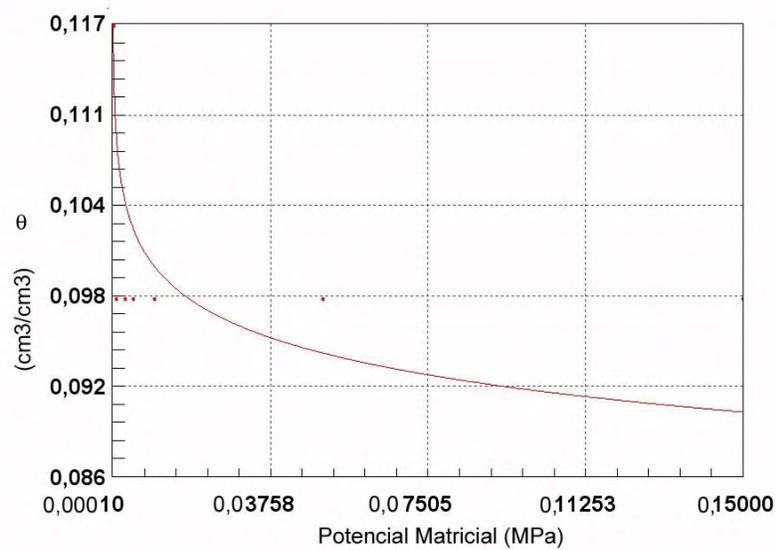


Figura 57. Curva de retenção de água no solo da amostra 1-2-2-1.

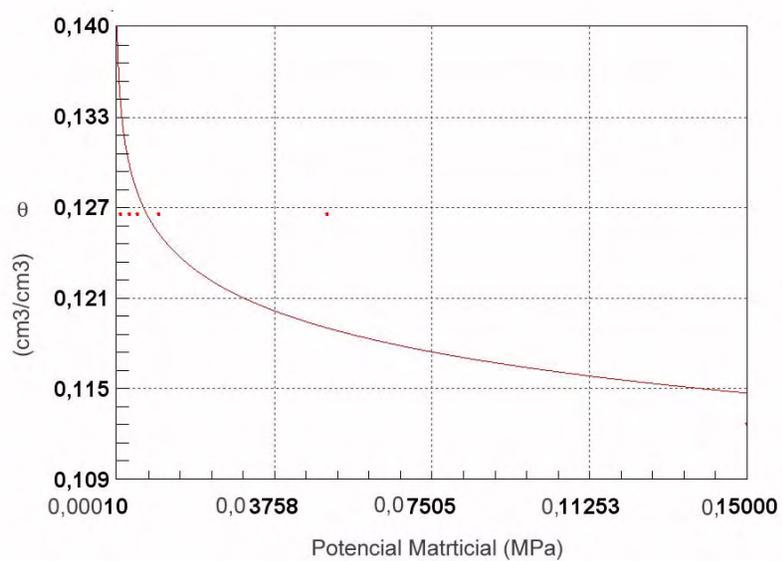


Figura 58. Curva de retenção de água no solo da amostra 1-2-2-2.

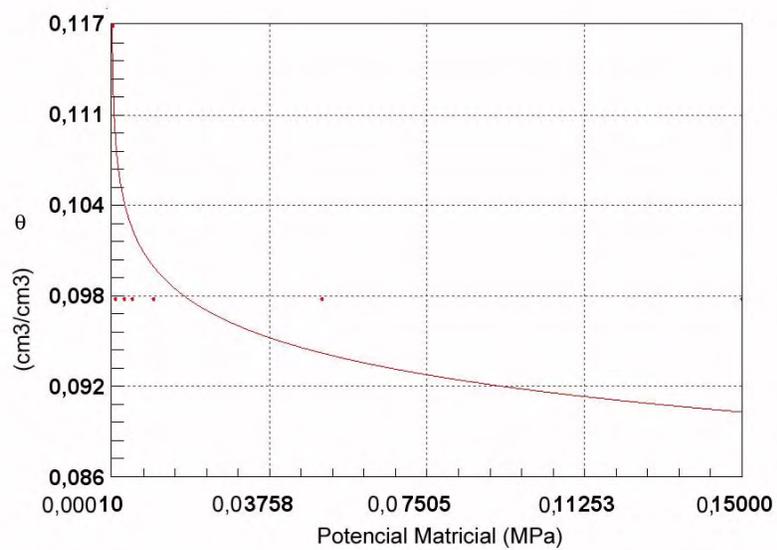


Figura 59. Curva de retenção de água no solo da amostra 1-2-2-3.

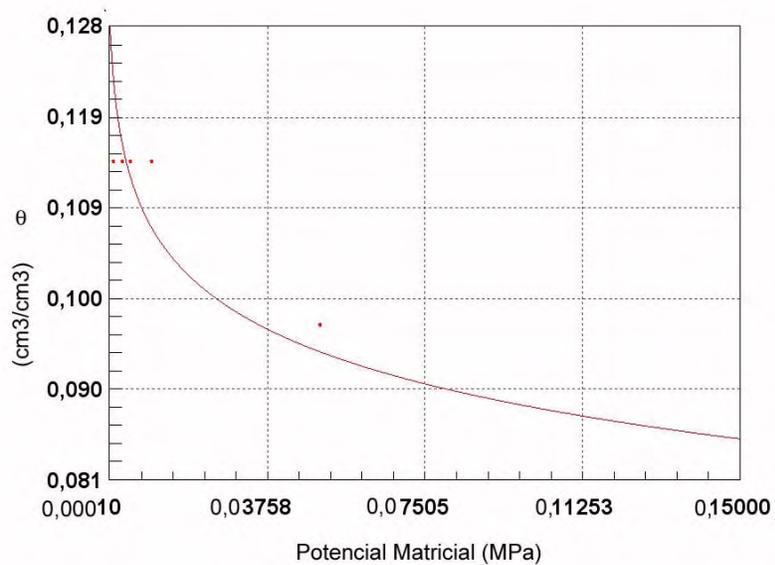


Figura 60. Curva de retenção de água no solo da amostra 1-3-1-4.

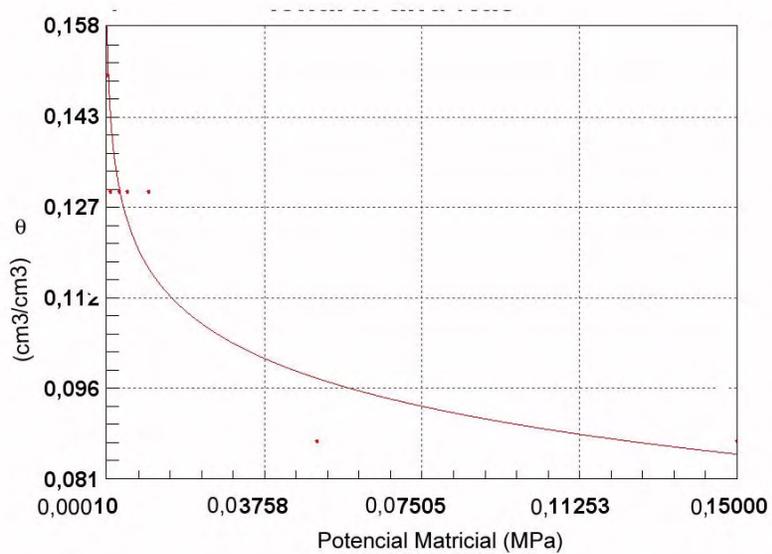


Figura 61. Curva de retenção de água no solo da amostra 1-3-1-5.

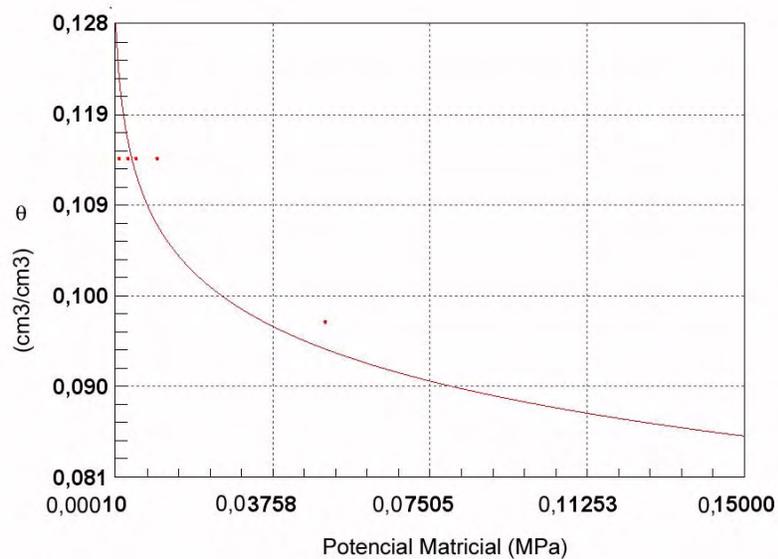


Figura 62. Curva de retenção de água no solo da amostra 1-3-1-6.

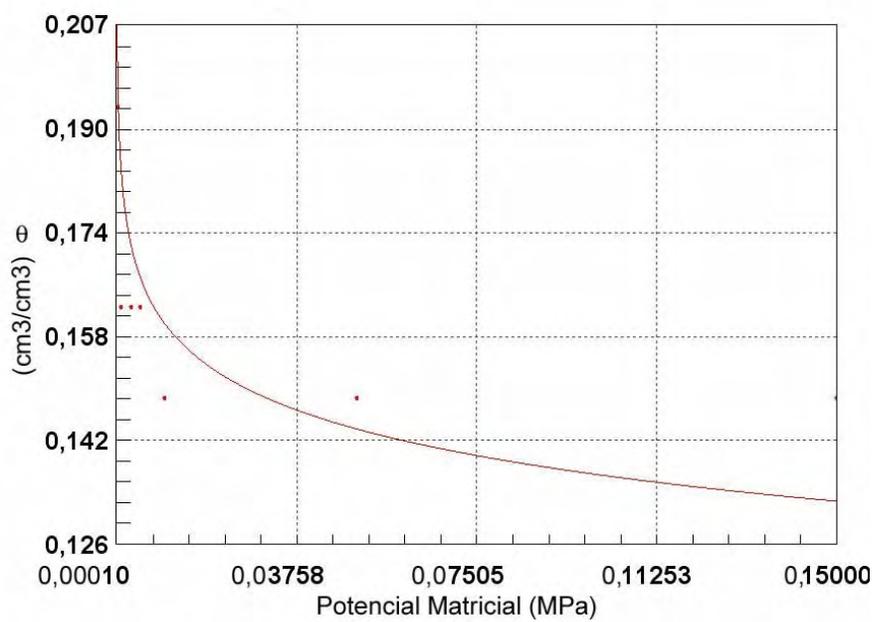


Figura 63. Curva de retenção de água no solo da amostra 1-3-2-1.

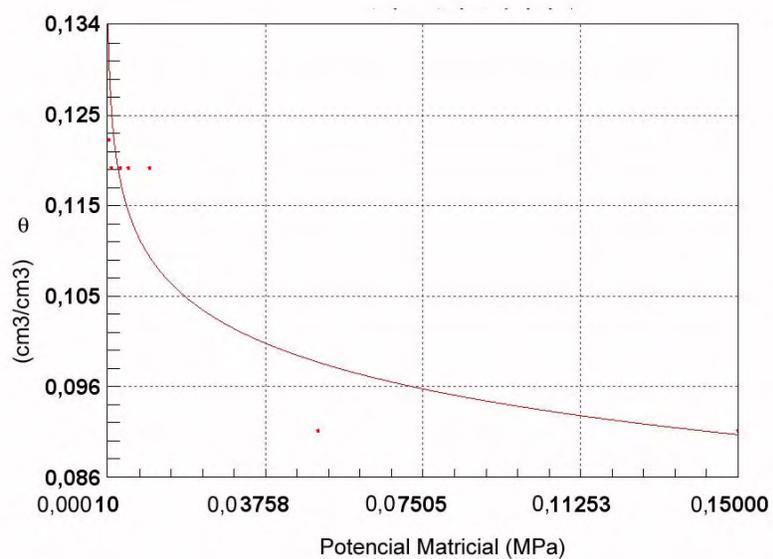


Figura 64. Curva de retenção de água no solo da amostra 1-3-2-2.

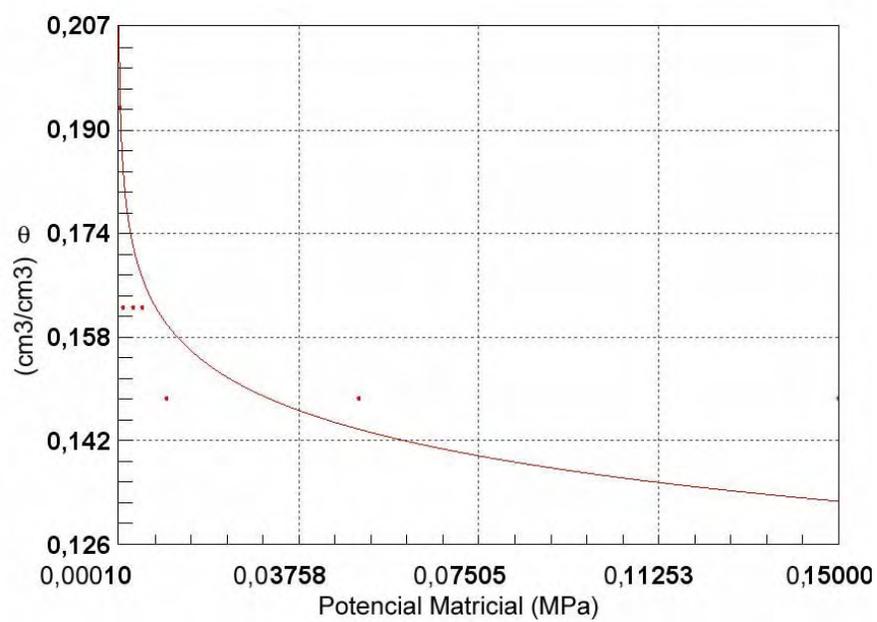


Figura 65. Curva de retenção de água no solo da amostra 1-3-2-3.

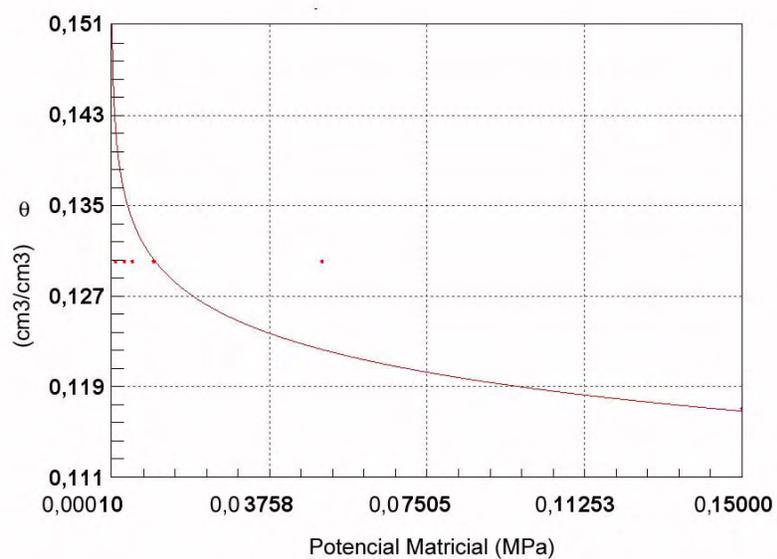


Figura 66. Curva de retenção de água no solo da amostra 2-1-1-4.

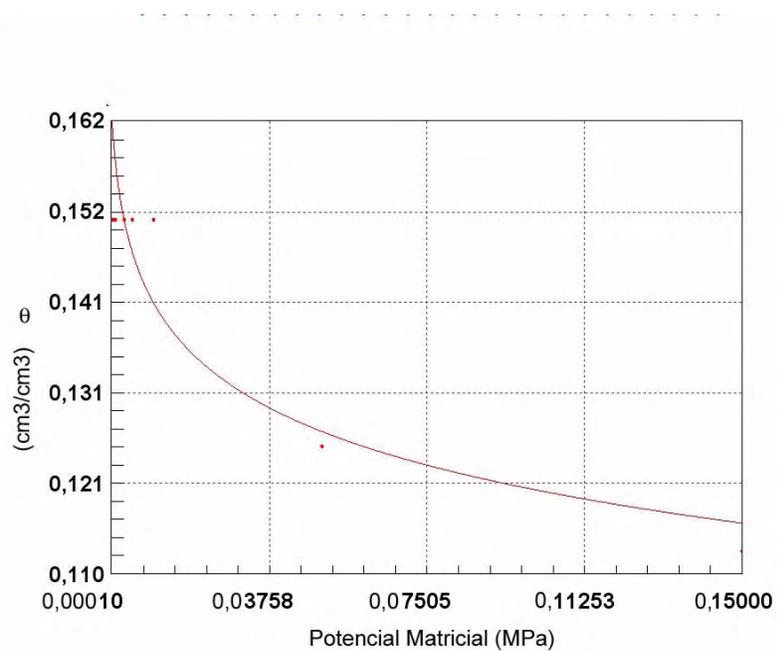


Figura 67. Curva de retenção de água no solo da amostra 2-1-1-5.

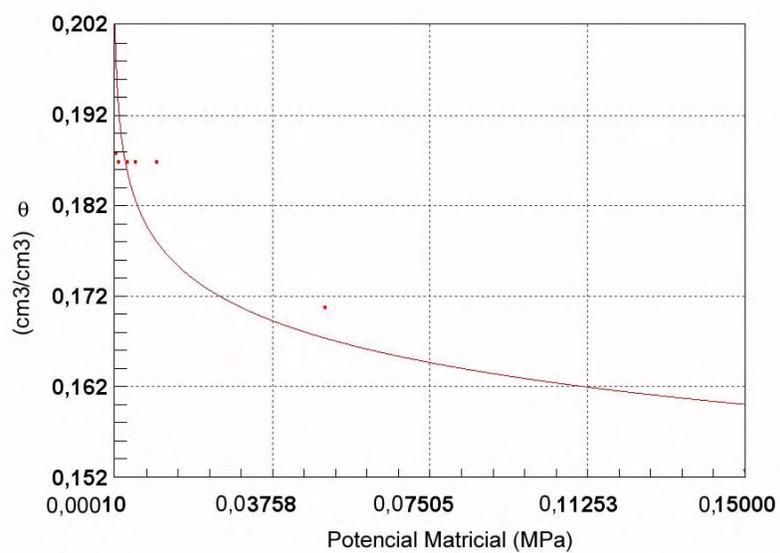


Figura 68. Curva de retenção de água no solo da amostra 2-1-1-6.

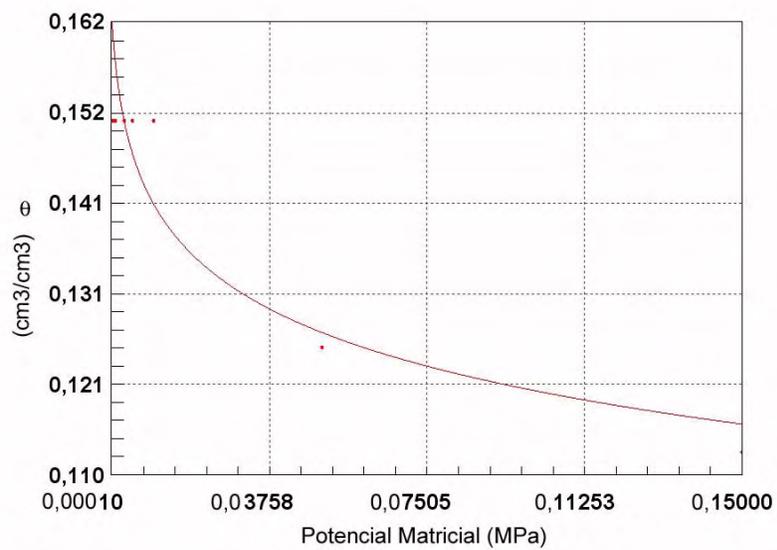


Figura 69. Curva de retenção de água no solo da amostra 2-1-2-7.

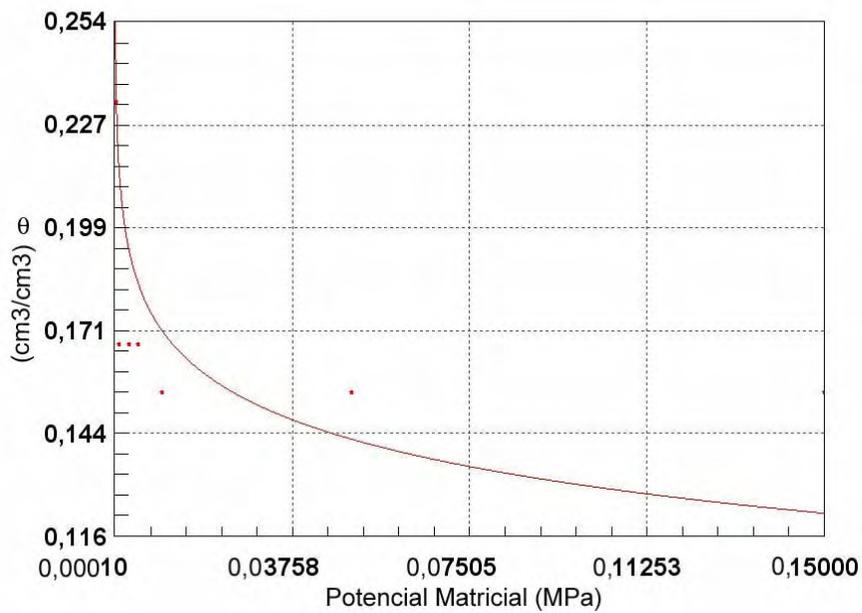


Figura 70. Curva de retenção de água no solo da amostra 2-1-2-8.

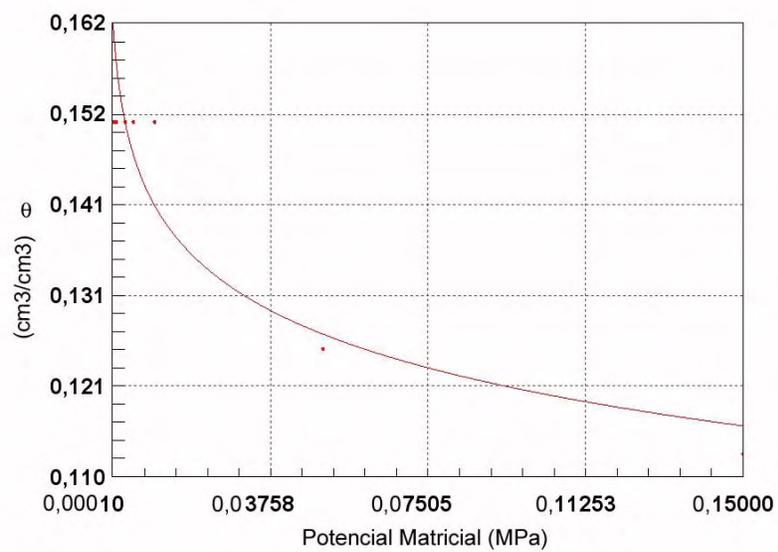


Figura 71. Curva de retenção de água no solo da amostra 2-1-2-9.

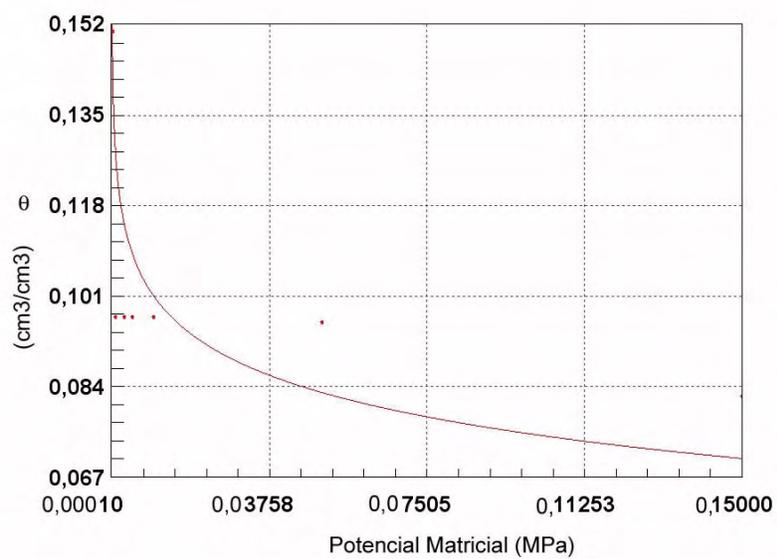


Figura 72. Curva de retenção de água no solo da amostra 2-2-1-1.

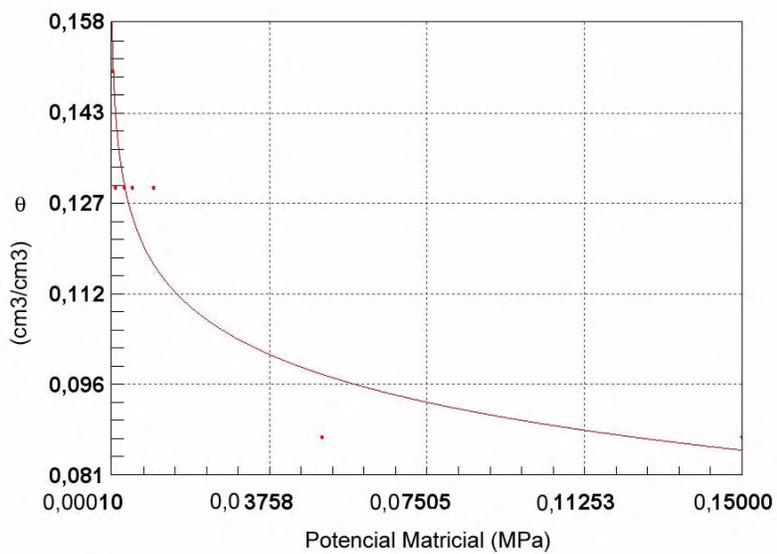


Figura 73. Curva de retenção de água no solo da amostra 2-2-1-2.

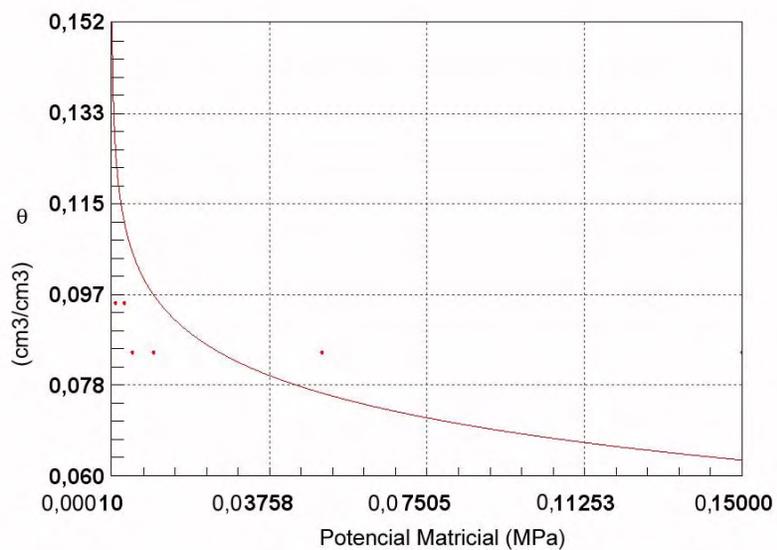


Figura 74. Curva de retenção de água no solo da amostra 2-2-1-3.

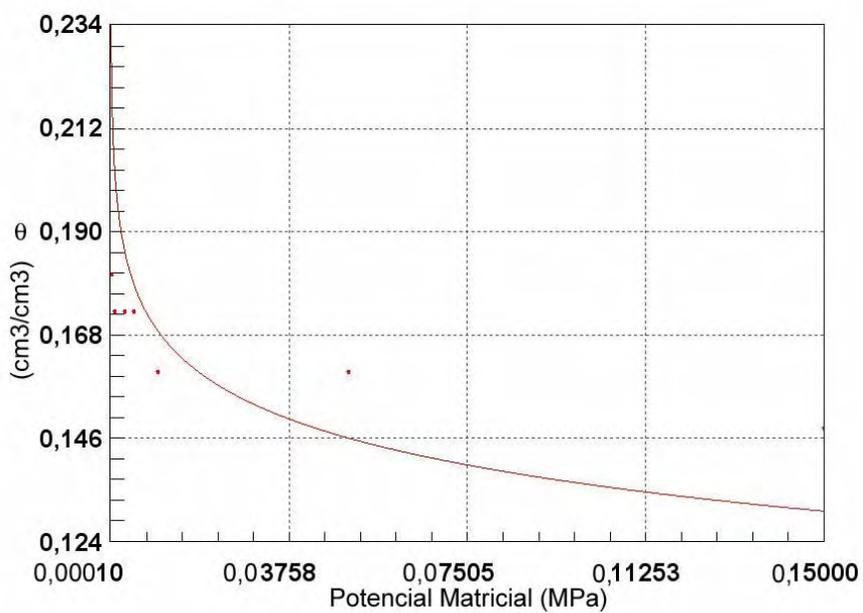


Figura 75. Curva de retenção de água no solo da amostra 2-2-2-7.

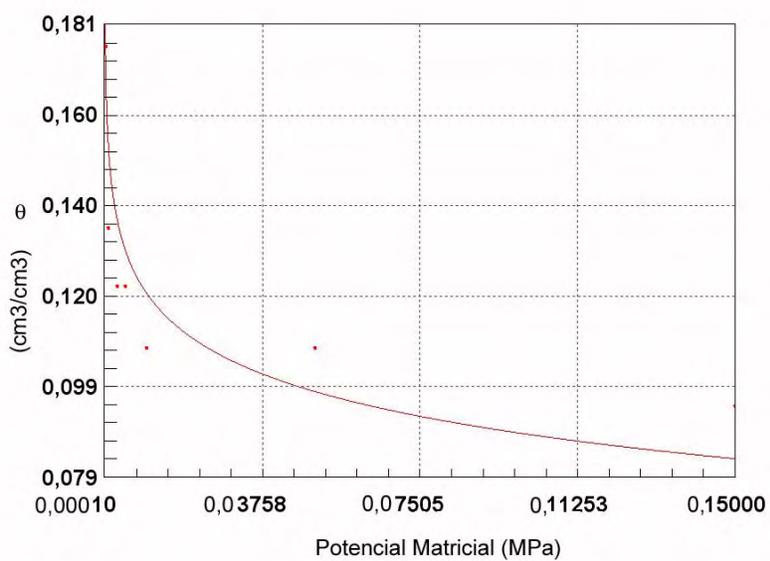


Figura 78. Curva de retenção de água no solo da amostra 2-3-1-1.

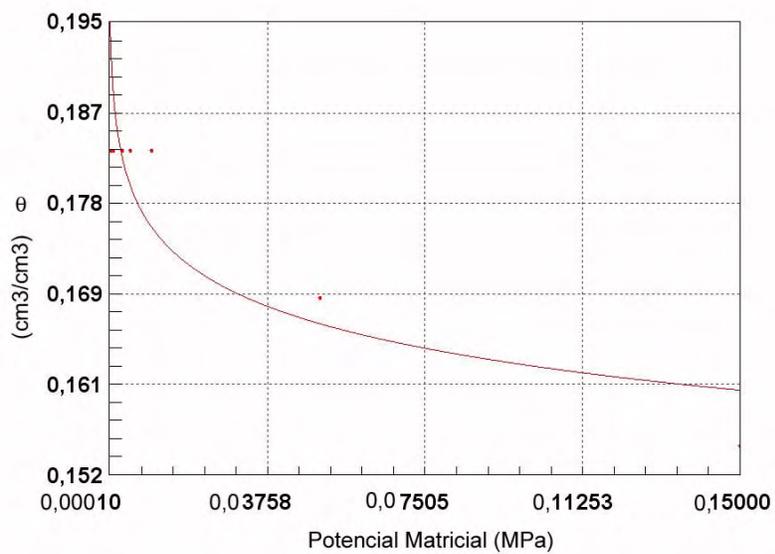


Figura 79. Curva de retenção de água no solo da amostra 2-3-1-2.

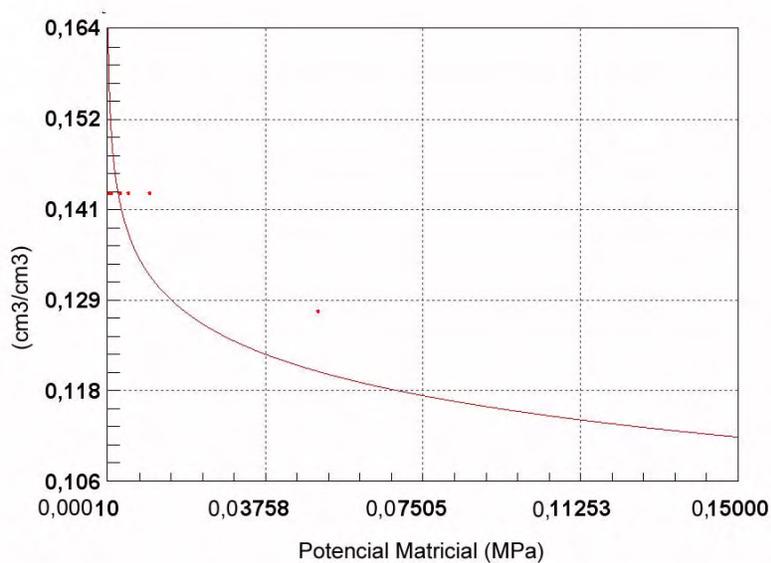


Figura 80. Curva de retenção de água no solo da amostra 2-3-1-3.

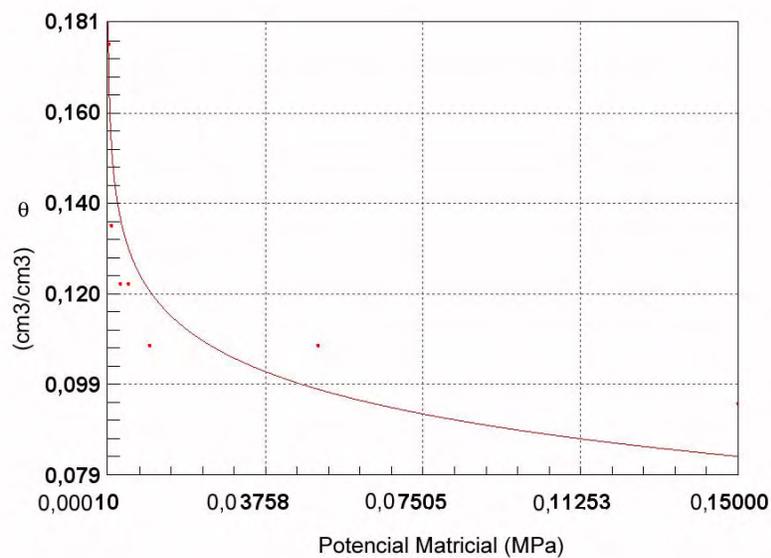


Figura 81. Curva de retenção de água no solo da amostra 2-3-1-4.

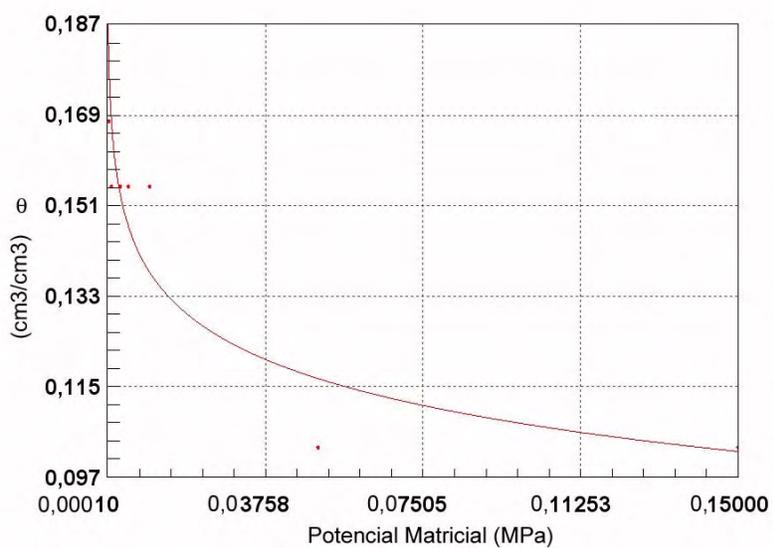


Figura 82. Curva de retenção de água no solo da amostra 2-3-1-5.

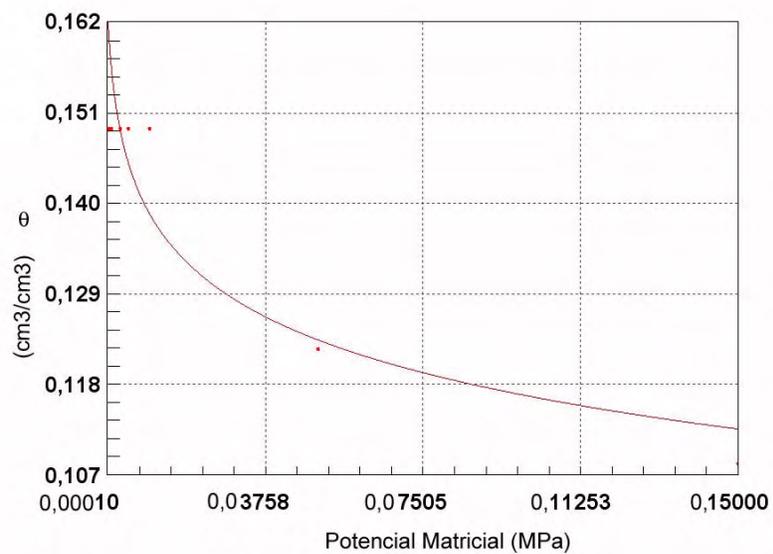


Figura 83. Curva de retenção de água no solo da amostra 2-3-1-6.

6.3 Terceira época de amostragem

A terceira época de amostragem corresponde ao período de noventa dias após o início do experimento, ou seja, uma parcela das amostras foi irrigada com água residuária, enquanto que a outra foi irrigada com água tratada pela SABESP, finalizando a coleta de todas as amostras. Essas amostras coletadas nesse período foram denominadas de 3° época de amostragem.

A seguir encontram-se os resultados obtidos para a terceira época de amostragem.

6.3.1 Índices físicos

Os índices físicos para cada tipo de mistura de solo com lodo se encontram no Quadro 7.

Quadro 7. Índices físicos obtidos para a terceira época de amostragem.

Amostra	U (%)	η (%)	ρ (g.cm ⁻³)	ρ_s (g.cm ⁻³)	ρ_{sat} (g.cm ⁻³)	ρ_{sub} (g.cm ⁻³)	S _r (%)	e	ρ_d (g.cm ⁻³)
1-2-2-5	1,09	56,35	1,23	2,78	1,47	0,47	2,35	1,29	1,21
1-3-1-3	4,79	57,89	1,16	2,63	1,47	0,47	9,16	1,37	1,11
2-2-1-4	7,74	60,92	1,11	2,63	1,33	0,33	13,06	1,56	1,03
2-2-1-8	5,93	65,96	0,95	2,63	1,33	0,33	8,04	1,94	0,90
1-3-1-2	5,23	61,42	1,07	2,63	1,25	0,25	8,64	1,59	1,01
2-2-1-9	5,99	60,16	1,17	2,78	1,25	0,25	11,02	1,51	1,11
1-1-1-5	6,50	67,37	0,87	2,50	1,13	0,13	7,87	2,07	0,82
2-3-2-1	6,50	67,37	0,87	2,50	1,33	0,33	10,77	1,60	1,07
1-3-2-8	3,05	47,75	1,35	2,50	1,41	0,41	8,33	0,91	1,31
2-1-2-5	2,45	58,90	1,11	2,63	1,37	0,37	4,50	1,43	1,08
2-3-2-6	10,19	62,55	1,15	2,78	1,45	0,45	16,96	1,67	1,04
2-3-2-3	3,55	55,17	1,16	2,50	1,41	0,41	7,21	1,23	1,12
1-1-1-4	11,43	72,15	0,78	2,50	1,13	0,13	11,03	2,59	0,70

1-2-2-8	10,91	60,64	1,21	2,78	1,09	0,09	19,68	1,54	1,09
2-2-1-5	1,21	60,64	1,11	2,78	1,49	0,49	2,19	1,54	1,09
2-1-2-3	12,84	71,09	0,82	2,50	1,17	0,17	13,06	2,46	0,72
1-1-1-6	8,70	71,00	0,83	2,63	1,25	0,25	9,34	2,45	0,76
2-3-2-4	7,91	57,78	1,27	2,78	1,57	0,57	16,07	1,37	1,17
2-3-2-5	4,37	53,86	1,27	2,63	1,57	0,57	9,85	1,17	1,21
1-2-2-6	2,19	56,35	1,24	2,78	1,41	0,41	4,71	1,29	1,21
1-2-2-7	2,29	55,83	1,19	2,63	1,41	0,41	4,75	1,27	1,16
2-1-2-7	10,85	65,78	0,95	2,50	1,29	0,29	14,11	1,92	0,86
1-1-1-7	9,60	66,84	0,91	2,50	1,33	0,33	11,90	2,02	0,83
1-3-2-9	2,42	60,64	1,12	2,78	1,45	0,45	4,37	1,54	1,09
2-3-2-2	5,59	50,13	1,25	2,38	1,41	0,41	13,23	1,01	1,19
2-2-1-6	8,05	62,43	1,07	2,63	1,37	0,37	12,75	1,66	0,99
1-3-1-1	3,68	61,12	1,12	2,78	1,37	0,37	6,51	1,57	1,08
2-1-2-2	9,76	67,37	0,90	2,50	1,29	0,29	11,81	2,07	0,82
1-1-1-9	6,11	66,97	0,92	2,63	1,17	0,17	7,92	2,03	0,87
2-2-1-7	4,79	57,89	1,16	2,63	1,37	0,37	9,16	1,37	1,11
1-2-2-4	6,21	61,60	1,13	2,78	1,33	0,33	10,77	1,60	1,07
2-1-2-6	8,40	70,00	0,86	2,63	1,29	0,29	9,47	2,33	0,79
1-2-2-9	2,42	60,64	1,12	2,78	1,33	0,33	4,37	1,54	1,09
1-3-2-7	3,47	56,38	1,19	2,63	1,37	0,37	7,06	1,29	1,15
2-1-2-1	11,02	67,93	0,94	2,63	1,09	0,09	13,66	2,12	0,84
1-1-1-8	4,68	59,21	1,19	2,78	1,37	0,37	8,96	1,45	1,13

Legenda: U – umidade, η – porosidade, ρ – massa específica, ρ_s – massa específica dos sólidos, ρ_{sat} – massa específica saturada, ρ_{sub} – massa específica submersa, S_r – grau de saturação, e – índice de vazios, ρ_d – massa específica aparente seca e amostra: S-L-A-R. (Solo – Lodo – Água – Repetição).

6.3.2 Condutividade hidráulica de solo saturado

A condutividade hidráulica para solo saturado (k_0) a partir de cada tipo de mistura de solo com lodo se encontra no Quadro 8.

Quadro 8. Valores de k_0 obtidos a partir da mistura de solo com lodo.

Amostra	Unidade	K_0
2-3-2-3	cm.s ⁻¹	2,22700*10 ⁻²
1-2-2-5	cm.s ⁻¹	3,61085*10 ⁻²
1-1-1-4	cm.s ⁻¹	3,20295*10 ⁻²
1-2-2-8	cm.s ⁻¹	7,56880*10 ⁻²
1-3-1-3	cm.s ⁻¹	1,47970 *10 ⁻²
2-2-1-5	cm.s ⁻¹	2,29790*10 ⁻²
2-2-1-4	cm.s ⁻¹	7,63485*10 ⁻²
2-1-2-3	cm.s ⁻¹	8,07470*10 ⁻²
1-1-1-6	cm.s ⁻¹	3,61085*10 ⁻²
2-2-1-8	cm.s ⁻¹	3,08500*10 ⁻²
2-3-2-4	cm.s ⁻¹	2,06935*10 ⁻²
1-3-1-2	cm.s ⁻¹	1,08407*10 ⁻¹
2-3-2-5	cm.s ⁻¹	3,20410*10 ⁻²
1-2-2-6	cm.s ⁻¹	8,50005*10 ⁻²
2-2-1-9	cm.s ⁻¹	2,40509*10 ⁻²
1-2-2-7	cm.s ⁻¹	8,03443*10 ⁻²
2-1-2-4	cm.s ⁻¹	6,46375*10 ⁻²
1-1-1-7	cm.s ⁻¹	2,74488*10 ⁻²
1-3-2-9	cm.s ⁻¹	5,89188*10 ⁻²
2-3-2-2	cm.s ⁻¹	2,01675*10 ⁻²
2-2-1-6	cm.s ⁻¹	1,31744*10 ⁻¹
1-3-1-1	cm.s ⁻¹	5,72380*10 ⁻²
2-1-2-2	cm.s ⁻¹	7,55458*10 ⁻²
1-1-1-5	cm.s ⁻¹	2,31189*10 ⁻²
1-1-1-9	cm.s ⁻¹	2,52838*10 ⁻²
2-2-1-7	cm.s ⁻¹	1,86127*10 ⁻¹
2-3-2-1	cm.s ⁻¹	2,61043*10 ⁻²
1-2-2-4	cm.s ⁻¹	6,05545*10 ⁻²
2-1-2-6	cm.s ⁻¹	9,45768*10 ⁻²
1-2-2-9	cm.s ⁻¹	8,10710*10 ⁻²
1-3-2-8	cm.s ⁻¹	1,08280*10 ⁻¹
2-1-2-5	cm.s ⁻¹	5,73614*10 ⁻²
2-3-2-6	cm.s ⁻¹	2,31359*10 ⁻²
1-3-2-7	cm.s ⁻¹	1,01297*10 ⁻¹
2-1-2-1	cm.s ⁻¹	6,09994*10 ⁻²
1-1-1-8	cm.s ⁻¹	3,37085*10 ⁻²

Legenda: amostra: S-L-A-R. (Solo – Lodo – Água – Repetição).

6.3.3 Curva de retenção de água no solo

As Figuras de 84 a 119 apresentam as curvas de retenção de água no solo para cada mistura.

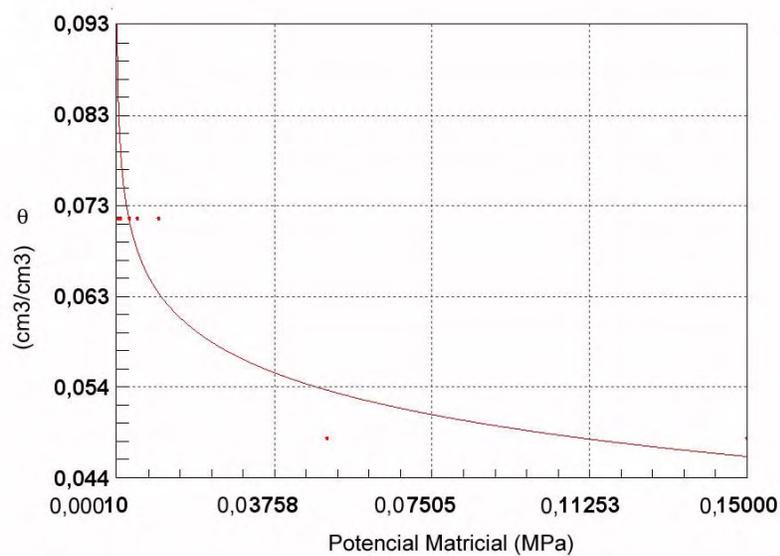


Figura 84. Curva de retenção de água no solo da amostra 1-1-1-5.

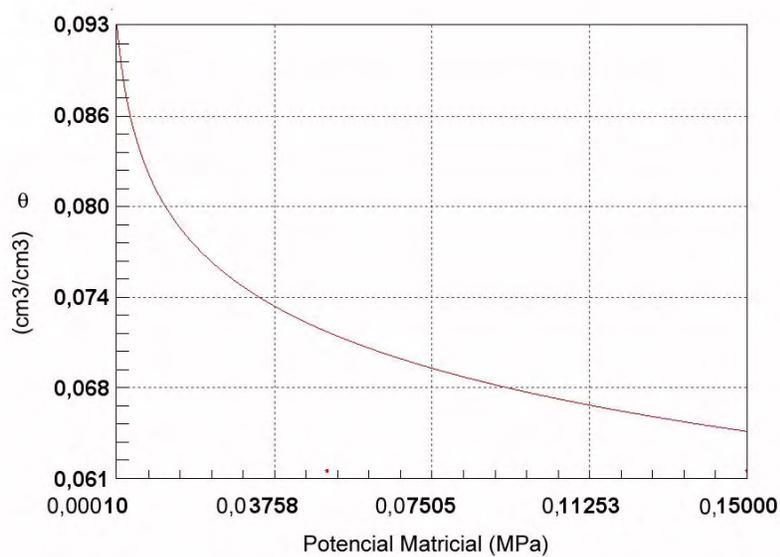


Figura 85. Curva de retenção de água no solo da amostra 1-2-2-5.

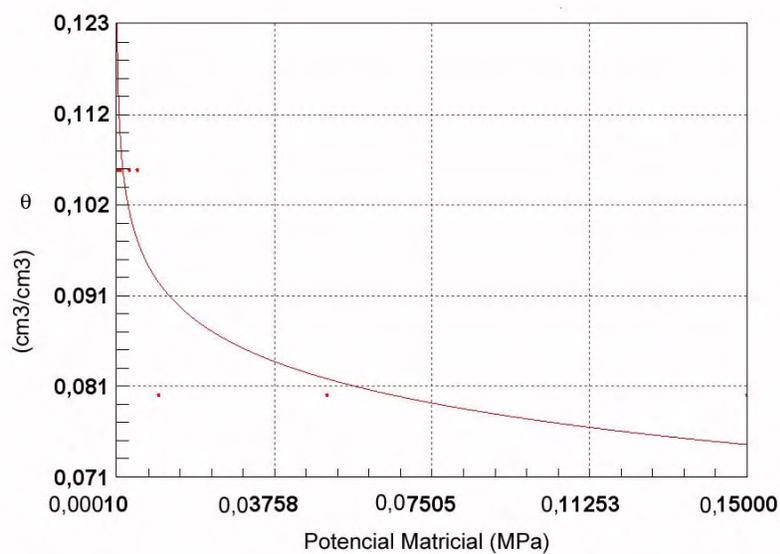


Figura 86. Curva de retenção de água no solo da amostra 1-3-1-2.

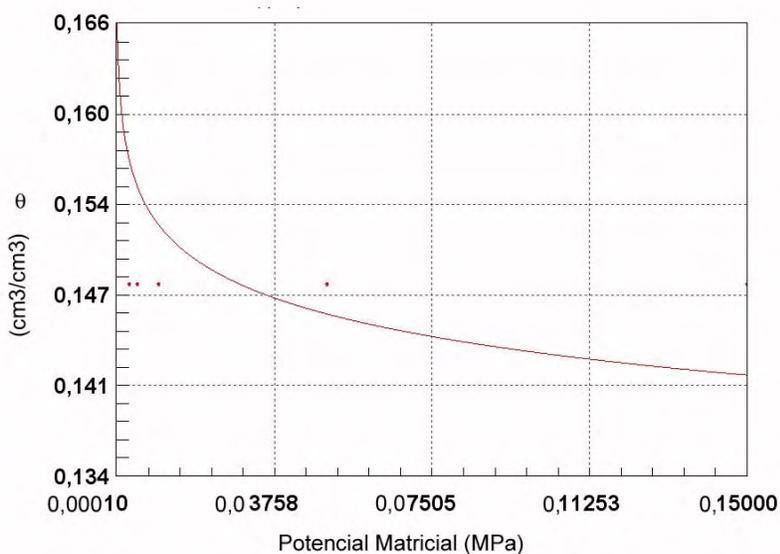


Figura 87. Curva de retenção de água no solo da amostra 1-3-1-3.

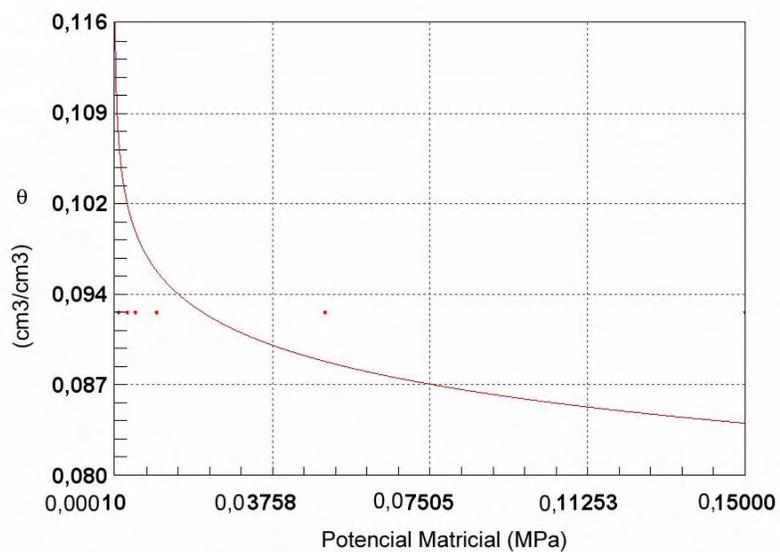


Figura 88. Curva de retenção de água no solo da amostra 1-3-2-8.

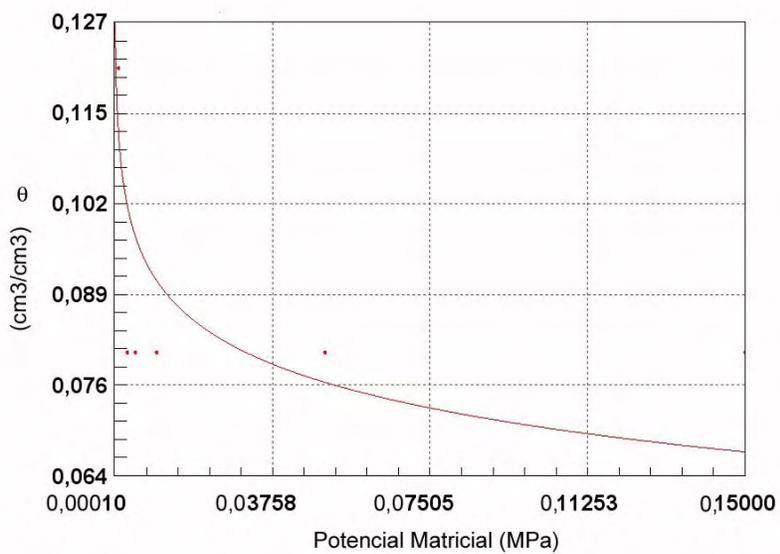


Figura 89. Curva de retenção de água no solo da amostra 2-1-2-5.

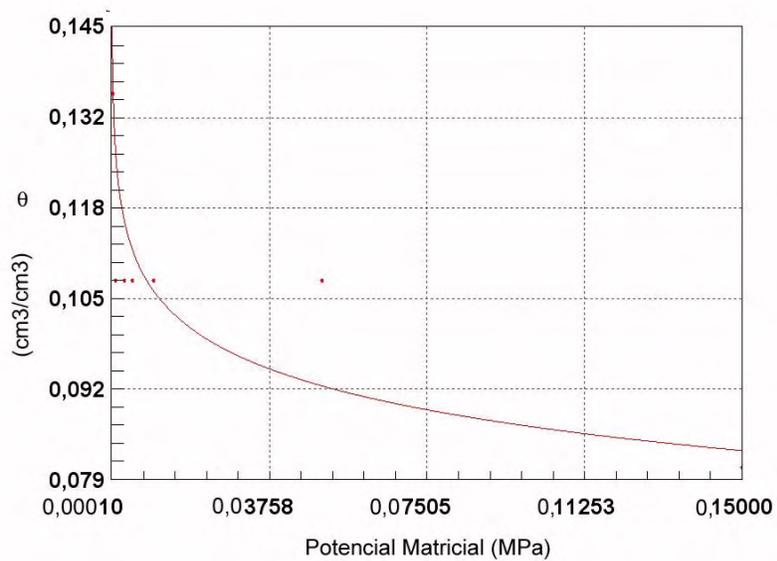


Figura 90. Curva de retenção de água no solo da amostra 2-2-1-4.

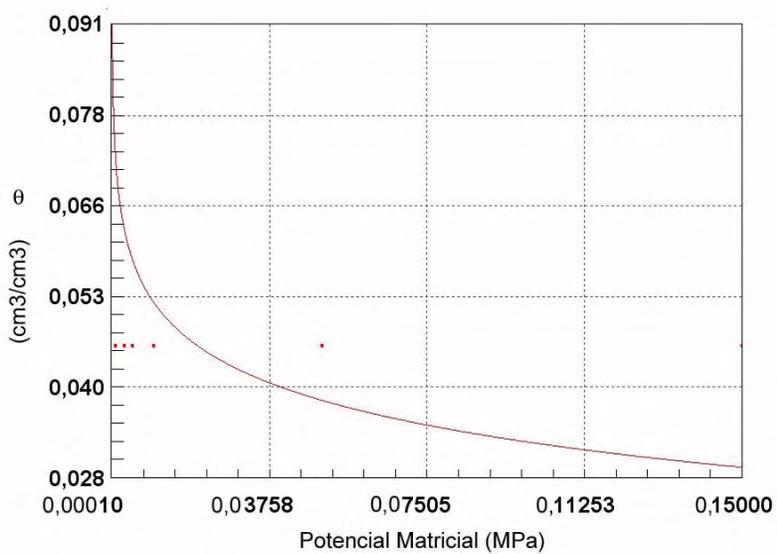


Figura 91. Curva de retenção de água no solo da amostra 2-2-1-8.

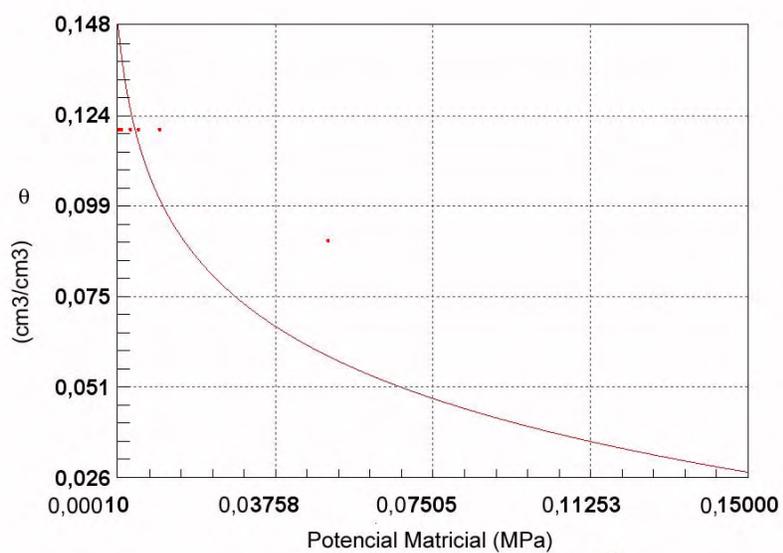


Figura 92. Curva de retenção de água no solo da amostra 2-2-1-9.

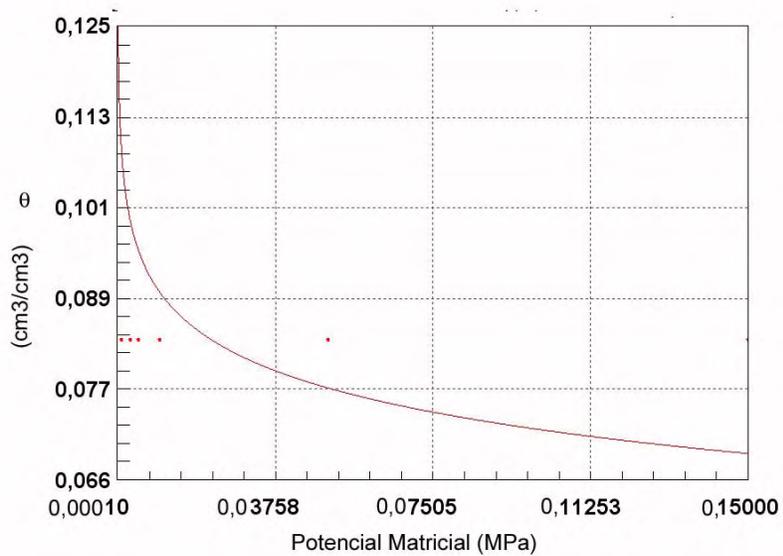


Figura 93. Curva de retenção de água no solo da amostra 2-3-2-1.

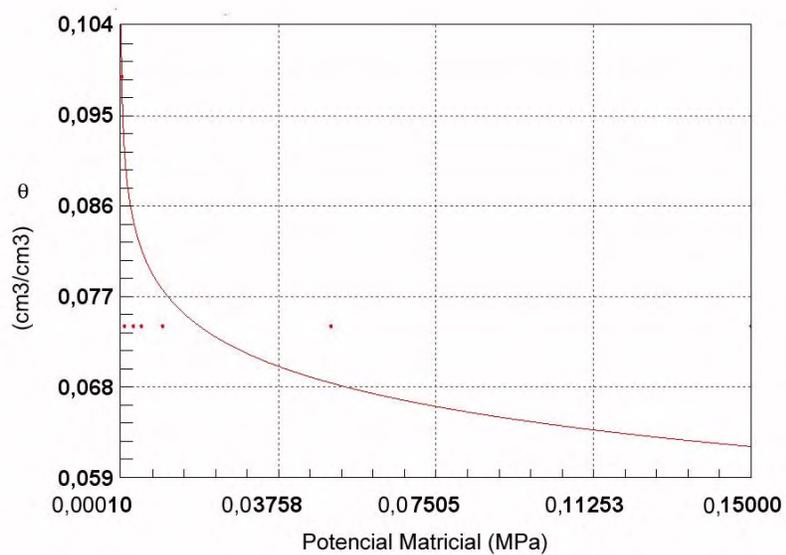


Figura 94. Curva de retenção de água no solo da amostra 2-3-2-6.

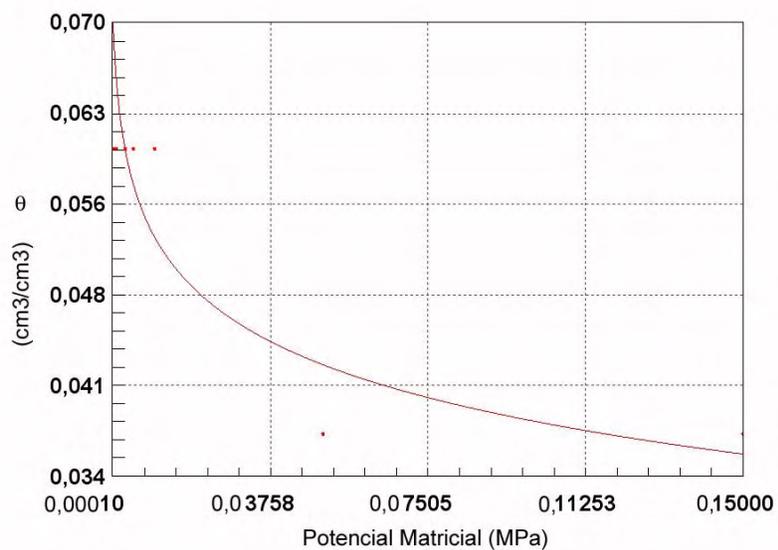


Figura 95. Curva de retenção de água no solo da amostra 1-1-1-4.

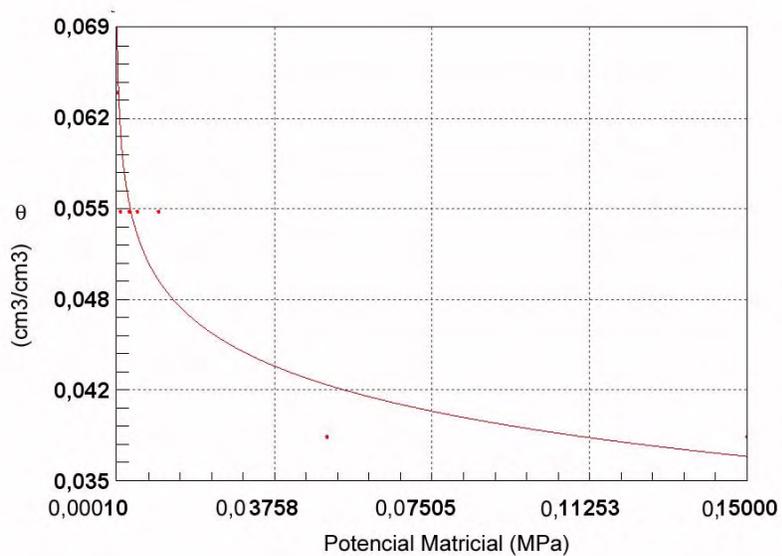


Figura 96. Curva de retenção de água no solo da amostra 1-1-1-6.

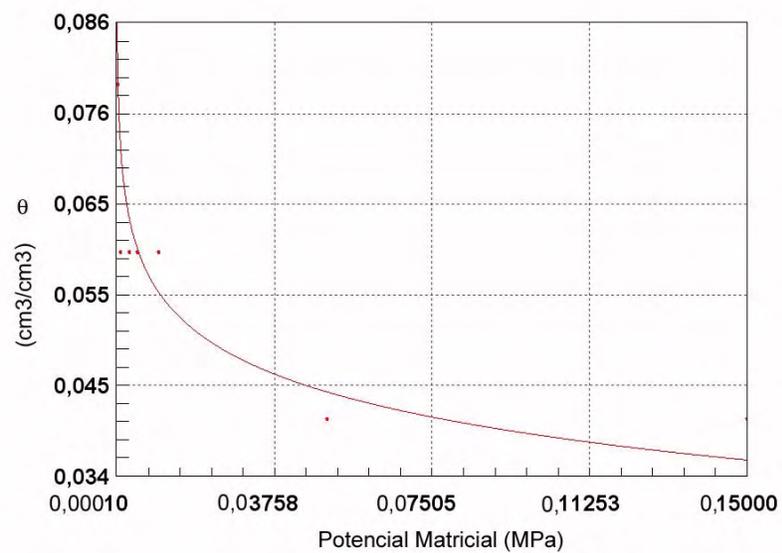


Figura 97. Curva de retenção de água no solo da amostra 1-1-1-7.

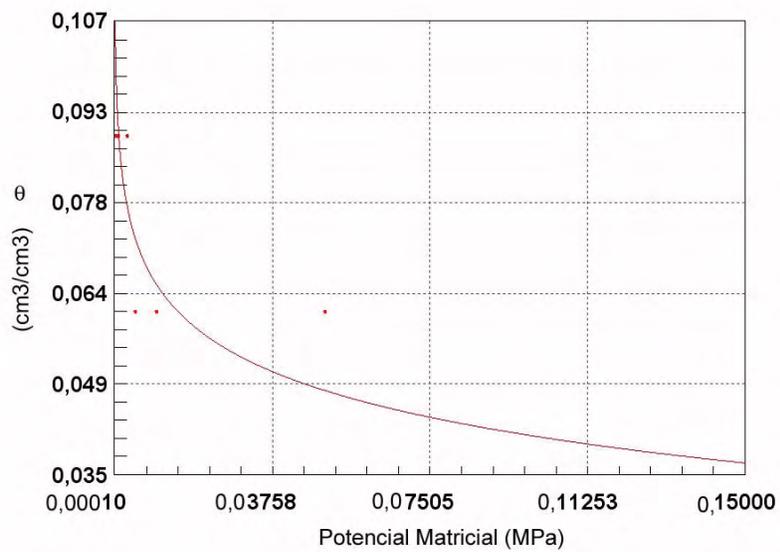


Figura 98. Curva de retenção de água no solo da amostra 1-1-1-8.

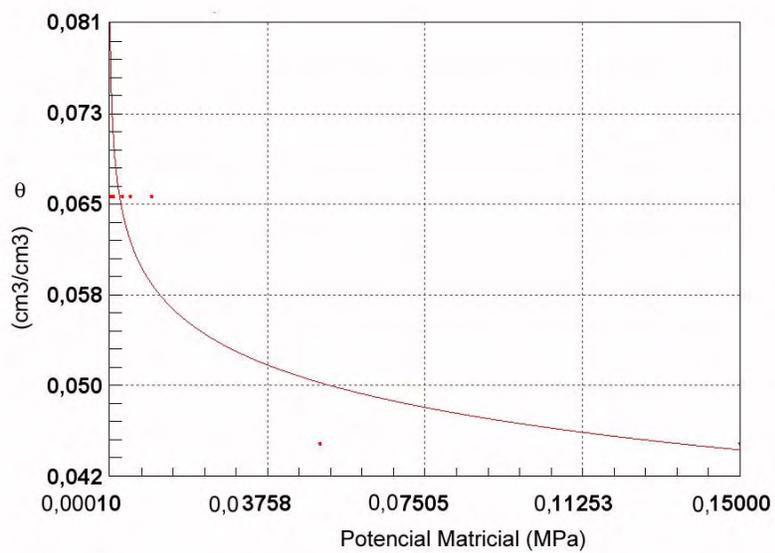


Figura 99. Curva de retenção de água no solo da amostra 1-1-1-9.

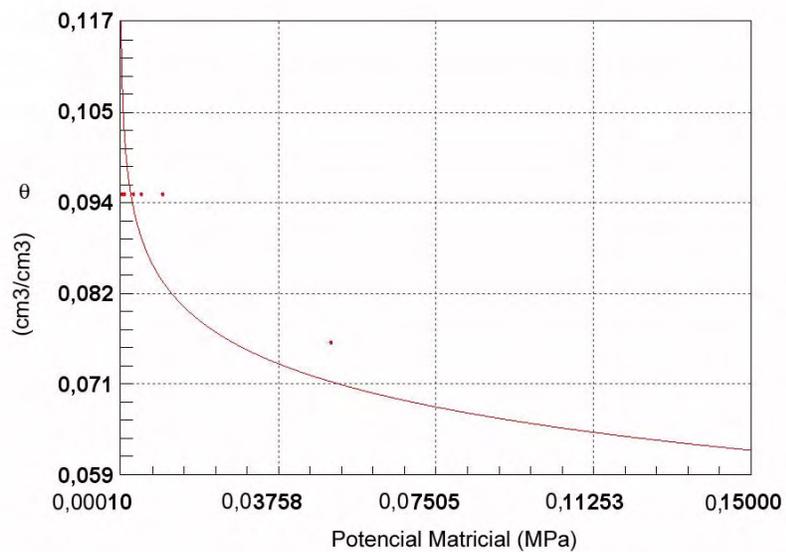


Figura 100. Curva de retenção de água no solo da amostra 1-2-2-4.

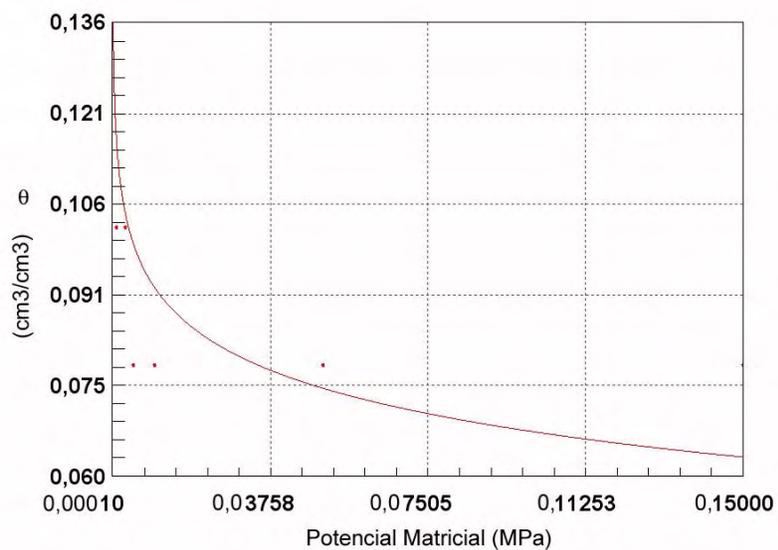


Figura 101. Curva de retenção de água no solo da amostra 1-2-2-6.

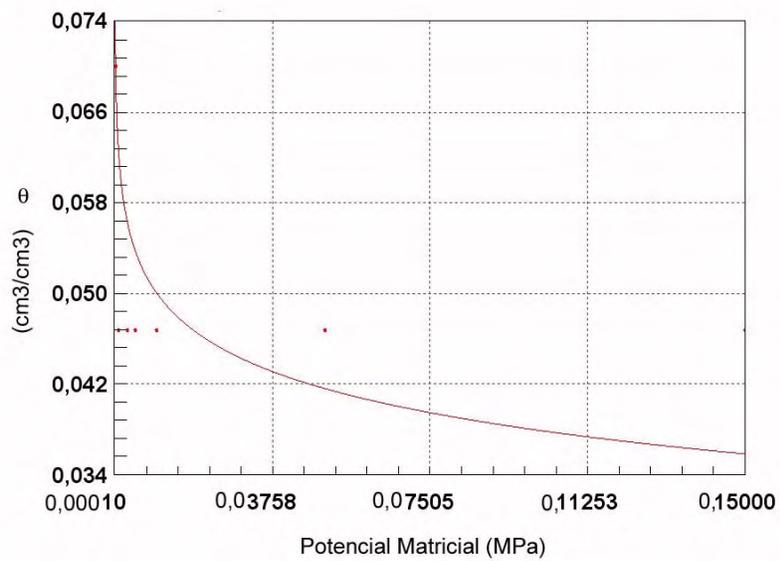


Figura 104. Curva de retenção de água no solo da amostra 1-2-2-9.

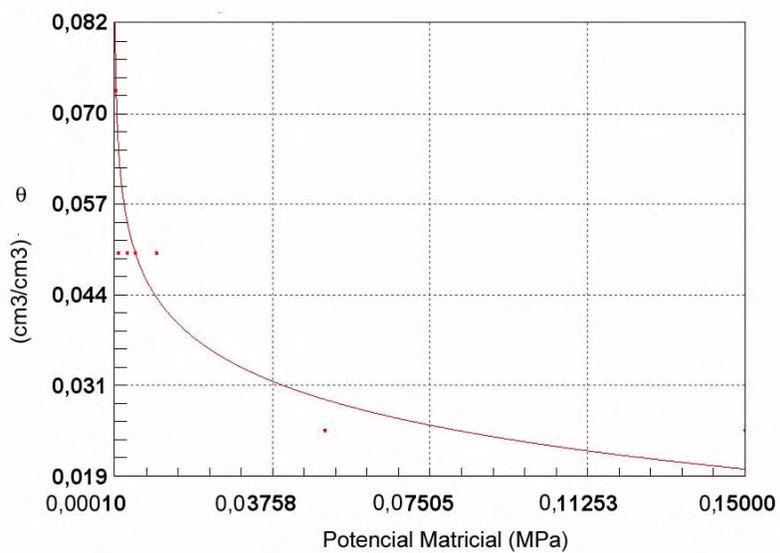


Figura 105. Curva de retenção de água no solo da amostra 1-3-1-1.

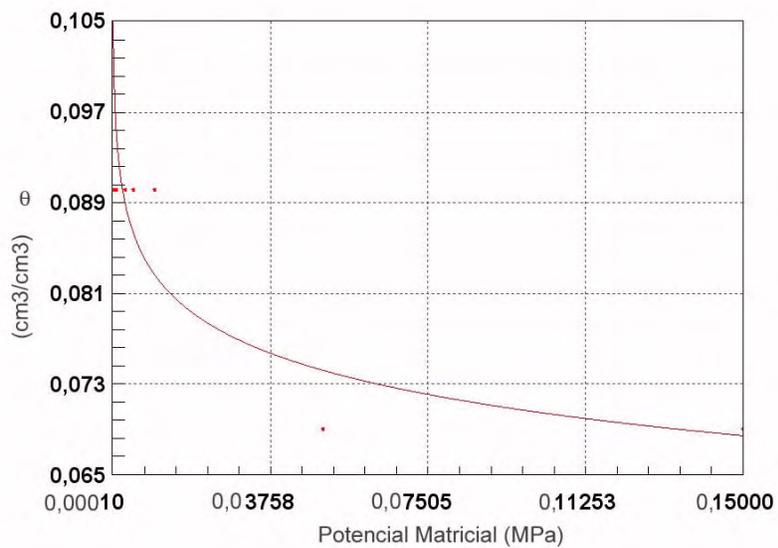


Figura 106. Curva de retenção de água no solo da amostra 1-3-2-7.

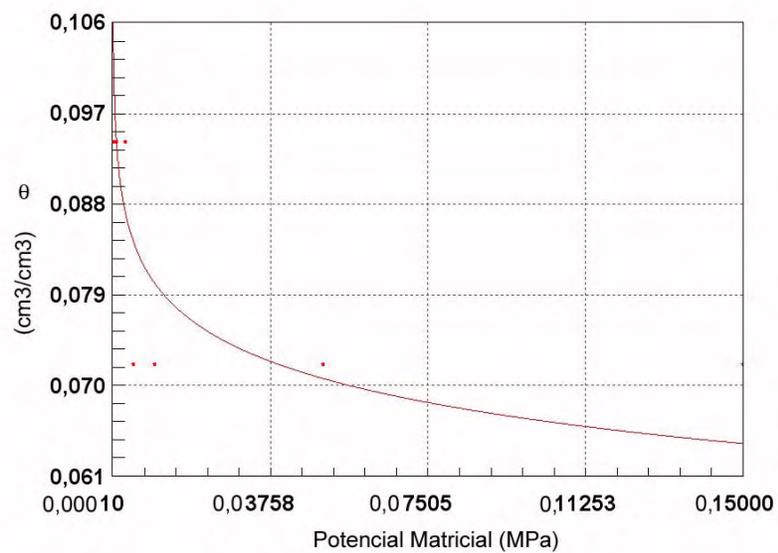


Figura 107. Curva de retenção de água no solo da amostra 1-3-2-9.

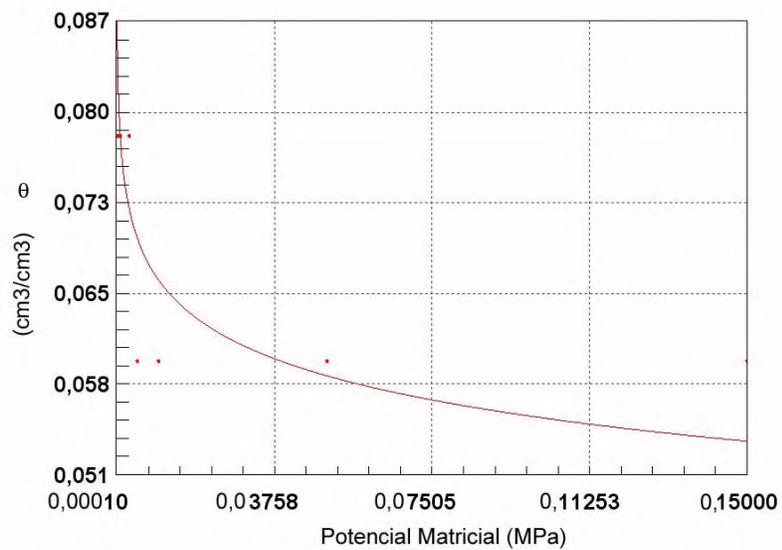


Figura 110. Curva de retenção de água no solo da amostra 2-1-2-3.

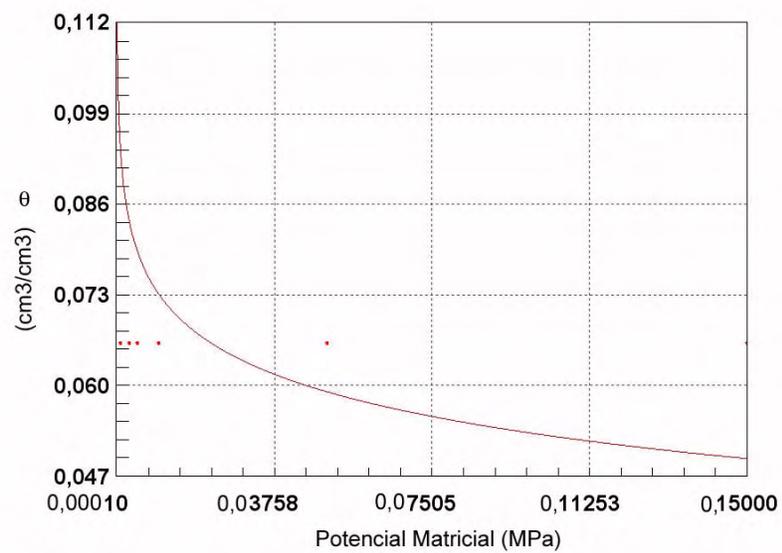


Figura 111. Curva de retenção de água no solo da amostra 2-1-2-4.

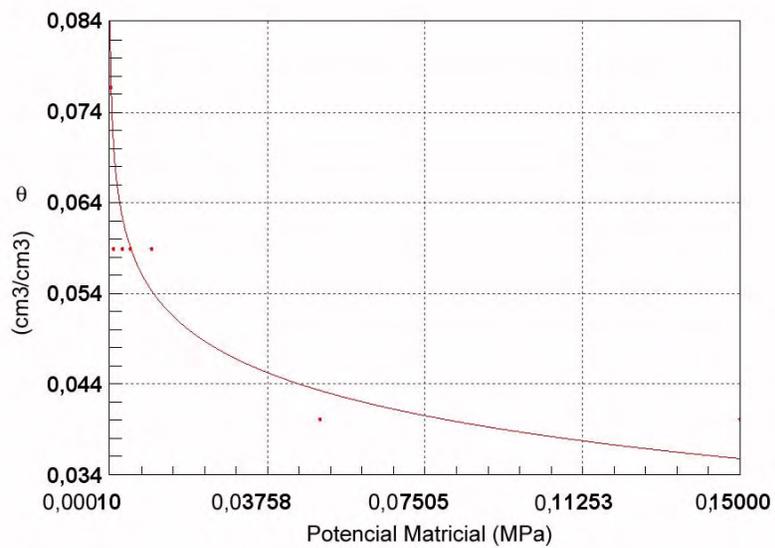


Figura 112. Curva de retenção de água no solo da amostra 2-1-2-6.

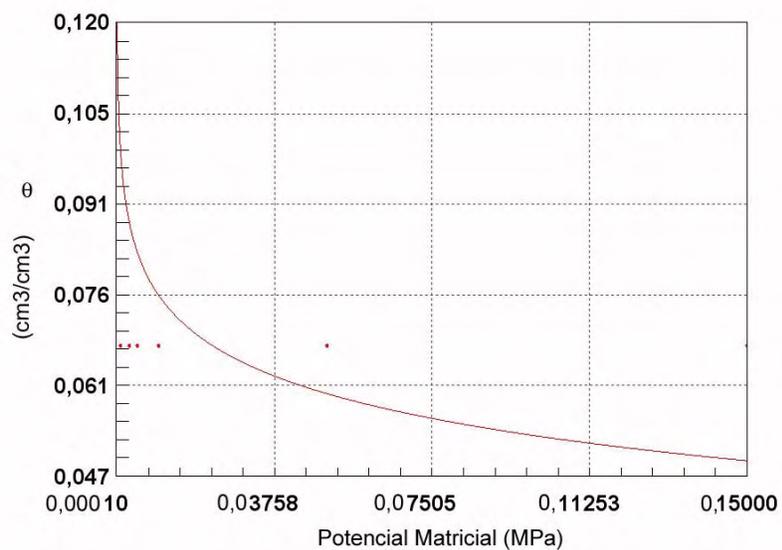


Figura 113. Curva de retenção de água no solo da amostra 2-2-1-5.

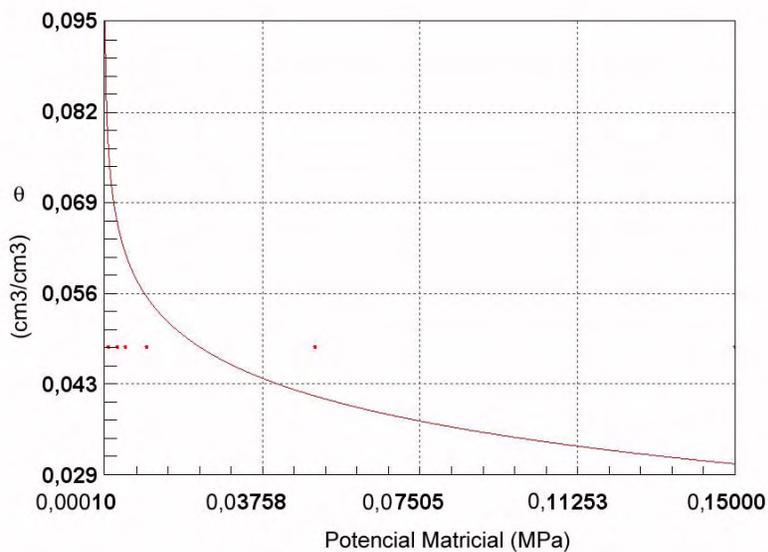


Figura 114. Curva de retenção de água no solo da amostra 2-2-1-6.

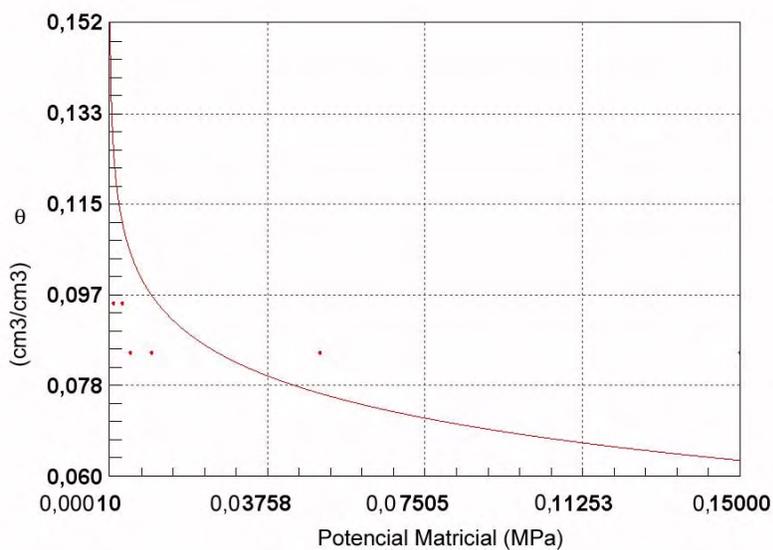


Figura 115. Curva de retenção de água no solo da amostra 2-2-1-7.

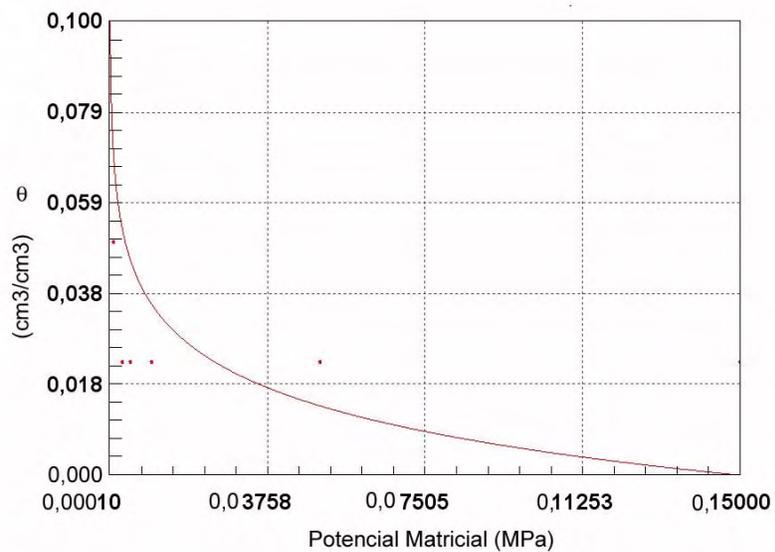


Figura 116. Curva de retenção de água no solo da amostra 2-3-2-2.

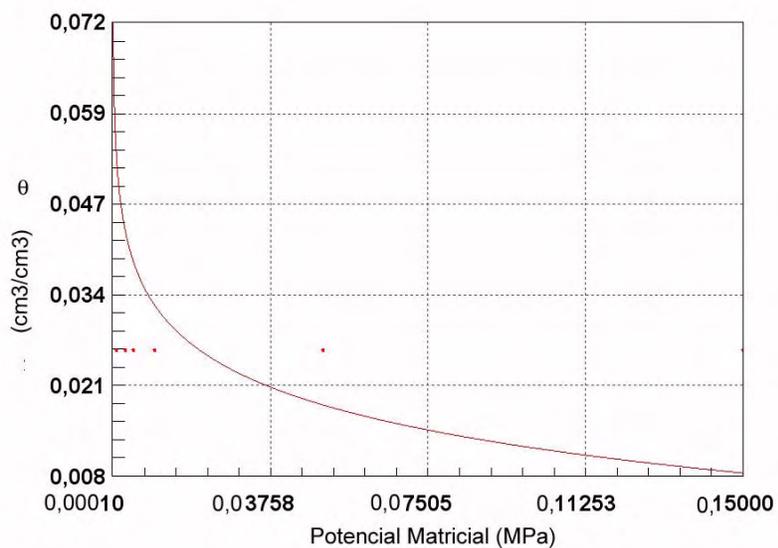


Figura 117. Curva de retenção de água no solo da amostra 2-3-2-3.

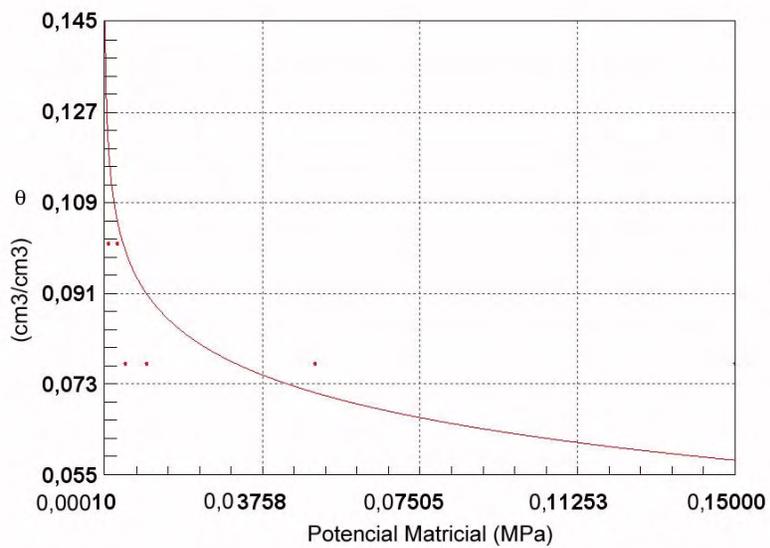


Figura 118. Curva de retenção de água no solo da amostra 2-3-2-4.

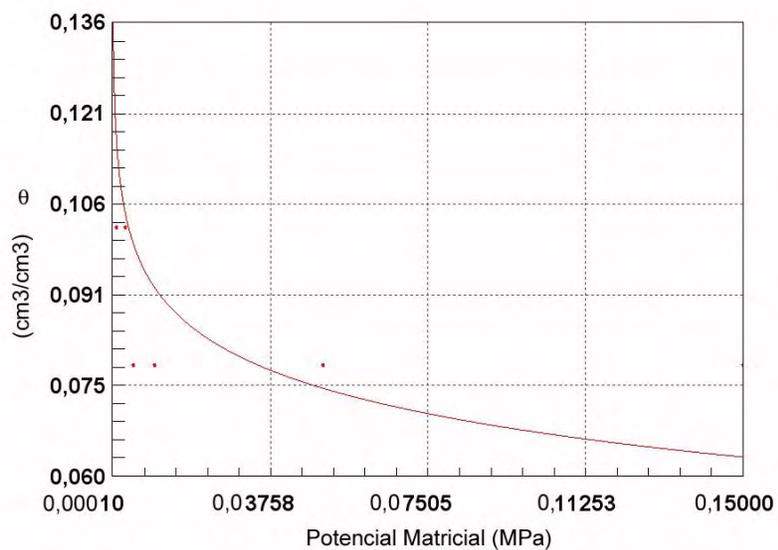


Figura 119. Curva de retenção de água no solo da amostra 2-3-2-5.

7. DISCUSSÃO

7.1 Índices Físicos

7.1.1 Umidade

As médias obtidas para os níveis de umidade, de acordo com respectivo tratamento, assim como os resultados do teste de Tukey estão apresentados no Quadro 9.

Quadro 9. Valores encontrados para umidade (%).

S1				S2			
	L1	L2	L3		L1	L2	L3
A1	4,60 aA	4,47 aA	3,29 aA	A1	4,81 aA	4,49 aA	2,51 aA
A2	4,70 aA	6,80 aA	4,66 aA	A2	4,38 aA	4,18 aA	8,09 bB

Legenda: S1 - solo de textura grossa; S2 - solo de textura fina; L1 - lodo da Estação de Tratamento de Esgoto do Lageado; L2 - lodo da Estação de Tratamento de Esgoto de Franca; L3 - lodo da Estação de Tratamento de Água de Botucatu; A1 - água tratada pela SABESP; A2 - água residuária. Médias seguidas da mesma letra não diferenciam ao nível de 5% de probabilidade; letras minúsculas comparam médias de épocas; maiúsculas, de tipo de lodo.

De acordo com dados estatísticos apresentados no Quadro 9, a umidade nos tratamentos contendo solo de textura grossa não variaram significativamente conforme o tipo de água utilizado para a sua irrigação.

Já para os tratamentos contendo solo de textura fina irrigados com água residuária (S2-A2) contendo lodo da Estação de Tratamento de Água de Botucatu (L3) apresentaram uma variação significativa. Os demais lodos não apresentaram uma alteração significativa em sua umidade conforme foi mudado o tipo de água utilizado para a sua irrigação.

7.1.2 Porosidade

As médias obtidas para os níveis de porosidade, de acordo com respectivo tratamento, assim como os resultados do teste de Tukey estão apresentados no Quadro 10.

Quadro 10. Valores encontrados para porosidade (%).

S1 A1				S1 A2			
	L1	L2	L3		L1	L2	L3
E1	22,09 aA	44,64 aB	46,91 aB	E1	22,09 aA	44,64 aB	46,91 aB
E2	60,91 aA	56,23 aA	54,50 aA	E2	22,09 aA	54,43 aB	51,08 aB
E3	64,51 aA	56,17 aA	60,14 aA	E3	69,99 bA	60,96 aA	54,92 aA

S2 A1				S2 A2			
	L1	L2	L3		L1	L2	L3
E1	55,78 aA	54,44 aA	53,94 aA	E1	55,78 aA	54,44 aA	53,94 aA
E2	56,47 aA	60,37 aA	43,97 aA	E2	63,06 aA	54,44 aA	59,45 aA
E3	65,42 aA	61,49 aA	53,05 aA	E3	68,26 aA	61,17 aA	62,56 aA

Legenda: S1 - solo de textura grossa; S2 - solo de textura fina; L1 - lodo da Estação de Tratamento de Esgoto do Lageado; L2 - lodo da Estação de Tratamento de Esgoto de Franca; L3 - lodo da Estação de Tratamento de Água de Botucatu; E1 - primeira época de amostragem; E2 - segunda época de amostragem; E3 - terceira época de amostragem; A1 - água tratada pela SABESP; A2 - água residuária. Médias seguidas da mesma letra não diferenciam ao nível de 5% de probabilidade; letras minúsculas comparam médias de épocas; maiúsculas, de tipo de lodo.

De acordo com dados estatísticos apresentados no Quadro 10, a porosidade dos tratamentos contendo solo de textura grossa irrigados com água tratada pela SABESP (S1-A1) variaram significativamente conforme o tipo de lodo utilizado.

Já para os tratamentos contendo solo de textura fina irrigados com água tratada pela SABESP (S2-A1) não variam de forma significativa conforme o lodo utilizado e o tempo de interação.

Os tratamentos irrigados com água residuária (A2) apresentaram uma variação significativa conforme o tipo de lodo utilizado. No caso do tratamento contendo solo de

textura grossa com lodo de esgoto da Estação de Tratamento de Esgoto do Lageado (S1L1) apresentou uma variação significativa conforme o tempo de interação do tratamento.

7.1.3 Massa específica

A massa específica não sofreu nenhuma alteração significativa.

7.1.4 Massa específica dos sólidos

As médias obtidas para os níveis de massa específica dos sólidos, de acordo com respectivo tratamento, assim como os resultados do teste de Tukey estão apresentados no Quadro 11.

Quadro 11. Valores encontrados para massa específica dos sólidos ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$).

S1	A1			S1	A2		
	L1	L2	L3		L1	L2	L3
E1	1,79 aA	2,78 aB	2,63 aB	E1	1,79 aA	2,78 aB	2,63 aB
E2	2,46 bA	2,69 aA	2,59 aA	E2	1,79 aA	2,59 aB	2,59 aB
E3	2,63 bA	2,73 aA	2,68 aA	E3	2,54 bB	2,78 aB	2,64 aB

S2	A1			S2	A2		
	L1	L2	L3		L1	L2	L3
E1	2,38 aA	2,63 aA	2,63 aA	E1	2,38 aA	2,63 aA	2,63 aA
E2	2,50 aA	2,68 aA	2,68 aA	E2	2,55 aA	2,63 aA	2,50 aA
E3	2,59 aA	2,68 aA	2,50 aA	E3	2,54 aA	2,68 aA	2,69 aA

Legenda: S1 – solo de textura grossa; S2 – solo de textura fina; L1 – lodo da Estação de Tratamento de Esgoto do Lageado; L2 – lodo da Estação de Tratamento de Esgoto de Franca; L3 – lodo da Estação de Tratamento de Água de Botucatu; E1 – primeira época de amostragem; E2 – segunda época de amostragem; E3 – terceira época de amostragem; A1 – água tratada pela SABESP; A2 – água residuária. Médias seguidas da mesma letra não diferenciam ao nível de 5% de probabilidade; letras minúsculas comparam médias de épocas; maiúsculas, de tipo de lodo.

De acordo com o Quadro 11, tanto os tratamentos contendo solo de textura grossa com lodo da Estação de Tratamento de Esgoto do Lageado irrigados com água tratada pela SABESP (S1A1L1) e com água residuária (S1A2L1) tiveram variação significativa conforme o seu tempo de interação. Nos demais tratamentos isso não ocorre.

Também pode-se observar que o tipo de lodo utilizado em cada tratamento influencia de maneira significativa a massa específica dos sólidos conforme o tipo de água utilizado para sua irrigação.

7.1.5 Massa específica saturada

As médias obtidas para os níveis de massa específica saturada, de acordo com respectivo tratamento, assim como os resultados do teste de Tukey estão apresentados no Quadro 12.

Quadro 12. Valores encontrados para massa específica saturada (g.cm^{-3}).

S1				S2			
	L1	L2	L3		L1	L2	L3
E1	1,80 aA	1,80 aA	1,89 aA	E1	1,52 aA	1,66 aA	1,72 aB
E2	1,57 bA	1,41 bA	1,43 bA	E2	1,34 aA	1,61 aA	1,52 aA
E3	1,23 bA	1,34 bA	1,39 bA	E3	1,25 bA	1,36 bA	1,46 bB

Legenda: S1 – solo de textura grossa; S2 - solo de textura fina; L1 – lodo da Estação de Tratamento de Esgoto do Lageado; L2 – lodo da Estação de Tratamento de Esgoto de Franca; L3 – lodo da Estação de Tratamento de Água de Botucatu; E1 – primeira época de amostragem; E2 – segunda época de amostragem; E3 – terceira época de amostragem. Médias seguidas da mesma letra não diferenciam ao nível de 5% de probabilidade; letras minúsculas comparam médias de épocas; maiúsculas, de tipo de lodo.

Tanto para o solo de textura fina quanto para o solo de textura grossa observa-se um decréscimo significativo nas médias com o passar do tempo, independente do tipo de lodo utilizado no tratamento.

Para o solo de textura fina, tanto na primeira quanto na terceira época de amostragem, pode-se observar um acréscimo nas médias conforme os tipos de lodos utilizados. Este fato não se repete para o solo de textura grossa.

7.1.6 Massa específica submersa

As médias obtidas para os níveis de massa específica submersa, de acordo com respectivo tratamento, assim como os resultados do teste de Tukey estão apresentados no Quadro 13.

Quadro 13. Valores encontrados para massa específica submersa (g.cm^{-3}).

S1				S2			
	L1	L2	L3		L1	L2	L3
E1	0,80 aA	0,80 aA	0,89 aA	E1	0,52 aA	0,66 aA	0,72 aB
E2	0,57 bA	0,41 bA	0,43 bA	E2	0,34 aA	0,61 aB	0,52 bB
E3	0,23 bA	0,34 bA	0,39 bA	E3	0,25 bA	0,36 bA	0,46 bB

Legenda: S1 – solo de textura grossa; S2 - solo de textura fina; L1 – lodo da Estação de Tratamento de Esgoto do Lageado; L2 – lodo da Estação de Tratamento de Esgoto de Franca; L3 – lodo da Estação de Tratamento de Água de Botucatu; E1 – primeira época de amostragem; E2 – segunda época de amostragem; E3 – terceira época de amostragem. Médias seguidas da mesma letra não diferenciam ao nível de 5% de probabilidade; letras minúsculas comparam médias de épocas; maiúsculas, de tipo de lodo.

As mesmas observações feitas para a massa específica saturada valem para a massa específica submersa.

7.1.7 Grau de saturação

As médias obtidas para os níveis de grau de saturação, de acordo com respectivo tratamento, assim como os resultados do teste de Tukey estão apresentados no Quadro 14.

Quadro 14. Valores encontrados para o grau de saturação (%).

	L1	L2	L3
S1	10,42 aA	8,91 aA	7,72 aA
S2	8,38 aA	8,43 aA	12,16 aA

Legenda: S1 – solo de textura grossa; S2 - solo de textura fina; L1 – lodo da Estação de Tratamento de Esgoto do Lageado; L2 – lodo da Estação de Tratamento de Esgoto de Franca; L3 – lodo da Estação de Tratamento de Água de Botucatu. Médias seguidas da mesma letra não diferenciam ao nível de 5% de probabilidade; letras minúsculas comparam médias de épocas; maiúsculas, de tipo de lodo.

7.1.8 Índice de vazios

As médias obtidas para os níveis de índice de vazios, de acordo com respectivo tratamento, assim como os resultados do teste de Tukey estão apresentados no Quadro 15.

Quadro 15. Valores encontrados para o índice de vazios.

S1	A1			S1	A2		
	L1	L2	L3		L1	L2	L3
E1	0,28 aA	0,81 aA	0,88 aB	E1	0,28 aA	0,81 aA	0,88 aB
E2	1,50 bA	1,29 aA	1,20 aA	E2	0,28 aA	1,20 aB	1,05 aB
E3	1,85 bA	1,28 aA	1,51 bA	E3	2,16 aA	1,56 aB	1,25 bB

S2	A1			S2	A2		
	L1	L2	L3		L1	L2	L3
E1	1,26 aA	1,19 aA	1,17 aA	E1	1,26 aA	1,16 aA	1,17 aA
E2	1,49 aA	1,17 aA	1,43 aA	E2	1,75 aA	1,19 aA	1,35 aA
E3	1,94 bA	1,61 aA	1,14 aB	E3	2,16 bA	1,57 aB	1,54 aB

Legenda: S1 – solo de textura grossa; S2 - solo de textura fina; L1 – lodo da Estação de Tratamento de Esgoto do Lageado; L2 – lodo da Estação de Tratamento de Esgoto de Franca; L3 – lodo da Estação de Tratamento de Água de Botucatu; E1 – primeira época de amostragem; E2 – segunda época de amostragem; E3 – terceira época de amostragem; A1 – água tratada pela SABESP; A2 – água residuária. Médias seguidas da mesma letra não diferenciam ao nível de 5% de probabilidade; letras minúsculas comparam médias de épocas; maiúsculas, de tipo de lodo.

O índice de vazios é influenciado de maneira significativa conforme mudam-se o tipo de solo e a água utilizada para a irrigação de seus tratamentos, e também sofre influência do tempo de interação.

7.1.9 Massa específica aparente seca

As médias obtidas para os níveis de massa específica aparente seca, de acordo com respectivo tratamento, assim como os resultados do teste de Tukey estão apresentados no Quadro 16.

Quadro 16. Valores encontrados para a massa específica aparente seca (g.cm^{-3})

S1	A1			S1	A2		
	L1	L2	L3		L1	L2	L3
E1	1,39 aA	1,54 aA	1,40 aA	E1	1,39 aA	1,54 aA	1,40 aA
E2	0,98 bA	1,17 bA	1,17 bA	E2	1,39 aA	1,17 bA	1,33 aA
E3	0,94 bA	1,19 bB	1,06 bB	E3	0,76 bA	1,08 bB	1,18 aB

S2		A1			S2		A2		
		L1	L2	L3		L1	L2	L3	
E1		1,05 aA	1,20 aA	1,21 aA	E1	1,05 aA	1,20 aA	1,21 aA	
E2		1,01 aA	1,06 aA	1,10 aA	E2	0,94 aA	1,20 aB	1,10 aB	
E3		0,90 aA	1,03 aA	1,17 aB	E3	0,80 bA	1,04 aB	1,09 aB	

Legenda: S1 – solo de textura grossa; S2 - solo de textura fina; L1 – lodo da Estação de Tratamento de Esgoto do Lageado; L2 – lodo da Estação de Tratamento de Esgoto de Franca; L3 – lodo da Estação de Tratamento de Água de Botucatu; E1 – primeira época de amostragem; E2 – segunda época de amostragem; E3 – terceira época de amostragem; A1 – água tratada pela SABESP; A2 – água residuária. Médias seguidas da mesma letra não diferenciam ao nível de 5% de probabilidade; letras minúsculas comparam médias de épocas; maiúsculas, de tipo de lodo.

O mesmo comportamento observado para o índice de vazios vale para a massa específica aparente seca, com exceção para o tratamento de solo com textura fina irrigado com água residuária (S2A1), onde as médias não variam de forma significativa conforme o tempo de interação.

7.2 Condutividade hidráulica

7.2.1 Primeira época de amostragem

Os valores obtidos para a condutividade hidráulica de solo saturado das amostras obtidas na primeira época de amostragem foram comparados e analisados em relação ao solo sem adição de lodo, conforme mostra o quadro 17.

Quadro 17. Comparação entre as condutividades hidráulica da primeira época de amostragem.

Amostra	Und	K_o amostra	K_o parâmetro	Diferença	Aumento	%	Efeito
2-1-1-1	cm.s ⁻¹	0,044361	0,003486	0,040875	11,73	1172,5	Positivo
2-2-2-6	cm.s ⁻¹	0,039117	0,003486	0,035631	10,22	1022,1	Positivo
1-1-1-1	cm.s ⁻¹	0,045271	0,0021496	0,0431214	20,06	2006,0	Positivo
1-3-1-8	cm.s ⁻¹	0,0094313	0,0021496	0,0072817	3,39	338,7	Positivo
1-2-1-5	cm.s ⁻¹	0,022918	0,0021496	0,0207684	9,66	966,2	Positivo
2-3-2-7	cm.s ⁻¹	0,015303	0,003486	0,011817	3,39	339,0	Positivo
2-1-1-2	cm.s ⁻¹	0,044361	0,003486	0,040875	11,73	1172,5	Positivo

2-2-2-4	cm.s ⁻¹	0,039177	0,003486	0,035691	10,24	1023,8	Positivo
1-1-1-2	cm.s ⁻¹	0,045271	0,0021496	0,0431214	20,06	2006,0	Positivo
1-3-1-9	cm.s ⁻¹	0,0094313	0,0021496	0,0072817	3,39	338,7	Positivo
1-2-1-6	cm.s ⁻¹	0,02918	0,0021496	0,0270304	12,57	1257,5	Positivo
2-3-2-8	cm.s ⁻¹	0,015303	0,003486	0,011817	3,39	339,0	Positivo
2-1-1-3	cm.s ⁻¹	0,044361	0,003486	0,040875	11,73	1172,5	Positivo
2-2-2-5	cm.s ⁻¹	0,039177	0,003486	0,035691	10,24	1023,8	Positivo
1-1-1-3	cm.s ⁻¹	0,045271	0,0021496	0,0431214	20,06	2006,0	Positivo
1-3-1-7	cm.s ⁻¹	0,0094313	0,0021496	0,0072817	3,39	338,7	Positivo
1-2-1-4	cm.s ⁻¹	0,02918	0,0021496	0,0270304	12,57	1257,5	Positivo
2-3-2-9	cm.s ⁻¹	0,015303	0,003486	0,011817	3,39	339,0	Positivo
2-1-1-7	cm.s ⁻¹	0,044361	0,003486	0,040875	11,73	1172,5	Positivo
2-2-2-1	cm.s ⁻¹	0,039177	0,003486	0,035691	10,24	1023,8	Positivo
1-1-2-4	cm.s ⁻¹	0,045271	0,0021496	0,0431214	20,06	2006,0	Positivo
1-3-2-4	cm.s ⁻¹	0,0094313	0,0021496	0,0072817	3,39	338,7	Positivo
1-2-1-1	cm.s ⁻¹	0,022918	0,0021496	0,0207684	9,66	966,2	Positivo
2-3-1-7	cm.s ⁻¹	0,015303	0,003486	0,011817	3,39	339,0	Positivo
2-1-1-8	cm.s ⁻¹	0,044361	0,003486	0,040875	11,73	1172,5	Positivo
2-2-2-2	cm.s ⁻¹	0,039177	0,003486	0,035691	10,24	1023,8	Positivo
1-1-2-5	cm.s ⁻¹	0,045271	0,0021496	0,0431214	20,06	2006,0	Positivo
1-3-2-5	cm.s ⁻¹	0,0094313	0,0021496	0,0072817	3,39	338,7	Positivo
1-2-1-2	cm.s ⁻¹	0,022918	0,0021496	0,0207684	9,66	966,2	Positivo
2-3-1-8	cm.s ⁻¹	0,015303	0,003486	0,011817	3,39	339,0	Positivo
2-1-1-9	cm.s ⁻¹	0,044361	0,003486	0,040875	11,73	1172,5	Positivo
2-2-2-3	cm.s ⁻¹	0,039177	0,003486	0,035691	10,24	1023,8	Positivo
1-1-2-6	cm.s ⁻¹	0,045271	0,0021496	0,0431214	20,06	2006,0	Positivo
1-3-2-6	cm.s ⁻¹	0,0094313	0,0021496	0,0072817	3,39	338,7	Positivo
1-2-1-3	cm.s ⁻¹	0,022918	0,0021496	0,0207684	9,66	966,2	Positivo
2-3-1-9	cm.s ⁻¹	0,015303	0,003486	0,011817	3,39	339,0	Positivo

Legenda: amostra: S-L-A-R. (Solo – Lodo – Água – Repetição), Parâmetro: valor de retenção de água encontrado para cada tipo de solo sem a adição de lodo. K_0 – condutividade hidráulica de solo saturado.

Observando o quadro 17, nota-se que em todas as amostras o efeito da adição de lodo melhora a condutividade hidráulica de solo saturado.

7.2.2 Segunda época de amostragem

Os valores obtidos para a condutividade hidráulica de solo saturado das amostras obtidas na segunda época de amostragem foram comparados e analisados em relação ao solo sem adição de lodo, conforme mostra o quadro 18.

Quadro 18. Comparação entre as condutividades hidráulica da segunda época de amostragem.

Amostra	Und	K_o amostra	K_o parâmetro	Diferença	Aumento	%	Efeito
1-2-2-2	cm.s ⁻¹	0,075688	0,0021496	0,0735384	34,21	3421,0	Positivo
2-3-1-3	cm.s ⁻¹	0,008294	0,003486	0,004808	1,38	137,9	Positivo
1-2-2-1	cm.s ⁻¹	0,004591	0,0021496	0,0024414	1,14	113,6	Positivo
2-3-1-4	cm.s ⁻¹	0,029243	0,003486	0,025757	7,39	738,9	Positivo
2-1-2-8	cm.s ⁻¹	0,03128	0,003486	0,027794	7,97	797,3	Positivo
2-1-2-9	cm.s ⁻¹	0,023118	0,003486	0,019632	5,63	563,2	Positivo
1-1-2-7	cm.s ⁻¹	0,018789	0,0021496	0,0166394	7,74	774,1	Positivo
1-1-2-9	cm.s ⁻¹	0,0633	0,0021496	0,0611504	28,45	2844,7	Positivo
1-2-1-9	cm.s ⁻¹	0,009898	0,0021496	0,0077484	3,60	360,5	Positivo
2-1-2-7	cm.s ⁻¹	0,084965	0,003486	0,081479	23,37	2337,3	Positivo
1-2-2-3	cm.s ⁻¹	0,068865	0,0021496	0,0667154	31,04	3103,6	Positivo
1-3-2-3	cm.s ⁻¹	0,006029	0,0021496	0,0038794	1,80	180,5	Positivo
1-3-1-5	cm.s ⁻¹	0,122563	0,0021496	0,1204134	56,02	5601,7	Positivo
1-1-2-1	cm.s ⁻¹	0,082638	0,0021496	0,0804884	37,44	3744,3	Positivo
1-3-1-4	cm.s ⁻¹	0,214486	0,0021496	0,2123364	98,78	9877,9	Positivo
1-1-2-3	cm.s ⁻¹	0,0119734	0,0021496	0,0098238	4,57	457,0	Positivo
1-1-2-2	cm.s ⁻¹	0,0222547	0,0021496	0,0201051	9,35	935,3	Positivo
1-3-1-6	cm.s ⁻¹	0,011052	0,0021496	0,0089024	4,14	414,1	Positivo
2-1-1-4	cm.s ⁻¹	0,019614	0,003486	0,016128	4,63	462,7	Positivo
1-3-2-1	cm.s ⁻¹	0,020163	0,0021496	0,0180134	8,38	838,0	Positivo
1-3-2-2	cm.s ⁻¹	0,022547	0,0021496	0,0203974	9,49	948,9	Positivo
2-2-1-1	cm.s ⁻¹	0,0067438	0,003486	0,0032578	0,93	93,5	Positivo
2-1-2-9	cm.s ⁻¹	0,07504	0,003486	0,071554	20,53	2052,6	Positivo
1-2-1-8	cm.s ⁻¹	0,043104	0,0021496	0,0409544	19,05	1905,2	Positivo
2-3-1-6	cm.s ⁻¹	0,03612	0,003486	0,032634	9,36	936,1	Positivo
2-2-2-8	cm.s ⁻¹	0,011677	0,003486	0,008191	2,35	235,0	Positivo
2-1-1-6	cm.s ⁻¹	0,086454	0,003486	0,082968	23,80	2380,0	Positivo
2-3-1-5	cm.s ⁻¹	0,033093	0,003486	0,029607	8,49	849,3	Positivo
2-3-1-1	cm.s ⁻¹	0,099553	0,003486	0,096067	27,56	2755,8	Positivo
1-2-1-7	cm.s ⁻¹	0,06404	0,0021496	0,0618904	28,79	2879,2	Positivo

2-3-1-2	cm.s ⁻¹	0,055758	0,003486	0,052272	14,99	1499,5	Positivo
2-2-2-7	cm.s ⁻¹	0,105896	0,003486	0,10241	29,38	2937,8	Positivo
2-2-1-2	cm.s ⁻¹	0,022523	0,003486	0,019037	5,46	546,1	Positivo
2-2-1-3	cm.s ⁻¹	0,113582	0,003486	0,110096	31,58	3158,2	Positivo
2-1-1-5	cm.s ⁻¹	0,038773	0,003486	0,035287	10,12	1012,2	Positivo
1-1-2-8	cm.s ⁻¹	0,026947	0,0021496	0,0247974	11,54	1153,6	Positivo

Legenda: amostra: S-L-A-R. (Solo – Lodo – Água – Repetição), Parâmetro: valor de retenção de água encontrado para cada tipo de solo sem a adição de lodo. K_0 – condutividade hidráulica de solo saturado.

Observando o quadro 18, nota-se que em todas as amostras o efeito da adição de lodo melhora a condutividade hidráulica de solo saturado.

7.2.3 Terceira época de amostragem

Os valores obtidos para a condutividade hidráulica de solo saturado das amostras obtidas na segunda época de amostragem foram comparados e analisados em relação ao solo sem adição de lodo, conforme mostra o quadro 19.

Quadro 19. Comparação entre as condutividades hidráulica da terceira época de amostragem.

Amostra	Und	K_0 amostra	K_0 parâmetro	Diferença	Aumento	%	Efeito
2-3-2-3	cm.s ⁻¹	0,02227	0,003486	0,018784	5,39	538,8	Positivo
1-2-2-5	cm.s ⁻¹	0,0361085	0,0021496	0,0339589	15,80	1579,8	Positivo
1-1-1-4	cm.s ⁻¹	0,0320295	0,0021496	0,0298799	13,90	1390,0	Positivo
1-2-2-8	cm.s ⁻¹	0,075688	0,0021496	0,0735384	34,21	3421,0	Positivo
1-3-1-3	cm.s ⁻¹	0,014797	0,0021496	0,0126474	5,88	588,4	Positivo
2-2-1-5	cm.s ⁻¹	0,022979	0,003486	0,019493	5,59	559,2	Positivo
2-2-1-4	cm.s ⁻¹	0,0763485	0,003486	0,0728625	20,90	2090,1	Positivo
2-1-2-3	cm.s ⁻¹	0,080747	0,003486	0,077261	22,16	2216,3	Positivo
1-1-1-6	cm.s ⁻¹	0,0361085	0,0021496	0,0339589	15,80	1579,8	Positivo
2-2-1-8	cm.s ⁻¹	0,0385	0,003486	0,035014	10,04	1004,4	Positivo
2-3-2-4	cm.s ⁻¹	0,0206935	0,003486	0,0172075	4,94	493,6	Positivo
1-3-1-2	cm.s ⁻¹	0,108407	0,0021496	0,1062574	49,43	4943,1	Positivo
2-3-2-5	cm.s ⁻¹	0,032041	0,003486	0,028555	8,19	819,1	Positivo
1-2-2-6	cm.s ⁻¹	0,0850005	0,0021496	0,0828509	38,54	3854,2	Positivo
2-2-1-9	cm.s ⁻¹	0,0240509	0,003486	0,0205649	5,90	589,9	Positivo
1-2-2-7	cm.s ⁻¹	0,0803443	0,0021496	0,0781947	36,38	3637,6	Positivo

2-1-2-4	cm.s ⁻¹	0,0646375	0,003486	0,0611515	17,54	1754,2	Positivo
1-1-1-7	cm.s ⁻¹	0,0274488	0,0021496	0,0252992	11,77	1176,9	Positivo
1-3-2-9	cm.s ⁻¹	0,0589188	0,0021496	0,0567692	26,41	2640,9	Positivo
2-3-2-2	cm.s ⁻¹	0,0201675	0,003486	0,0166815	4,79	478,5	Positivo
2-2-1-6	cm.s ⁻¹	0,131744	0,003486	0,128258	36,79	3679,2	Positivo
1-3-1-1	cm.s ⁻¹	0,057238	0,0021496	0,0550884	25,63	2562,7	Positivo
2-1-2-2	cm.s ⁻¹	0,0755458	0,003486	0,0720598	20,67	2067,1	Positivo
1-1-1-5	cm.s ⁻¹	0,0231189	0,0021496	0,0209693	9,75	975,5	Positivo
1-1-1-9	cm.s ⁻¹	0,0252838	0,0021496	0,0231342	10,76	1076,2	Positivo
2-2-1-7	cm.s ⁻¹	0,186127	0,003486	0,182641	52,39	5239,3	Positivo
2-3-2-1	cm.s ⁻¹	0,0261043	0,003486	0,0226183	6,49	648,8	Positivo
1-2-2-4	cm.s ⁻¹	0,0605545	0,0021496	0,0584049	27,17	2717,0	Positivo
2-1-2-6	cm.s ⁻¹	0,0945768	0,003486	0,0910908	26,13	2613,0	Positivo
1-2-2-9	cm.s ⁻¹	0,081071	0,0021496	0,0789214	36,71	3671,4	Positivo
1-3-2-8	cm.s ⁻¹	0,10828	0,0021496	0,1061304	49,37	4937,2	Positivo
2-1-2-5	cm.s ⁻¹	0,0573614	0,003486	0,0538754	15,45	1545,5	Positivo
2-3-2-6	cm.s ⁻¹	0,0231359	0,003486	0,0196499	5,64	563,7	Positivo
1-3-2-7	cm.s ⁻¹	0,101297	0,0021496	0,0991474	46,12	4612,4	Positivo
2-1-2-1	cm.s ⁻¹	0,0609994	0,003486	0,0575134	16,50	1649,8	Positivo
1-1-1-8	cm.s ⁻¹	0,0337085	0,0021496	0,0315589	14,68	1468,1	Positivo

Legenda: amostra: S-L-A-R. (Solo – Lodo – Água – Repetição), Parâmetro: valor de retenção de água encontrado para cada tipo de solo sem a adição de lodo. K_0 – condutividade hidráulica de solo saturado.

Observando o quadro 19, nota-se que em todas as amostras o efeito da adição de lodo melhora a condutividade hidráulica de solo saturado.

7.3 Curva de retenção de água no solo

7.3.1 Primeira época de amostragem

Os valores obtidos para a curva de retenção de água no solo para os pontos de capacidade de campo (0,30atm) e para o ponto de murcha permanente (15,0atm) das amostras obtidas na primeira época de amostragem foram comparados e analisados em relação ao solo sem adição de lodo, conforme mostra o quadro 20.

Quadro 20. Análise da curva de retenção de água das amostras.

Amostra	Amostra (%)		Parâmetro (%)		Diferença (%)		% media	Efeito
	0,30 atm	15 atm	0,30 atm	15 atm	0,30 atm	15 atm		
1-3-1-8	16,32	13,20	26,08	24,38	-9,76	-11,18	-10,47	Positivo
1-2-1-5	15,70	13,60	26,08	24,38	-10,38	-10,78	-10,58	Positivo
2-1-1-1	17,51	12,22	25,29	21,08	-7,78	-8,86	-8,32	Positivo
2-3-2-7	14,87	9,40	25,29	21,08	-10,42	-11,68	-11,05	Positivo
2-2-2-6	17,10	13,06	25,29	21,08	-8,19	-8,02	-8,11	Positivo
1-1-1-1	16,47	11,20	26,08	24,38	-9,61	-13,18	-11,40	Positivo
1-3-1-9	16,32	13,20	26,08	24,38	-9,76	-11,18	-10,47	Positivo
1-2-1-6	15,70	13,60	26,08	24,38	-10,38	-10,78	-10,58	Positivo
2-1-1-2	17,51	12,22	25,29	21,08	-7,78	-8,86	-8,32	Positivo
2-3-2-8	14,87	9,40	25,29	21,08	-10,42	-11,68	-11,05	Positivo
2-2-2-4	17,10	13,06	25,29	21,08	-8,19	-8,02	-8,11	Positivo
1-1-1-2	16,47	11,20	26,08	24,38	-9,61	-13,18	-11,40	Positivo
1-3-1-7	16,32	13,20	26,08	24,38	-9,76	-11,18	-10,47	Positivo
1-2-1-4	15,70	13,60	26,08	24,38	-10,38	-10,78	-10,58	Positivo
2-1-1-3	17,51	12,22	25,29	21,08	-7,78	-8,86	-8,32	Positivo
2-3-2-9	14,87	9,40	25,29	21,08	-10,42	-11,68	-11,05	Positivo
2-2-2-5	17,10	13,06	25,29	21,08	-8,19	-8,02	-8,11	Positivo
1-1-1-3	16,47	11,20	26,08	24,38	-9,61	-13,18	-11,40	Positivo
1-3-2-4	16,32	13,20	26,08	24,38	-9,76	-11,18	-10,47	Positivo
1-2-2-1	15,70	13,60	26,08	24,38	-10,38	-10,78	-10,58	Positivo
2-1-1-7	17,51	12,22	25,29	21,08	-7,78	-8,86	-8,32	Positivo
2-3-1-7	14,87	9,40	25,29	21,08	-10,42	-11,68	-11,05	Positivo
2-2-2-1	17,10	13,06	25,29	21,08	-8,19	-8,02	-8,11	Positivo
1-1-2-4	16,47	11,20	26,08	24,38	-9,61	-13,18	-11,40	Positivo
1-3-2-5	16,32	13,20	26,08	24,38	-9,76	-11,18	-10,47	Positivo
1-2-1-2	15,70	13,60	26,08	24,38	-10,38	-10,78	-10,58	Positivo
2-1-1-8	17,51	12,22	25,29	21,08	-7,78	-8,86	-8,32	Positivo
2-3-1-8	14,87	9,40	25,29	21,08	-10,42	-11,68	-11,05	Positivo
2-2-2-2	17,10	13,06	25,29	21,08	-8,19	-8,02	-8,11	Positivo
1-1-2-5	16,47	11,20	26,08	24,38	-9,61	-13,18	-11,40	Positivo
1-3-2-6	16,32	13,20	26,08	24,38	-9,76	-11,18	-10,47	Positivo
1-2-1-3	15,70	13,60	26,08	24,38	-10,38	-10,78	-10,58	Positivo
2-1-1-9	17,51	12,22	25,29	21,08	-7,78	-8,86	-8,32	Positivo
2-3-1-9	14,87	9,40	25,29	21,08	-10,42	-11,68	-11,05	Positivo
2-2-2-3	17,10	13,06	25,29	21,08	-8,19	-8,02	-8,11	Positivo
1-1-2-6	16,47	11,20	26,08	24,38	-9,61	-13,18	-11,40	Positivo

Legenda: amostra: S-L-A-R. (Solo – Lodo – Água – Repetição), Parâmetro: valor de retenção de água encontrado para cada tipo de solo sem a adição de lodo.

Observando o quadro 20, nota-se que em todas as amostras, tanto para o ponto de capacidade de campo quanto para o de murcha permanente, o efeito da adição de lodo melhora a curva de retenção de água no solo, aumentando a quantidade de água disponível no solo.

7.3.2 Segunda época de amostragem

Os valores obtidos para a curva de retenção de água no solo para os pontos de capacidade de campo (0,30atm) e para o ponto de murcha permanente (15,0atm) das amostras obtidas na segunda época de amostragem foram comparados e analisados em relação ao solo sem adição de lodo, conforme mostra o quadro 21.

Quadro 21. Análise da curva de retenção de água das amostras.

Amostra	Amostra (%)		Parâmetro (%)		Diferença (%)		% media	Efeito
	0,30 atm	15 atm	0,30 atm	15 atm	0,30 atm	15 atm		
1-1-2-2	9,94	7,97	26,08	24,38	-16,14	-16,41	-16,28	Positivo
2-1-2-8	17,20	12,01	25,29	21,08	-8,09	-9,07	-8,58	Positivo
2-1-1-5	14,10	11,55	25,29	21,08	-11,19	-9,53	-10,36	Positivo
2-2-1-2	11,64	8,56	25,29	21,08	-13,65	-12,52	-13,09	Positivo
2-2-2-7	17,26	13,06	25,29	21,08	-8,03	-8,02	-8,03	Positivo
2-1-2-9	14,21	11,62	25,29	21,08	-11,08	-9,46	-10,27	Positivo
2-1-2-7	14,10	11,64	25,29	21,08	-11,19	-9,44	-10,32	Positivo
1-1-2-3	16,47	11,10	26,08	24,38	-9,61	-13,28	-11,45	Positivo
1-3-1-5	11,65	8,54	26,08	24,38	-14,43	-15,84	-15,14	Positivo
1-1-2-7	8,80	5,95	26,08	24,38	-17,28	-18,43	-17,86	Positivo
1-3-2-3	16,08	13,20	26,08	24,38	-10,00	-11,18	-10,59	Positivo
2-2-2-9	16,93	12,89	25,29	21,08	-8,36	-8,19	-8,28	Positivo
1-1-2-8	16,27	11,01	26,08	24,38	-9,81	-13,37	-11,59	Positivo
1-1-2-1	8,78	6,03	26,08	24,38	-17,30	-18,35	-17,83	Positivo
2-1-1-4	13,05	11,71	25,29	21,08	-12,24	-9,37	-10,81	Positivo
1-1-2-9	16,15	10,90	26,08	24,38	-9,93	-13,48	-11,71	Positivo
2-2-2-8	17,30	12,96	25,29	21,08	-7,99	-8,12	-8,06	Positivo
1-2-2-3	10,04	9,06	26,08	24,38	-16,04	-15,32	-15,68	Positivo
2-3-1-1	12,17	8,24	25,29	21,08	-13,12	-12,84	-12,98	Positivo
2-2-1-1	10,10	7,13	25,29	21,08	-15,19	-13,95	-14,57	Positivo
1-3-2-2	10,92	9,05	26,08	24,38	-15,16	-15,33	-15,25	Positivo
1-2-1-8	10,13	8,64	26,08	24,38	-15,95	-15,74	-15,85	Positivo
2-3-1-6	14,00	11,25	25,29	21,08	-11,29	-9,83	-10,56	Positivo
1-3-2-1	16,20	13,32	26,08	24,38	-9,88	-11,06	-10,47	Positivo

2-3-1-5	13,87	10,54	25,29	21,08	-11,42	-10,54	-10,98	Positivo
1-2-1-7	10,73	9,30	26,08	24,38	-15,35	-15,08	-15,22	Positivo
2-2-1-3	9,70	6,30	25,29	21,08	-15,59	-14,78	-15,19	Positivo
1-3-1-4	10,66	8,52	26,08	24,38	-15,42	-15,86	-15,64	Positivo
2-1-1-6	17,94	15,97	25,29	21,08	-7,35	-5,11	-6,23	Positivo
2-3-1-3	13,30	11,15	25,29	21,08	-11,99	-9,93	-10,96	Positivo
1-2-1-9	10,72	9,30	26,08	24,38	-15,36	-15,08	-15,22	Positivo
1-3-1-6	10,70	8,50	26,08	24,38	-15,38	-15,88	-15,63	Positivo
2-3-1-2	17,50	15,98	25,29	21,08	-7,79	-5,10	-6,45	Positivo
1-2-2-1	10,09	9,03	26,08	24,38	-15,99	-15,35	-15,67	Positivo
1-2-2-2	12,57	11,46	26,08	24,38	-13,51	-12,92	-13,22	Positivo
2-3-1-4	12,00	8,08	25,29	21,08	-13,29	-13,00	-13,15	Positivo
1-1-2-2	9,94	7,97	26,08	24,38	-16,14	-16,41	-16,28	Positivo

Legenda: amostra: S-L-A-R. (Solo – Lodo – Água – Repetição), Parâmetro: valor de retenção de água encontrado para cada tipo de solo sem a adição de lodo.

Observando o quadro 21, nota-se que em todas as amostras, tanto para o ponto de capacidade de campo quanto para o de murcha permanente, o efeito da adição de lodo melhora a curva de retenção de água no solo.

7.3.3 Terceira época de amostragem

Os valores obtidos para a curva de retenção de água no solo para os pontos de capacidade de campo (0,30atm) e para o ponto de murcha permanente (15,0atm) das amostras obtidas na terceira época de amostragem foram comparados e analisados em relação ao solo sem adição de lodo, conforme mostra o quadro 22.

Quadro 22. Análise da curva de retenção de água das amostras.

Amostra	Amostra (%)		Parâmetro (%)		Diferença (%)		% media	Efeito
	0,30 atm	15 atm	0,30 atm	15 atm	0,30 atm	15 atm		
2-3-2-3	3,40	0,66	25,29	21,08	-21,89	-20,42	-21,16	Positivo
1-2-2-5	8,06	6,47	26,08	24,38	-18,02	-17,91	-17,97	Positivo
1-1-1-4	5,34	3,58	26,08	24,38	-20,74	-20,80	-20,77	Positivo
1-2-2-8	9,69	8,47	26,08	24,38	-16,39	-15,91	-16,15	Positivo
1-3-1-3	15,25	14,14	26,08	24,38	-10,83	-10,24	-10,54	Positivo
2-2-1-5	7,60	5,13	25,29	21,08	-17,69	-15,95	-16,82	Positivo

2-2-1-4	10,12	2,73	25,29	21,08	-15,17	-18,35	-16,76	Positivo
2-1-2-3	6,67	5,35	25,29	21,08	-18,62	-15,73	-17,18	Positivo
1-1-1-6	5,01	3,67	26,08	24,38	-21,07	-20,71	-20,89	Positivo
2-2-1-8	5,30	2,95	25,29	21,08	-19,99	-18,13	-19,06	Positivo
2-3-2-4	9,10	5,92	25,29	21,08	-16,19	-15,16	-15,68	Positivo
1-3-1-2	9,40	7,45	26,08	24,38	-16,68	-16,93	-16,81	Positivo
2-3-2-5	9,22	6,52	25,29	21,08	-16,07	-14,56	-15,32	Positivo
1-2-2-6	9,35	6,40	26,08	24,38	-16,73	-17,98	-17,36	Positivo
2-2-1-9	10,68	8,34	25,29	21,08	-14,61	-12,74	-13,68	Positivo
1-2-2-7	9,22	6,39	26,08	24,38	-16,86	-17,99	-17,43	Positivo
2-1-2-4	7,37	4,92	25,29	21,08	-17,92	-16,16	-17,04	Positivo
1-1-1-7	5,50	3,58	26,08	24,38	-20,58	-20,80	-20,69	Positivo
1-3-2-9	8,14	6,44	26,08	24,38	-17,94	-17,94	-17,94	Positivo
2-3-2-2	3,47	0,00	25,29	21,08	-21,82	-21,08	-21,45	Positivo
2-2-1-6	5,60	3,02	25,29	21,08	-19,69	-18,06	-18,88	Positivo
1-3-1-1	4,40	2,10	26,08	24,38	-21,68	-22,28	-21,98	Positivo
2-1-2-2	7,70	5,90	25,29	21,08	-17,59	-15,18	-16,39	Positivo
1-1-1-5	6,47	4,69	26,08	24,38	-19,61	-19,69	-19,65	Positivo
1-1-1-9	5,90	4,40	26,08	24,38	-20,18	-19,98	-20,08	Positivo
2-2-1-7	9,70	6,31	25,29	21,08	-15,59	-14,77	-15,18	Positivo
2-3-2-1	8,90	6,97	26,08	24,38	-17,18	-17,41	-17,30	Positivo
1-2-2-4	8,50	6,30	26,08	24,38	-17,58	-18,08	-17,83	Positivo
2-1-2-6	5,40	3,70	25,29	21,08	-19,89	-17,38	-18,64	Positivo
1-2-2-9	5,00	3,63	26,08	24,38	-21,08	-20,75	-20,92	Positivo
1-3-2-8	9,69	8,44	26,08	24,38	-16,39	-15,94	-16,17	Positivo
2-1-2-5	9,22	6,72	25,29	21,08	-16,07	-14,36	-15,22	Positivo
2-3-2-6	7,79	6,20	25,29	21,08	-17,50	-14,88	-16,19	Positivo
1-3-2-7	8,35	6,84	26,08	24,38	-17,73	-17,54	-17,64	Positivo
2-1-2-1	3,28	1,18	25,29	21,08	-22,01	-19,90	-20,96	Positivo
1-1-1-8	6,44	3,68	26,08	24,38	-19,64	-20,70	-20,17	Positivo

Legenda: amostra: S-L-A-R. (Solo – Lodo – Água – Repetição), Parâmetro: valor de retenção de água encontrado para cada tipo de solo sem a adição de lodo.

Observando o quadro 22, nota-se que em todas as amostras, tanto para o ponto de capacidade de campo quanto para o de murcha permanente, o efeito da adição de lodo melhora a curva de retenção de água no solo.

8. CONCLUSÃO

Tendo em vista os resultados obtidos pode-se concluir que, nas condições do experimento com os lodos proveniente da Estação de Tratamento de Esgoto de Franca, da Estação de Tratamento de Esgoto do Lageado e da Estação de Tratamento de Água de Botucatu, em relação aos aspectos físicos, podem ser usados na agricultura como condicionadores de solo sem restrições.

A incorporação dos lodos de tratamento de água e de esgoto aos dois tipos de solo aumentou os parâmetros de condutividade hidráulica de solo saturado, melhorou os índices físicos e também as propriedades da curva de retenção de água no solo, com exceção dos índices físicos de algumas amostras da primeira época de amostragem, devido ao pouco tempo de interação entre o solo e a amostra.

Comparando-se os lodos provenientes das Estações de Tratamento de Esgoto de Franca e do Lageado e da Estação de Tratamento de Água de Botucatu quando aplicados no solo, observa-se que o lodo proveniente da Estação de Tratamento de Esgoto do Lageado é o que melhor resultado apresentou.

O solo arenoso foi o que apresentou um resultado melhor em seus aspectos físicos após a adição do lodo, em relação ao solo argiloso.

Comparando-se o efeito da adição de lodo ao solo entre as épocas de amostragem, observa-se que quanto maior o tempo de interação, melhores são os resultados obtidos.

Temos assim, uma opção para o uso de lodos que sobram nas Estações de Tratamento de Água e Esgoto, podendo trazer benefícios para as condições físicas do solo e seu posterior cultivo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDREOLI, C. et. al.. *Tratamento e disposição do lodo de esgoto no Paraná*. Sanare 1:10-15, 1994.
- BRANCO, S. M.. *Hidrobiologia aplicada á Engenharia Sanitária*. CETESB / ASCETESB, 3. ed., São Paulo, 1986.
- BETTIOL, W. et. al.. *Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto*. Jaguariúna: Empbrapa Meio Ambiente, 2000.
- CAPUTO, H. P.. *Mecânica dos solos e suas aplicações*. Livros Técnicos e científicos, 4. ed., Rio de Janeiro, 1980.
- CASTRO, L.A.R. et. al.. *Efeitos do lodo de esgoto como recuperador de áreas degradadas com finalidade agrícola*. V Simpósio Nacional Sobre Recuperação de Áreas Degradada. Anais, junho 2002.
- DACACH, N. G.. *Saneamento básico*. Livros Técnicos e Científicos, 1. ed., Rio de Janeiro, 1979.
- DELFEIPO, B. V. et. al.. *Eficiência agrônômica do lodo de esgoto proveniente de uma indústria siderúrgica*. R. Bras. Ci. Solo, 15:389-393, 1991.
- FIEST, L. et. al.. *Efeitos da aplicação do lodo de esgoto nas propriedades físicas do solo*. Sanare 9:48-57, 1998.
- GALDO, M. V. et. al.. *Atributos químicos e produção de milho em um Latossolo Vermelho Eutroférico tratado com lodo de esgoto*. R. Bras. Ci. Solo, 28:569-577, 2004.
- GUERRINI, I. A. et. al.. *Atributos físicos e químicos de substratos compostos por biossólidos e casca de arroz carbonizada*. R. Bras. Ci. Solo, vol. 28, 2004.

- JORGE, J. A. et. al.. *Condições físicas de uma Latossolo Vermelho-Escuro quatro anos após aplicação de lodo de esgoto e calcário*. R. Bras. Ci. Solo, 1991.
- LEON, S. G. et. al.. *Tratamento e uso de águas residuárias*. Tradução de GHERY, H. R. et. al.. Campina Grande: UFPB, 1999.
- WISNIEWSKI, C. et. al.. *Uso do lodo de esgoto da ETE-Belém na recuperação de áreas degradadas por mineração de calcário*. Sanare 5, 1996.
- MARQUES, M. O. et. al. *Desempenho de plantas de milho cultivadas em solos acrescidos de biossólido oriundo da estação de tratamento de esgoto de Barueri, localizada na região Metropolitana de São Paulo*. In: CONGRESSO INTERAMERICANODE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 27., 2000, Porto Alegre. **Anais eletrônicos...**Porto Alegre, ABES, 2000.
- Disponível em:< <http://www.cepis.ops-oms.org/bvsaidis/aresidua/i-085.pdf>> Acesso em 16 de jul. 2004.~
- MATTIAZZO-PREZOTTO, M. E.. *Disposição de lodo de esgoto e composto urbano num latossolo vermelho-amarelo cultivado com cana-de-açúcar*. Piracicaba, 2000. 246p.
- Tese (doutorado) - Escola Superior de Agronomia “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.
- MELO, W. J. et. al.. *Efeito de doses crescentes de lodo de esgoto sobre frações da matéria orgânica e CTC de um Latossolo cultivado com cana-de-açúcar*. R. Bras. Ci. Solo, 18:449-455, 1994.
- MORAIS, S. M. J. et. al.. *Uso do lodo de esgoto da Corsan – Santa Maria (RS), comparado com outros substratos orgânicos*. Sanare 6:44-49, 1997.

- NASCIMENTO, M. B. H. et. al.. Utilização de água residuária e biossólido na cultura da mamona: crescimento e desenvolvimento. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MAMONA, 2004, Campina Grande.
- OLIVEIRA, F. C. et. al.. *Efeitos da aplicação de lodo de esgoto em Latossolo Vermelho-Escuro textura média e em sorgo granífero*. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS DO SOLO (24.: 1993: Goiânia). Anais... Goiânia: SBCS, 1994. 249-250.
- PAGANINI, W. S.. *Disposição de esgotos no solo*. Fundo Editorial da AESABESP, 2. ed., São Paulo, 1997.
- PORTO, R. M.. *Hidráulica básica*. EESC-USP, 2. ed., São Carlos, 1999.
- SILVA, J. E. et. al.. *Alternativa agronômica para o biossólido: a experiência de Brasília*. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2000.
- STRINGHETA, A. C. O. et. al.. *Caracterização física de substratos contendo composto de lixo urbano e casca de arroz carbonizada como condicionadores*. R. Bras. Ci. Solo, 21:155-159, 1997.
- TSADILAS, C. D. et. al.. *Influence of sewage sludge application on soil properties and on the distribution and availability of heavy metals fractions*. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.*, 26:2603-2619, 1995.
- TSUTIYA, M. T.. *Coleta e transporte de esgoto sanitário*. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1. ed., São Paulo, 1999.
- TSUTIYA, M. T. *Qualidade e perspectiva de produção de biossólido no Brasil*. In: WORKSHOP SOBRE USO DE BIOSSÓLIDOS NA AGRICULTURA, 2., 2000, Jaboticabal. **Anais eletrônicos...**Jaboticabal:UNESP, 2000.

Disponível em: <<http://www.fcav.unesp.br/bioquimica/a%20p%C3%A1gina/P%C3%A1gina%20do%20Workshop/PALMILTON.htm>>

Acesso em 16 jul. 2004.

TSUTIYA, M. T.. *Alternativas de disposição final de biossólidos*, In: TSUTIYA, M. T. et al.. *Biossólidos na agricultura*. São Paulo: SABESP, 2001. ap. 5. p. 133-180.