

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

LETICIA MARIA NOCKO

DESENVOLVIMENTO DE MODELOS CONSTITUTIVOS PARA DESCRIÇÃO DO  
COMPORTAMENTO REOLÓGICO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

CURITIBA

2013

LETICIA MARIA NOCKO

DESENVOLVIMENTO DE MODELOS CONSTITUTIVOS PARA DESCRIÇÃO DO  
COMPORTAMENTO REOLÓGICO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, Área de Concentração em Geotecnia, Departamento de Construção Civil, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Construção Civil.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Dell'Avanzi

CURITIBA

2013

N758

Nocko, Leticia Maria

Desenvolvimento de modelos constitutivos para descrição do comportamento reológico de resíduos sólidos urbanos/ Leticia Maria Nocko. – Curitiba, 2013.

149f. : il., tab., graf.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Construção Civil.

Orientador: Eduardo Dell'Avanzi

1. Resíduos sólidos. 2. Aterro sanitário. 3. Biodegradação.  
I. Dell'Avanzi, Eduardo. II. Universidade Federal do Paraná.  
III. Título.

CDD: 628.44564

## TERMO DE APROVAÇÃO

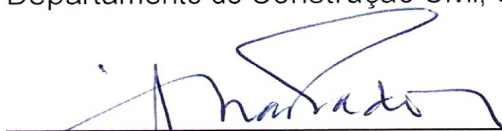
LETICIA MARIA NOCKO

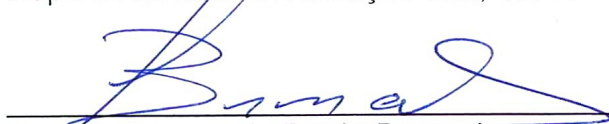
### DESENVOLVIMENTO DE MODELOS CONSTITUTIVOS PARA DESCRIÇÃO DO COMPORTAMENTO REOLÓGICO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

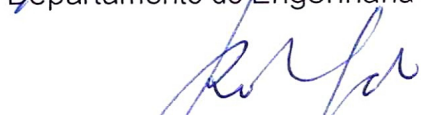
Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, Área de Concentração em Geotecnia, Departamento de Construção Civil, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, pela seguinte banca examinadora:

Orientador:

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Eduardo Dell'Avanzi  
Departamento de Construção Civil, UFPR

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Roberto Dalledone Machado  
Departamento de Construção Civil, UFPR

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. George de Paula Bernardes  
Departamento de Engenharia Civil, UNESP

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Roberto Francisco de Azevedo  
Departamento de Engenharia Civil, UFV

Curitiba, 12 de abril de 2013.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao meu orientador, Eduardo Dell'Avanzi, pela oportunidade e confiança, pela paciência para sempre esclarecer as minhas dúvidas e pelo exemplo de dedicação à pesquisa.

Aos meus pais, Oswaldo e Lourdes, e minhas irmãs, Lissa e Larissa, por serem meu porto seguro e pelo carinho e compreensão em todos os momentos.

À minha avó, Dona Ângela, pela força e por me apoiar em minhas decisões e sempre torcer pelo meu sucesso.

Ao meu namorado, Felipe, pelo apoio e pelos momentos de descontração, e por me incentivar sempre, mesmo quando nada parecia fazer sentido.

Aos amigos, pelo apoio incondicional e pela compreensão. Não teria graça sem vocês.

Aos colegas do grupo de pesquisa, do LAGEMA e do mestrado, em especial à Adhara e ao Leandro, pela ajuda, pelo companheirismo e pelo incentivo nos momentos mais difíceis.

Ao técnico de laboratório Ricardo Volert, pelas conversas e companhia durante os longos ensaios realizados.

Ao CESEC, por sempre acolher tão bem seus alunos.

À CAPES, pelo suporte financeiro durante o mestrado.

À Universidade Federal do Paraná, minha segunda casa, por tornar este trabalho possível.

## RESUMO

O estudo das propriedades dos resíduos sólidos urbanos (RSU) é essencial para garantir o melhor funcionamento de um aterro sanitário. A previsão do comportamento mecânico desses resíduos permite evitar deslizamentos de maciços de lixo e calcular os recalques das células do aterro, resultando em uma maior segurança durante a operação do aterro e um melhor aproveitamento do espaço disponível para a destinação dos resíduos. Neste trabalho propõe-se um novo modelo de previsão do comportamento mecânico dos RSU baseado no comportamento das curvas tensão x deformação resultantes de ensaios edométricos. Para calibração das equações constitutivas do modelo foram realizados ensaios edométricos com corpos de prova compostos por uma mistura de solo e coloide, visto que essa mistura simula o comportamento mecânico dos RSU e possibilita obter menores custos e amostras mais homogêneas quando comparada com amostras de resíduos. O modelo foi validado com dados encontrados na literatura para ensaios edométricos com RSU, mostrando-se condizente com a realidade e adequado para previsão do comportamento mecânico desses resíduos. As equações constitutivas propostas mostraram-se satisfatórias, sendo capazes de descrever o comportamento dos parâmetros do modelo para diversos tipos de resíduos ensaiados.

Palavras-chave: Resíduos Sólidos Urbanos. Aterros sanitários. Biodegradação. Modelo edométrico. Recalques. Solo-coloide.

## **ABSTRACT**

The study of municipal solid waste (MSW) characteristics, such as mechanical behavior and degradation rate, is essential to ensure a proper operation of a landfill. The prediction of the mechanical behavior of MSW contributes to avoid landfill failures, allowing the evaluation of the settlements, leachate and gas generation within the landfill's cells. As a result, more safe practice procedures can be adopted during landfill operation, including maximize the space for waste disposition. The present work proposes a new model to predict the MSW mechanical behavior based on stress-strain results of oedometer tests. To calibrate the model's constitutive equations oedometer tests were carried out with samples constituted by a mixture of soil and colloid, once this mixture simulates MSW's mechanical behavior and allows obtaining smaller costs and more homogeneous specimens when compared with MSW specimens. The model was validated with literature data for oedometer tests realized with MSW, and was proved to be consistent with validating data and appropriate to predict MSW's mechanical behavior. The proposed constitutive equations were proved to be satisfying, being capable of describing the behavior of the model's parameters for different kinds of MSW.

Key words: Municipal Solid Waste. Sanitary landfills. Biodegradation. Oedometer model. Settlements. Soil-colloid.

## LISTA DE FIGURAS

- FIGURA 2.1. PORCENTAGENS DE RESÍDUOS SÓLIDOS DOMICILIARES E/OU PÚBLICOS ENVIADA ÀS PRINCIPAIS UNIDADES DE DESTINO FINAL.....28
- FIGURA 2.2. ESQUEMA DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS E CHORUME EM UMA CÉLULA DE ATERRO DE RSU. FONTE: JOHANNESSEN (1999).....30
- FIGURA 2.3. VARIAÇÃO DA MASSA DE MATÉRIA ORGÂNICA COM O TEMPO, CONSIDERANDO 50% DE MASSA BIODEGRADADA. FONTE: NOCKO (2010).....31
- FIGURA 2.4. CURVAS TENSÃO X DEFORMAÇÃO OBTIDAS A PARTIR DE ENSAIOS TRIAXIAIS REALIZADOS COM RSU NOVO. FONTE: MACHADO ET AL (2005).....44
- FIGURA 2.5. CURVAS TENSÃO-DEFORMAÇÃO OBTIDAS A PARTIR DE ENSAIOS TRIAXIAIS REALIZADOS COM RSU COM 15 ANOS DE IDADE. FONTE: MACHADO ET AL (2002).....44
- FIGURA 2.6. RESPOSTA DA CURVA TENSÃO X DEFORMAÇÃO DOS RSU EM FUNÇÃO DA TAXA DE BIODEGRADAÇÃO. ....45
- FIGURA 2.7. CURVA EXPERIMENTAL MOSTRANDO A VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA DOS RSU A PARTIR DA VARIAÇÃO DA TAXA DE CARREGAMENTO. FONTE: BRAY ET AL (2009).....46
- FIGURA 2.8. APLICAÇÃO DO MODELO DE OTSUKA (2010) E NOCKO (2010) PARA VERIFICAÇÃO DO GANHO DE RESISTÊNCIA DOS RSU EM FUNÇÃO DO AUMENTO DA TAXA DE CARREGAMENTO. ....47
- FIGURA 2.9. VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA DOS RSU EM FUNÇÃO DA TAXA DE TENSÃO DESVIADORA APLICADA. FONTE: NOCKO (2010).....48
- FIGURA 2.10. CURVAS TENSÃO X DEFORMAÇÃO OBTIDAS A PARTIR DE ENSAIOS EDOMÉTRICOS REALIZADOS COM RSU SINTÉTICOS. FONTE: ADAPTADO DE CHEN ET AL (2010). ....49
- FIGURA 2.11. VARIAÇÃO DO ÂNGULO DE ATRITO INTERNO DOS RSU EM FUNÇÃO DO TEOR DE MATÉRIA ORGÂNICA. FONTE: NOCKO (2010) .....52
- FIGURA 2.12. RELAÇÃO ENTRE COESÃO E ÂNGULO DE ATRITO INTERNO PARA RSU. FONTE: ADAPTADO DE SINGH E MURPHY (1990). ....54



FIGURA 2.13. VARIAÇÃO DO INTERCEPTO COESIVO DOS RSU EM FUNÇÃO DO TEOR DE MATÉRIA ORGÂNICA. FONTE: NOCKO (2010).....	55
FIGURA 2.14. MODELO PROPOSTO POR OTSUKA (2010) E NOCKO (2010) APLICADO AOS DADOS DE ENSAIOS TRIAXIAIS DE CARVALHO (1999), REALIZADOS COM TENSÃO CONFINANTE DE 200 KPA. FONTE: NOCKO (2010).....	61
FIGURA 3.1. AMOSTRAS DE SOLO-COLOIDE EM CORTE PARA ANÁLISE DA HOMOGENEIDADE DA MISTURA: (A) 87% DE COLOIDE, (B) 59% DE COLOIDE E (C) 95% DE COLOIDE.....	68
FIGURA 3.2. BIPARTIDO DE PVC E AMOSTRA DE SOLO-COLOIDE PRONTA PARA O CRAVAMENTO DO ANEL DE ADENSAMENTO.....	69
FIGURA 3.3. CORPO DE PROVA CONSTITUÍDO POR MISTURA SOLO-COLOIDE COM 43% EM MASSA DE COLOIDE.....	70
FIGURA 3.4. CORPO DE PROVA CONSTITUÍDO SOMENTE POR GELATINA (100% COLOIDE).....	70
FIGURA 3.5. VAZAMENTO DE MATERIAL DO CORPO DE PROVA CAUSADO POR APLICAÇÃO DE CARREGAMENTOS MUITO GRANDES NO ENSAIO EDMÉTRICO.....	73
FIGURA 3.6. CURVA GRANULOMÉTRICA OBTIDA PARA O SOLO UTILIZADO NA MISTURA SOLO-COLOIDE.....	74
FIGURA 3.7. CURVAS DE ALTURA DO CORPO DE PROVA X RAIZ DO TEMPO PARA OS ESTÁGIOS DE CARREGAMENTO DO CORPO DE PROVA COM 0% DE COLOIDE.....	76
FIGURA 3.8. CURVAS DE ALTURA DO CORPO DE PROVA X RAIZ DO TEMPO PARA OS ESTÁGIOS DE CARREGAMENTO DO CORPO DE PROVA COM 26% DE COLOIDE.....	77
FIGURA 3.9. CURVAS DE ALTURA DO CORPO DE PROVA X RAIZ DO TEMPO PARA OS ESTÁGIOS DE CARREGAMENTO DO CORPO DE PROVA COM 38% DE COLOIDE.....	77
FIGURA 3.10. CURVAS DE ALTURA DO CORPO DE PROVA X RAIZ DO TEMPO PARA OS ESTÁGIOS DE CARREGAMENTO DO CORPO DE PROVA COM 43% DE COLOIDE.....	78
FIGURA 3.11. CURVAS DE ALTURA DO CORPO DE PROVA X RAIZ DO TEMPO PARA OS ESTÁGIOS DE CARREGAMENTO DO CORPO DE PROVA COM 47% DE COLOIDE.....	78

FIGURA 3.12. CURVAS DE ALTURA DO CORPO DE PROVA X RAIZ DO TEMPO PARA OS ESTÁGIOS DE CARREGAMENTO DO CORPO DE PROVA COM 74% DE COLOIDE.....	79
FIGURA 3.13. CURVAS DE ALTURA DO CORPO DE PROVA X RAIZ DO TEMPO PARA OS ESTÁGIOS DE CARREGAMENTO DO CORPO DE PROVA COM 100% DE COLOIDE.....	80
FIGURA 3.14. GRÁFICO DO ÍNDICE DE VAZIOS X LOG DA PRESSÃO OBTIDO NO ENSAIO EDOMÉTRICO REALIZADO COM CORPO DE PROVA COM 0% DE COLOIDE (AREIA SECA). ....	81
FIGURA 3.15. GRÁFICO DO ÍNDICE DE VAZIOS X LOG DA PRESSÃO OBTIDO NO ENSAIO EDOMÉTRICO REALIZADO COM CORPO DE PROVA COM 26% DE COLOIDE. ....	82
FIGURA 3.16. GRÁFICO DO ÍNDICE DE VAZIOS X LOG DA PRESSÃO OBTIDO NO ENSAIO EDOMÉTRICO REALIZADO COM CORPO DE PROVA COM 38% DE COLOIDE. ....	82
FIGURA 3.17. GRÁFICO DO ÍNDICE DE VAZIOS X LOG DA PRESSÃO OBTIDO NO ENSAIO EDOMÉTRICO REALIZADO COM CORPO DE PROVA COM 43% DE COLOIDE. ....	83
FIGURA 3.18. GRÁFICO DO ÍNDICE DE VAZIOS X LOG DA PRESSÃO OBTIDO NO ENSAIO EDOMÉTRICO REALIZADO COM CORPO DE PROVA COM 47% DE COLOIDE. ....	83
FIGURA 3.19. GRÁFICO DO ÍNDICE DE VAZIOS X LOG DA PRESSÃO OBTIDO NO ENSAIO EDOMÉTRICO REALIZADO COM CORPO DE PROVA COM 74% DE COLOIDE. ....	84
FIGURA 3.20. COMPARAÇÃO ENTRE AS CURVAS ÍNDICE DE VAZIOS X LOGARITMO DA TENSÃO PARA OS ESTÁGIOS DE CARREGAMENTO DOS ENSAIOS EDOMÉTRICOS. ....	85
FIGURA 3.21. CURVAS TENSÃO X DEFORMAÇÃO OBTIDAS PARA CORPOS DE PROVA COM DIVERSOS TEORES DE COLOIDE. ....	87
FIGURA 3.22. VARIAÇÃO DO MÓDULO TANGENTE (M) EM RELAÇÃO À TENSÃO APLICADA, PARA CADA TEOR DE COLOIDE UTILIZADO. ....	88
FIGURA 3.23. APLICAÇÃO DA EQUAÇÃO DE M PARA OS DADOS EXPERIMENTAIS DO CORPO DE PROVA DE AREIA SECA, OU SEJA, COM 0% DE COLOIDE. ....	89
FIGURA 3.24. APLICAÇÃO DA EQUAÇÃO DE M PARA OS DADOS EXPERIMENTAIS DO CORPO DE PROVA COM 26% DE COLOIDE.....	90

FIGURA 3.25. APLICAÇÃO DA EQUAÇÃO DE M PARA OS DADOS EXPERIMENTAIS DO CORPO DE PROVA COM 38% DE COLOIDE.....	90
FIGURA 3.26. APLICAÇÃO DA EQUAÇÃO DE M PARA OS DADOS EXPERIMENTAIS DO CORPO DE PROVA COM 43% DE COLOIDE.....	91
FIGURA 3.27. APLICAÇÃO DA EQUAÇÃO DE M PARA OS DADOS EXPERIMENTAIS DO CORPO DE PROVA COM 47% DE COLOIDE.....	91
FIGURA 3.28. APLICAÇÃO DA EQUAÇÃO DE M PARA OS DADOS EXPERIMENTAIS DO CORPO DE PROVA COM 74% DE COLOIDE.....	92
FIGURA 3.29. APLICAÇÃO DA EQUAÇÃO DE M PARA OS DADOS EXPERIMENTAIS DO CORPO DE PROVA COM 100% DE COLOIDE.....	92
FIGURA 3.30. PONTOS OBTIDOS EXPERIMENTALMENTE PARA $a$ E EQUAÇÃO CONSTITUTIVA AJUSTADA. ....	94
FIGURA 3.31. PONTOS OBTIDOS EXPERIMENTALMENTE PARA $m$ E EQUAÇÃO CONSTITUTIVA AJUSTADA. ....	96
FIGURA 4.1 APLICAÇÃO DA EQUAÇÃO (4.1) A DADOS DA LITERATURA (BARDET, 1997) DE ENSAIOS EDOMÉTRICOS REALIZADOS COM SOLO.....	98
FIGURA 4.2. DEFINIÇÃO DO MÓDULO TANGENTE M.....	99
FIGURA 4.3. VARIAÇÃO DE $m$ COM A POROSIDADE. FONTE: ADAPTADO DE JANBU (1967). ....	100
FIGURA 4.4. VARIAÇÃO DE $a$ COM A POROSIDADE. FONTE: ADAPTADO DE JANBU (1967). ....	100
FIGURA 4.5. FLUXOGRAMA DE IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO PROPOSTO.....	106
FIGURA 4.6. DECAIMENTO DO TEOR DE MATERIAL PASTOSO AO LONGO DO TEMPO COM VALORES DE PARÂMETROS UTILIZADOS PARA SIMULAR O COMPORTAMENTO MECÂNICO DO SOLO-COLOIDE. ....	107
FIGURA 4.7. COMPARAÇÃO DAS TRÊS EQUAÇÕES IMPLEMENTADAS PARA CORPO DE PROVA COM 26% DE COLOIDE. ....	108
FIGURA 4.8. COMPARAÇÃO DAS TRÊS EQUAÇÕES IMPLEMENTADAS PARA CORPO DE PROVA COM 38% DE COLOIDE. ....	108
FIGURA 4.9. COMPARAÇÃO DAS TRÊS EQUAÇÕES IMPLEMENTADAS PARA CORPO DE PROVA COM 43% DE COLOIDE. ....	109

FIGURA 4.10. COMPARAÇÃO DAS TRÊS EQUAÇÕES IMPLEMENTADAS PARA CORPO DE PROVA COM 47% DE COLOIDE. ....	109
FIGURA 4.11. RESULTADO DA IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO PROPOSTO PARA OS DADOS DE SOLO-COLOIDE. ....	111
FIGURA 4.12. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO MODELO PROPOSTO EM RELAÇÃO AO TEOR DE MATERIAL PASTOSO. ....	112
FIGURA 4.13. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO MODELO PROPOSTO EM RELAÇÃO AO PARÂMETRO $a$ . ....	113
FIGURA 4.14. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO MODELO PROPOSTO EM RELAÇÃO AO PARÂMETRO $m$ . ....	113
FIGURA 4.15. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO MODELO PROPOSTO EM RELAÇÃO AO INCREMENTO DE TENSÃO $\Delta\sigma$ . ....	115
FIGURA 4.16. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO MODELO PROPOSTO EM RELAÇÃO AO INCREMENTO DE TEMPO $\Delta t_c$ . ....	116
FIGURA 4.17. TRÊS COMPORTAMENTOS DE CURVAS PARA A REDUÇÃO DO TEOR DE MATERIAL PASTOSO EM RSU PARA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO MODELO PROPOSTO EM RELAÇÃO À TAXA DE DEGRADAÇÃO. ....	117
FIGURA 4.18. DECAIMENTO DO TEOR DE MATERIAL PASTOSO AO LONGO DO TEMPO UTILIZADO PARA SIMULAR O COMPORTAMENTO MECÂNICO DOS RSU ENSAIADOS POR REDDY ET AL (2011). ....	119
FIGURA 4.19. VALORES DO MÓDULO TANGENTE $M$ OBTIDOS PARA O RESÍDUO FRESCO A PARTIR DOS DADOS DE REDDY ET AL (2011). ....	120
FIGURA 4.20. VALORES DO MÓDULO TANGENTE $M$ OBTIDOS PARA O RESÍDUO DO BIOREATOR R4 A PARTIR DOS DADOS DE REDDY ET AL (2011). ....	121
FIGURA 4.21. COMPORTAMENTO DA EQUAÇÃO CONSTITUTIVA DE $a$ (EQUAÇÃO (3.4)) COM OS PARÂMETROS $a_0$ E $a_{res}$ AJUSTADOS AOS DADOS DE REDDY ET AL (2011). ....	122
FIGURA 4.22. COMPORTAMENTO DA EQUAÇÃO CONSTITUTIVA DE $m$ (EQUAÇÃO (3.6)) COM OS PARÂMETROS $m_0$ E $m_{res}$ AJUSTADOS AOS DADOS DE REDDY ET AL (2011). ....	122
FIGURA 4.23. RESULTADO DA IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO PROPOSTO PARA OS DADOS DE REDDY ET AL (2011). ....	124

FIGURA 4.24. DECAIMENTO DO TEOR DE MATERIAL PASTOSO AO LONGO DO TEMPO COM BASE NOS DADOS FORNACIDOS POR BABU ET AL (2010).....	126
FIGURA 4.25. VALORES DO MÓDULO TANGENTE M OBTIDOS PARA O RESÍDUO FRESCO A PARTIR DOS DADOS DE BABU ET AL (2010). .....	127
FIGURA 4.26. AJUSTE DA EQUAÇÃO CONSTITUTIVA DE $a$ (EQUAÇÃO (3.4)) AOS DADOS OBTIDOS DE BABU ET AL (2010). .....	127
FIGURA 4.27. AJUSTE DA EQUAÇÃO CONSTITUTIVA DE $m$ (EQUAÇÃO (3.6)) AOS DADOS OBTIDOS DE BABU ET AL (2010). .....	128
FIGURA 4.28. RESULTADO DA IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO PROPOSTO PARA OS DADOS DE BABU ET AL (2010). .....	129
FIGURA 4.29. CURVAS DE VARIAÇÃO DO PARÂMETRO $a$ OBTIDAS COM SOLO-COLOIDE, DADOS DE REDDY ET AL (2011) E DADOS DE BABU ET AL (2010). .....	131
FIGURA 4.30. CURVAS DE VARIAÇÃO DO PARÂMETRO $m$ OBTIDAS COM SOLO-COLOIDE, DADOS DE REDDY ET AL (2011) E DADOS DE BABU ET AL (2010). .....	132
FIGURA 4.31. FAIXA DE VALORES SUGERIDA PARA O PARÂMETRO $a$ NO ESTUDO DE RSU.....	133
FIGURA 4.32. FAIXA DE VALORES SUGERIDA PARA O PARÂMETRO $m$ NO ESTUDO DE RSU.....	133

## LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1. VALORES OBTIDOS DA LITERATURA PARA COMPOSIÇÃO DE RSU. .....	37
TABELA 2.2. VALORES OBTIDOS DA LITERATURA PARA PESO ESPECÍFICO NATURAL DE RSU.....	40
TABELA 2.3. UMIDADE DOS COMPONENTES DE RSU. FONTE: CARVALHO (1999). .....	41
TABELA 2.4. VALORES ENCONTRADOS NA LITERATURA PARA O TEOR DE UMIDADE DE RSU.....	42
TABELA 2.5. VALORES ENCONTRADOS NA LITERATURA PARA O COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE DE RSU.....	43
TABELA 2.6. VALORES ENCONTRADOS NA LITERATURA PARA OS ÍNDICES DE COMPRESSÃO PRIMÁRIA E SECUNDÁRIA DOS RSU.....	50
TABELA 2.7. VALORES ENCONTRADOS NA LITERATURA PARA O ÂNGULO DE ATRITO INTERNO DOS RSU. ....	51
TABELA 2.8. VALORES ENCONTRADOS NA LITERATURA PARA O INTERCEPTO COESIVO DOS RSU. ....	53
TABELA 2.9. RESUMO DOS MODELOS PARA PREVISÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DOS RSU. ....	62
TABELA 3.1. PORCENTAGEM EM MASSA DE CADA FRAÇÃO DE MATERIAL PRESENTE NO SOLO UTILIZADO NA MISTURA SOLO-COLOIDE. ....	74
TABELA 3.2. RESUMO DOS VALORES OBTIDOS NA CARACTERIZAÇÃO DO SOLO. .....	75
TABELA 3.3. VALORES OBTIDOS PARA MASSA ESPECÍFICA DO COLOIDE.....	75
TABELA 3.4. VALORES DE ÍNDICE DE COMPRESSÃO E EXPANSÃO OBTIDOS PARA OS CORPOS DE PROVA ENSAIADOS.....	86
TABELA 3.5. VALORES OBTIDOS PARA OS PARÂMETROS $a$ E $m$ NO AJUSTE DA EQUAÇÃO DE M (EQUAÇÃO (3.3)). ....	93
TABELA 3.6. VALORES OBTIDOS PARA OS PARÂMETROS DA EQUAÇÃO (3.4) APÓS AJUSTE AOS PONTOS OBTIDOS EXPERIMENTALMENTE PARA O PARÂMETRO $a$ . ....	94

TABELA 3.7. VALORES OBTIDOS PARA OS PARÂMETROS DA EQUAÇÃO (3.6) APÓS AJUSTE AOS PONTOS OBTIDOS EXPERIMENTALMENTE PARA O PARÂMETRO $m$ .	95
TABELA 4.1. VALORES UTILIZADOS PARA OS PARÂMETROS DA EQUAÇÃO (4.13) PARA SIMULAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DO SOLO-COLOIDE.	107
TABELA 4.2. COMPARAÇÃO ENTRE OS TEORES DE COLOIDE REAIS E OBTIDOS NO AJUSTE DO MODELO PARA OS ENSAIOS COM SOLO-COLOIDE.	110
TABELA 4.3. VALORES UTILIZADOS PARA OS PARÂMETROS DA EQUAÇÃO (4.13) NA SIMULAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DOS RSU ENSAIADOS POR REDDY ET AL (2011).	119
TABELA 4.4. VALORES DOS PARÂMETROS $a$ E $m$ OBTIDOS NO AJUSTE DA EQUAÇÃO DE M AOS DADOS DE REDDY ET AL (2011).	121
TABELA 4.5. VALORES OBTIDOS PARA OS PARÂMETROS DAS EQUAÇÕES (3.4) E (3.6) APÓS AJUSTE AOS DADOS DE REDDY ET AL (2011).	123
TABELA 4.6. COMPARAÇÃO ENTRE OS TEORES DE MATERIAL PASTOSO FORNECIDOS POR REDDY ET AL (2011) E OS OBTIDOS NA IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO PROPOSTO.	124
TABELA 4.7. TEMPO DE ATERRAMENTO E TEOR DE MATERIAL PASTOSO DAS AMOSTRAS DE RSU ENSAIADAS POR BABU ET AL (2010).	125
TABELA 4.8. VALORES UTILIZADOS PARA OS PARÂMETROS DA EQUAÇÃO (4.13) NA SIMULAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DOS RSU ENSAIADOS POR BABU ET AL (2010).	126
TABELA 4.9. VALORES OBTIDOS PARA OS PARÂMETROS DAS EQUAÇÕES (3.4) E (3.6) APÓS AJUSTE AOS DADOS DE BABU ET AL (2010).	128
TABELA 4.10. COMPARAÇÃO ENTRE OS TEORES DE MATERIAL PASTOSO FORNECIDOS POR BABU ET AL (2010) E OS OBTIDOS NA IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO PROPOSTO.	130

## LISTA DE SIGLAS

ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	- American Society for Testing and Materials
COD	- Chemical Oxygen Demand
DBO	- Demanda Bioquímica de Oxigênio
DNER	- Departamento Nacional de Estradas e Rodagem
DQO	- Demanda Química de Oxigênio
GEE	- Gás de Efeito Estufa
IBGE	- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ME	- Método de Ensaio
MUG <sup>2</sup>	- Modelo Unificado de Geração de Gás
NBR	- Norma Brasileira
RSU	- Resíduos Sólidos Urbanos
SS	- Sólidos Suspensos
UFPR	- Universidade Federal do Paraná
USEPA	- United States Environmental Protection Agency



## LISTA DE SÍMBOLOS

$MO'$	- Massa de matéria orgânica
$MO'_{res}$	- Massa residual de matéria orgânica
$MO'_0$	- Massa inicial de matéria orgânica
$\alpha'_{MO}$	- Parâmetro de caracterização da biodegradação
$n'_{MO}$	- Parâmetro de caracterização da biodegradação
$m'_{MO}$	- Parâmetro de caracterização da biodegradação
$t$	- Tempo de degradação do resíduo
$\gamma$	- Peso específico
$k$	- Coeficiente de permeabilidade
$C_c$	- Índice de compressão primária
$C_\alpha$	- Índice de compressão secundária
$\phi'$	- Ângulo de atrito interno experimental
$\phi$	- Ângulo de atrito interno
$\phi_{res}$	- Ângulo de atrito interno residual
$\phi_0$	- Ângulo de atrito interno inicial
$\alpha_\phi$	- Parâmetro de ajuste da curva
$n_\phi$	- Parâmetro de ajuste da curva
$m_\phi$	- Parâmetro de ajuste da curva
$M_{total}$	- Massa total de resíduo
$c$	- Coesão
$c'$	- Intercepto coesivo
$c'_0$	- Intercepto coesivo inicial
$c'_{máx}$	- Intercepto coesivo máximo
$\alpha_c$	- Parâmetro de ajuste da curva
$n_c$	- Parâmetro de ajuste da curva
$m_c$	- Parâmetro de ajuste da curva
$\epsilon$	- Deformação
$p_a$	- Pressão de referência
$\sigma$	- Tensão vertical aplicada
$m$	- Parâmetro de ajuste
$a$	- Parâmetro de ajuste
$M$	- Módulo tangente da curva tensão x deformação do ensaio edométrico
$t_c$	- Incremento de tempo do ensaio edométrico
$MO$	- Teor de material pastoso
$MO_0$	- Teor de material pastoso inicial
$MO_{res}$	- Teor de material pastoso residual
$\alpha_{MO}$	- Parâmetro de caracterização da biodegradação

$n_{MO}$	-	Parâmetro de caracterização da biodegradação
$m_{MO}$	-	Parâmetro de caracterização da biodegradação
$W_{g1}$	-	Peso de coloide contido no corpo de prova
$\gamma_g$	-	Peso específico do coloide no estado coloidal
$\gamma_s$	-	Peso específico dos sólidos do solo
$W_{g2}$	-	Peso de coloide que ocupa o volume total do anel de adensamento
$\gamma_{sc}$	-	Peso específico da mistura solo-coloide
$\rho_{37^\circ C}$	-	Massa específica do coloide no estado líquido, a 37°C
$\rho_{3^\circ C}$	-	Massa específica do coloide no estado coloidal, a 3°C
$C_s$	-	Índice de expansão
$e_0$	-	Índice de vazios inicial
$a_{res}$	-	Valor residual do parâmetro a
$a_0$	-	Valor inicial do parâmetro a
$L_a$	-	Parâmetro de ajuste da curva
$u_a$	-	Parâmetro de ajuste da curva
$v_a$	-	Parâmetro de ajuste da curva
$m_{res}$	-	Valor residual do parâmetro m
$m_0$	-	Valor inicial do parâmetro m
$L_m$	-	Parâmetro de ajuste da curva
$u_m$	-	Parâmetro de ajuste da curva
$v_m$	-	Parâmetro de ajuste da curva
$W_s$	-	Peso do solo contido no corpo de prova
$V_t$	-	Volume do anel de adensamento
$V_s$	-	Volume ocupado pelos sólidos no corpo de prova
$V_{g1}$	-	Volume ocupado pelo coloide contido no corpo de prova

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>21</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>23</b>
2.1	RESÍDUOS SÓLIDOS .....	23
2.1.1	Classificação dos resíduos sólidos .....	23
2.1.2	Resíduos sólidos urbanos (RSU).....	24
2.1.3	Destinação dos resíduos sólidos urbanos.....	24
2.1.4	Reciclagem.....	24
2.1.4.1	Compostagem .....	25
2.1.4.2	Tratamentos térmicos .....	25
2.1.4.3	Disposição final .....	26
2.2	BIODEGRADAÇÃO .....	28
2.2.1	Biogás .....	32
2.2.2	Percolados.....	33
2.3	CARACTERÍSTICAS DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS .....	34
2.3.1	Características físicas dos resíduos sólidos urbanos .....	34
2.3.1.1	Composição.....	34
2.3.1.2	Distribuição granulométrica .....	38
2.3.1.3	Peso específico natural.....	38
2.3.1.4	Teor de umidade.....	40
2.3.1.5	Permeabilidade.....	42
2.3.2	Características geotécnicas dos resíduos sólidos urbanos .....	43
2.3.2.1	Comportamento da curva tensão x deformação .....	43
2.3.2.1.1	Em ensaios triaixais.....	43
2.3.2.1.2	Em ensaios edométricos .....	48
2.3.2.2	Parâmetros de compressibilidade .....	50

2.3.2.3	Parâmetros de resistência ao cisalhamento.....	51
2.3.2.3.1	Ângulo de atrito interno .....	51
2.3.2.3.2	Coesão.....	53
2.4	METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DE SISTEMAS NÃO CONSERVATIVOS DE MASSA.....	55
2.5	MODELOS.....	57
2.5.1	Modelos para previsão do comportamento mecânico de RSU em aterros sanitários..	58
<b>3</b>	<b>COMPONENTE EXPERIMENTAL .....</b>	<b>64</b>
3.1	CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS.....	64
3.1.1	Caracterização do solo .....	64
3.1.2	Caracterização do coloide .....	66
3.2	METODOLOGIA PARA MONTAGEM DOS CORPOS DE PROVA.....	67
3.3	ENSAIOS EDOMÉTRICOS .....	71
3.4	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	73
3.4.1	Caracterização de materiais .....	73
3.4.1.1	Caracterização do solo .....	73
3.4.1.2	Caracterização do coloide .....	75
3.4.2	Ensaio edométrico .....	76
<b>4</b>	<b>MODELO CONSTITUTIVO.....</b>	<b>97</b>
4.1	EMBASAMENTO TEÓRICO.....	97
4.2	IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO PROPOSTO .....	104
4.3	APLICAÇÃO DO MODELO AOS DADOS DE SOLO-COLOIDE .....	106
4.4	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO MODELO PROPOSTO .....	111
4.5	VALIDAÇÃO DO MODELO .....	118
4.5.1	Validação com dados de Reddy et al (2011).....	118
4.5.2	Validação com dados de Babu et al (2010).....	125
4.6	DISCUSSÃO SOBRE OS VALORES DOS PARÂMETROS $a$ E $m$ .....	130

<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>134</b>
<b>6</b>	<b>PESQUISAS FUTURAS.....</b>	<b>136</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>137</b>
	<b>APÊNDICES.....</b>	<b>143</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) (2010), o Brasil gera diariamente mais de 250 mil toneladas de resíduos sólidos, das quais mais de 60% são destinadas para aterros sanitários. A participação dos aterros sanitários como principal local de deposição final de resíduos tende a aumentar com a implantação da Política Nacional dos Resíduos Sólidos, instituída pela Lei nº 12.305 (BRASIL, 2010), que além de visar à redução de resíduos gerados e enviados para disposição final, prevê metas para a eliminação de lixões e demais locais ambientalmente inadequados para deposição de resíduos sólidos urbanos (RSU). Assim, é fundamental que sejam estudadas as propriedades físicas e mecânicas dos RSU, a fim de obter-se um melhor funcionamento do aterro sanitário, com melhor aproveitamento do espaço em que será instalado e garantia de segurança durante e após o período de operação.

Com base nessas propriedades, diversos modelos matemáticos têm sido criados para tentar prever o comportamento dos complexos processos que ocorrem com os RSU dentro de um aterro sanitário, como a atividade bacteriana, a biodegradação, a geração de gases e líquidos. Esses modelos possibilitam um melhor dimensionamento dos sistemas de coleta e tratamento dos efluentes do aterro, o que, além de evitar a contaminação do solo e dos corpos hídricos próximos ao empreendimento, permite evitar instabilidades geotécnicas causadas pelo excesso de poropressão no interior do maciço de resíduos.

Modelos para a previsão do comportamento mecânico do aterro como um todo também têm sido propostos para diagnosticar áreas de possível instabilidade geotécnica, permitindo a adoção de medidas para evitar o deslizamento da pilha de resíduos. No entanto, alguns desses modelos se prendem excessivamente às formulações da mecânica dos solos, ignorando o fato de que os RSU se comportam de forma diferente. Uma das principais diferenças entre esses dois materiais é a presença da biodegradação nos RSU, que influencia diretamente suas propriedades ao longo do tempo, alterando-as principalmente em longo prazo.

O objetivo desta pesquisa é desenvolver um novo modelo de previsão do comportamento mecânico dos RSU baseado no comportamento das curvas tensão x

deformação resultantes de ensaios edométricos e que acople o processo de biodegradação dos resíduos. Este trabalho também objetiva realizar ensaios edométricos com solo-coloide, a fim de calibrar as equações constitutivas do modelo proposto, e validar os resultados obtidos com dados da literatura.

Além de proporcionar maior segurança e melhor aproveitamento do espaço destinado ao aterro, esse modelo ainda poderá servir de auxílio para órgãos ambientais responsáveis pela avaliação e aprovação de projetos de aterros sanitários.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 RESÍDUOS SÓLIDOS

Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) (2004), resíduos sólidos são resíduos no estado sólido ou semi-sólido, resultantes de atividades de origem doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Também são incluídos nessa definição lodos de estações de tratamento de água e provenientes de instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades impeçam seu lançamento na rede de esgoto ou corpos d'água.

#### 2.1.1 Classificação dos resíduos sólidos

A ABNT (2004) classifica os resíduos sólidos de acordo com o impacto que seus constituintes podem causar à saúde e ao meio ambiente. Dessa forma, os resíduos podem ser separados em dois grandes grupos: os resíduos classe I, ou resíduos perigosos, que são aqueles que apresentam periculosidade, ou seja, possuem propriedades de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e/ou patogenicidade; e os resíduos classe II, ou resíduos não perigosos.

Ainda segundo a ABNT (2004), a classe II pode ser dividida em duas classes. A classe II A, de resíduos não inertes, engloba resíduos que não se enquadram nas classes I ou II B. Os resíduos dessa classe podem apresentar propriedades de biodegradabilidade, combustibilidade e/ou solubilidade em água. A classe II B, de resíduos inertes, engloba resíduos que, quando submetidos a condições impostas pela norma, não têm nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor.

Os resíduos sólidos que, depois de esgotadas todas as possibilidades economicamente viáveis de tratamento e recuperação, não apresentarem possibilidade de utilização, devendo ser submetidos a uma disposição final ambientalmente adequada, são definidos como rejeitos (BRASIL, 2010).



### 2.1.2 Resíduos sólidos urbanos (RSU)

Segundo a ABNT (1992), resíduos sólidos urbanos (RSU) são resíduos sólidos gerados em aglomerados urbanos, excetuando-se resíduos industriais perigosos, hospitalares sépticos e de aeroportos e portos. De acordo com Boscov (2008), RSU são resíduos gerados em residências, estabelecimentos comerciais, logradouros públicos e em diversas atividades desenvolvidas nas cidades, como varrição de ruas e praças, e são considerados classe II A, segundo a classificação proposta pela ABNT (2004). Resíduos de demolição e construção não são considerados RSU (JOHANNESSEN, 1999).

### 2.1.3 Destinação dos resíduos sólidos urbanos

Após seu recolhimento, os RSU podem ser encaminhados para tratamento ou disposição final. Segundo Mello (2008), os tratamentos têm o objetivo de reduzir ou eliminar o potencial poluidor dos resíduos e podem ser efetuados antes ou depois da sua coleta pelo órgão responsável. A separação dos resíduos é um exemplo de tratamento realizado antes da coleta. Existem diversos tipos de tratamentos que podem ser aplicados aos RSU após sua coleta. Os principais são a reciclagem, a compostagem e os tratamentos térmicos.

Os resíduos desses tratamentos e os RSU não tratados devem ser submetidos a uma disposição final (VILHENA, 2010), que é sempre necessária, exceto se o tratamento do resíduo prepará-lo para um novo uso, como no caso da reciclagem (MELLO, 2008).

### 2.1.4 Reciclagem

Mello (2008) define a reciclagem como a transformação de materiais do lixo, ou que se tornariam lixo, em matérias-primas de novos produtos. Algumas das vantagens desse processo são a diminuição da quantidade de RSU a ser enviada para aterros, a

preservação de recursos naturais, a redução do impacto no meio ambiente e a possibilidade de novos negócios, com conseqüente geração de empregos.

Diversos resíduos podem ser reciclados, sendo que os mais comuns são papéis, plásticos, vidros e metais. Mais recentemente também tem sido feita a reciclagem de entulhos, pneus, pilhas e baterias, e lâmpadas de descarga de gases (lâmpadas fluorescentes ou de vapor de mercúrio, por exemplo) (VILHENA, 2010).

#### 2.1.4.1 Compostagem

Segundo Nascimento (2007), a compostagem é uma reciclagem da fração orgânica dos RSU que transforma esse material em substâncias com aplicação mais nobre. Vilhena (2010) sustenta que a compostagem é um processo biológico de decomposição da matéria orgânica presente em restos de origem animal ou vegetal.

Esse processo gera um composto orgânico que pode ser usado para melhorar as características do solo sem causar impacto ao meio ambiente. Uma vez que a compostagem é feita por agentes biológicos microbianos e ocorre na presença de oxigênio, são necessárias determinadas condições físicas e químicas para formar um produto de boa qualidade.

Como no Brasil quase 50% dos RSU é constituído por matéria orgânica, a compostagem se tornaria uma prática vantajosa, permitindo, entre outras, a redução do material destinado ao aterro através de um processo ambientalmente seguro e o aproveitamento agrícola do composto orgânico com reciclagem de nutrientes para o solo (VILHENA, 2010).

#### 2.1.4.2 Tratamentos térmicos

De acordo com Vilhena (2010), os processos térmicos para tratamento de resíduos podem ser classificados como sendo de alta ou baixa temperatura. Segundo o autor, os de baixa temperatura, que ocorrem em torno de 100°C, objetivam principalmente a assepsia dos resíduos, sendo usados para o tratamento de resíduos de serviços de saúde. Já os processos térmicos de alta temperatura normalmente

ocorrem acima de 500°C e visam, sobretudo, a destruição ou redução da matéria orgânica presente no resíduo (reduzindo até 70% da massa e 90% do volume do resíduo tratado), assim como sua assepsia. Dessa forma, os tratamentos térmicos aplicados aos RSU são os de alta temperatura.

Vilhena (2010) relata ainda que entre os tratamentos térmicos a alta temperatura o mais comum é a incineração, utilizada amplamente principalmente por países que não dispõem de áreas adequadas para aterros, como Japão, Suíça e Suécia. Segundo o autor, nesse processo os gases de combustão devem ser mantidos em 1200°C por cerca de 2 segundos, sob determinadas condições de turbulência e teor de oxigênio, para que todos os compostos orgânicos sejam transformados em gás carbônico e água.

Assim, a incineração de RSU pode ser vantajosa, pois proporciona redução de massa e volume de resíduos e permite diminuição do impacto ambiental (tratando os gases de combustão, esse processo não oferece risco de contaminação dos lençóis freáticos ou do ar devido à emissão de metano, como é o caso dos aterros), além de ser uma alternativa para países que não dispõem de área suficiente para a instalação de aterros sanitários (VILHENA, 2010). No entanto, esse tratamento apresenta um custo elevado de operação e demanda mão de obra qualificada para garantir a qualidade do processo, o que reduz a sua utilização como destino de RSU (NASCIMENTO, 2007).

#### 2.1.4.3 Disposição final

Existem três formas principais de disposição final dos RSU no solo: lixões, aterros controlados e aterros sanitários. Vilhena (2010) caracteriza o lixão, descarga a céu aberto ou vazadouro, como a simples descarga de resíduos no solo, sem preocupação com o meio ambiente ou a saúde pública. Segundo Mello (2008), mesmo sendo impróprio, o lixão é uma destinação final muito comum para os RSU. O autor afirma que a simplicidade dessa deposição de resíduos resulta em problemas para os seres humanos e o meio ambiente, como o lançamento de gases de efeito estufa na atmosfera, a contaminação de lençóis freáticos e outros corpos d'água, a proliferação

de vetores transmissores de doenças e a atração de catadores, que passam a trabalhar e até a morar no local, sob condições lamentáveis.

De acordo com Vilhena (2010), aterro controlado é uma forma de disposição que reduz os impactos ao meio ambiente, visto que cobre os resíduos com uma camada de material inerte ao fim de cada dia, e não causa danos à saúde pública. No entanto, o autor destaca que os aterros controlados produzem poluição local, uma vez que geralmente não possuem impermeabilização de base nem sistemas de tratamento de percolato e biogás. Mello (2008) reforça a ideia anterior afirmando que essa alternativa minimiza, mas não elimina os problemas encontrados nos lixões.

Um aterro sanitário de RSU é, segundo a ABNT (1992), uma técnica de disposição de resíduos que não causa danos à saúde pública nem à sua segurança, e que minimiza os impactos ambientais. Essa técnica utiliza princípios de engenharia para reduzir ao mínimo possível a área e o volume ocupados por esses resíduos, cobrindo-os com uma camada de terra ao fim de cada jornada de trabalho, ou a intervalos menores, se necessário.

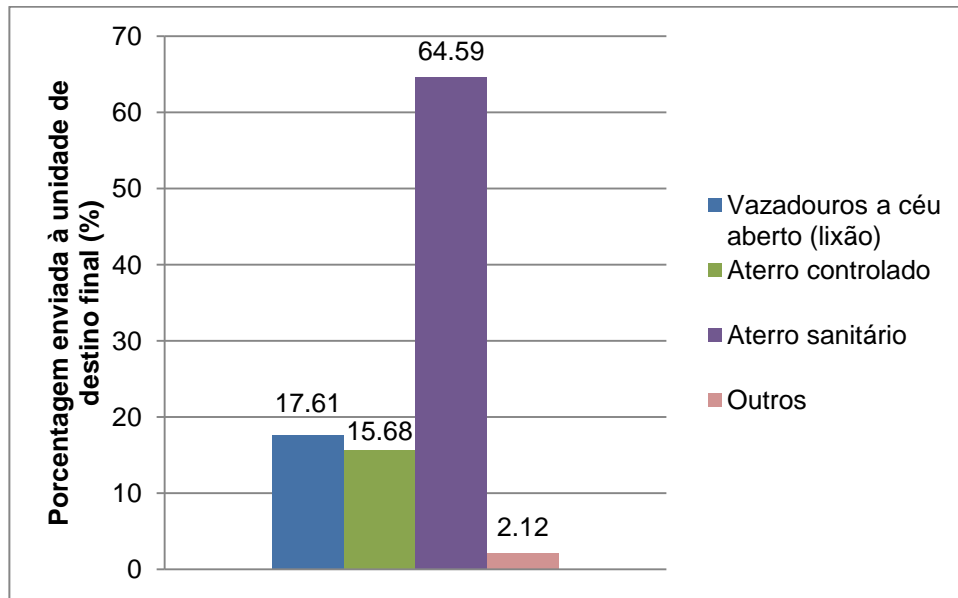
Mello (2008) afirma que um aterro sanitário deve dispor de impermeabilização de base, para proteger os lençóis freáticos, e de sistemas de coleta e tratamento de chorume, de drenagem de águas superficiais e de coleta e queima do biogás. O autor indica os aterros sanitários como a forma mais adequada de disposição final de resíduos e reforça que são indispensáveis em qualquer sistema de gerenciamento de RSU. Isso porque, mesmo que diversos tratamentos sejam aplicados aos resíduos coletados, os aterros sanitários serão sempre necessários para dispor o material residual (rejeitos).

Alternativamente, Vilhena (2010) apresenta um aterro sanitário como uma forma de disposição final de RSU no solo através do seu confinamento em células (volumes de controle) cobertas com material inerte, geralmente solo, de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança, minimizando os impactos ambientais.

Renou et al (2008) acrescenta que, além de apresentar vantagens econômicas quando comparado a métodos de tratamento de RSU como incineração, compostagem, etc, o aterro sanitário ainda minimiza impactos ambientais e permite que os resíduos se

decomponham sob condições controladas até sua transformação em um material inerte e estável.

No Brasil, a disposição final ainda é a destinação mais comum dos RSU. A Figura 2.1 apresenta os principais destinos das cerca de 260 mil toneladas de resíduos produzidas diariamente no Brasil, segundo o IBGE (2010).



**FIGURA 2.1. PORCENTAGENS EM MASSA DE RESÍDUOS SÓLIDOS DOMICILIARES E/OU PÚBLICOS ENVIADA ÀS PRINCIPAIS UNIDADES DE DESTINO FINAL.**

Os principais destinos finais considerados em “Outros” são: vazadouros em áreas alagadas ou alagáveis, com 0,02% do total; unidades de compostagem de resíduos orgânicos, com 0,63% do total; unidades de triagem de resíduos recicláveis, com 1,20% do total; e unidades de tratamento por incineração, com 0,03% do total (IBGE, 2010). Esses dados mostram que, no Brasil, o destino predominante dos RSU ainda é a disposição no solo sem o recebimento de tratamento prévio.

## 2.2 BIODEGRADAÇÃO

A degradação dos RSU dentro de um aterro ocorre através de processos físicos, químicos e biológicos, gerando chorume e gases (BOSCOV, 2008). A biodegradação consiste na parcela biológica dessa degradação e é realizada por bactérias.

Existem na literatura diversas formas de dividir o processo de biodegradação dos RSU ao longo do tempo. O número de fases e seus nomes variam de acordo com a preferência do autor e dependendo do nível de detalhamento e do enfoque desejado. No entanto, o processo de biodegradação é o mesmo, independentemente do modo como é dividido.

Assim, neste trabalho optou-se por descrever a biodegradação através das 5 fases propostas por Johannessen (1999). O autor afirma que todas as fases influenciam a composição do chorume e a produção de gases e reforça ainda que, em um aterro que funcione como biorreator, o tempo decorrido entre as fases pode ser reduzido.

A fase I é aeróbia e ocorre imediatamente após a deposição dos resíduos. Essa fase funciona como uma compostagem, em que substâncias facilmente biodegradáveis são quebradas pela presença de oxigênio. É produzido  $\text{CO}_2$  (dióxido de carbono ou gás carbônico) e a temperatura aumenta.

A fase II também é aeróbia, mas apresenta o desenvolvimento de condições anaeróbias. Ocorre um processo de fermentação que produz ácidos no chorume e provoca uma queda no seu pH (aumento da acidez). Devido ao baixo pH, nessa fase pode ser observada a liberação de metais dos resíduos. O gás gerado consiste principalmente em  $\text{CO}_2$ .

As fases I e II juntas podem durar de algumas semanas a dois anos. Altas temperaturas e altas taxas de compactação podem reduzir o tempo de duração dessas fases.

A fase III é anaeróbia e, com um ambiente favorável para as bactérias, as condições necessárias para a produção de metano começam a surgir. No gás gerado há um aumento na concentração de metano ( $\text{CH}_4$ ) e diminuição da concentração de  $\text{CO}_2$ . O sulfato é reduzido a sulfito e pode precipitar os metais contidos no chorume. Conforme os ácidos orgânicos são convertidos em gases, o pH do percolado aumenta, sua carga orgânica diminui e a concentração de amônia ( $\text{NH}_3$ ) aumenta.

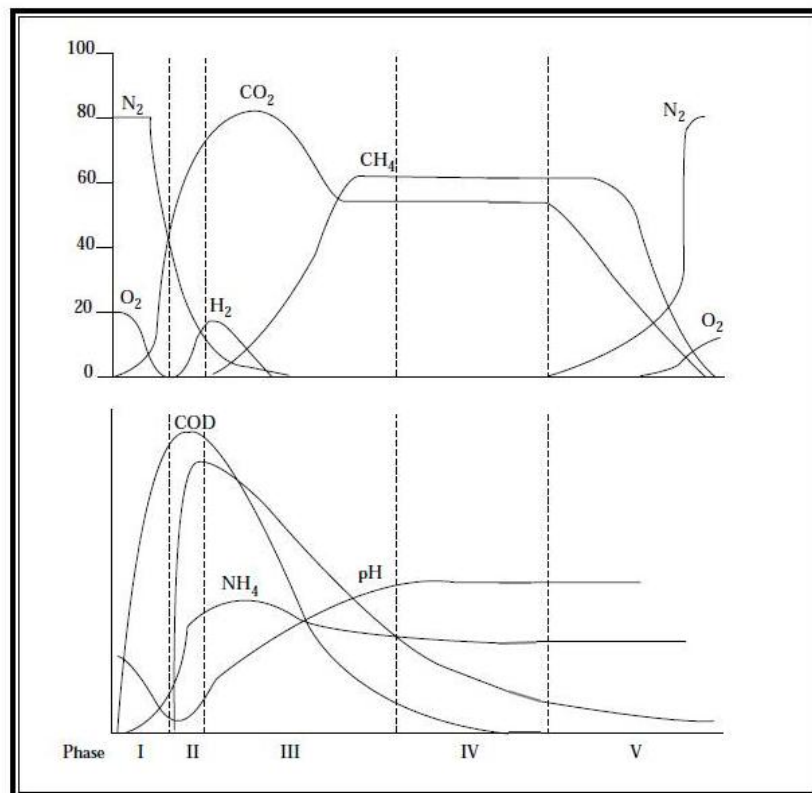
A fase IV também é anaeróbia e conhecida como fase metanogênica, visto que nessa fase ocorre a máxima produção de metano do processo de biodegradação dos RSU, chegando a uma concentração de 40-60% no biogás, em volume. O chorume apresenta carga orgânica baixa, composta principalmente por componentes orgânicos

de difícil biodegradação, e alta concentração de amônia, visto que as condições são anaeróbias.

As fases III e IV duram aproximadamente 5 anos e em seguida começam a ser substituídas. A presença de uma maior umidade aumenta as reações biológicas, diminuindo o tempo de duração dessas fases e possibilitando uma produção maior de gases.

A fase V é uma fase de estabilização em que a produção de metano começa a diminuir e a presença do ar atmosférico reintroduz condições aeróbias de decomposição. Essa fase ocorre após algumas décadas em aterros mais rasos e pode levar muitas décadas para começar em aterros mais profundos. Segundo o autor, o RSU pode levar muitas décadas, ou mesmo séculos, até ser completamente estabilizado.

A Figura 2.2 apresenta o esquema da produção de gases e chorume (gráficos superior e inferior, respectivamente) em uma célula de RSU. Na figura, COD representa a demanda química de oxigênio (*chemical oxygen demand*).



**FIGURA 2.2. ESQUEMA DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS E CHORUME EM UMA CÉLULA DE ATERRO DE RSU. FONTE: JOHANNESSEN (1999).**

Com base em dados da literatura, Nocko (2010) propôs uma formulação para simular o decaimento da massa de matéria orgânica presente nos RSU em função do tempo. A Equação (2.1) descreve esse decaimento.

$$MO'(t) = MO'_{res} + (MO'_0 - MO'_{res}) \cdot \left[ \frac{1}{1 + (\alpha'_{MO} \cdot t)^{n'_{MO}}} \right]^{m'_{MO}} \quad (2.1)$$

Nessa equação,  $MO'(t)$  representa a massa de matéria orgânica, em kg, no tempo  $t$ , e  $MO'_0$  e  $MO'_{res}$  representam, respectivamente, as massas inicial e residual de matéria orgânica, em kg.  $\alpha'_{MO}$ ,  $n'_{MO}$  e  $m'_{MO}$  são parâmetros de caracterização da biodegradação. O parâmetro  $\alpha'_{MO}$  tem unidade de 1/tempo. Os parâmetros  $n'_{MO}$  e  $m'_{MO}$  são adimensionais e relacionados através da Equação (2.2) (NOCKO, 2010).

$$m'_{MO} = \frac{n'_{MO}}{2} \quad (2.2)$$

A Figura 2.3 apresenta o comportamento da Equação (2.1) supondo uma biodegradação de 50% da matéria orgânica contida nos RSU em um curto período de tempo.

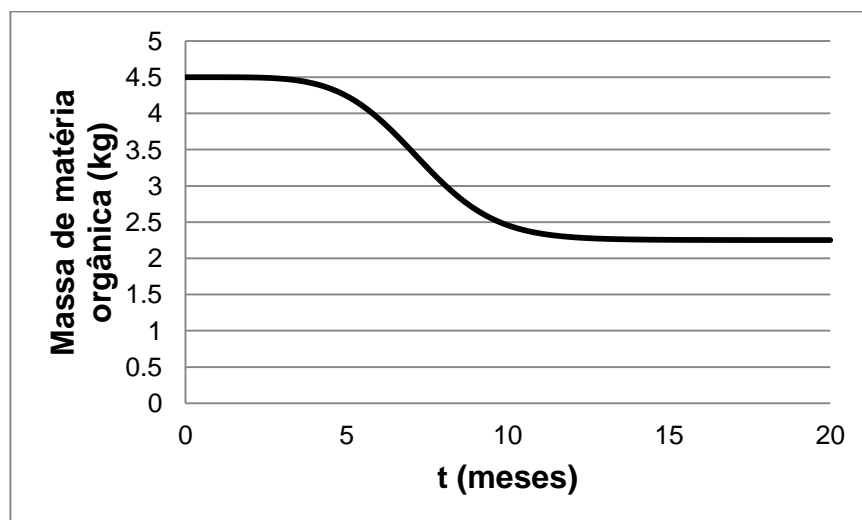


FIGURA 2.3. VARIAÇÃO DA MASSA DE MATÉRIA ORGÂNICA COM O TEMPO, CONSIDERANDO 50% DE MASSA BIODEGRADADA. FONTE: NOCKO (2010).



Apesar de simular, nessa figura, um tempo de duração do processo de biodegradação muito curto (Boskov (2008) sugere um tempo que varia entre oito e mais de quarenta anos), Nocko (2010) mostrou que a Equação (2.1) se adapta bem ao comportamento dos dados observados na literatura. A quantidade de matéria orgânica biodegradada e o tempo de duração do processo podem ser ajustados variando os valores de  $MO'_{res}$  e dos parâmetros de ajuste  $\alpha'_{MO}$ ,  $n'_{MO}$  e  $m'_{MO}$ . Assim, para quaisquer condições de biodegradação do aterro (temperatura, umidade, recirculação ou não de chorume) é possível fazer um ajuste satisfatório da equação proposta.

### 2.2.1 Biogás

Segundo Johannessen (1999), o biogás é uma mistura de gases, predominantemente metano ( $CH_4$ ) e dióxido de carbono ( $CO_2$ ), produzida pela atividade microbial em condições anaeróbias durante a degradação do resíduo aterrado. Habitzreuter (2005) afirma que essa mistura gasosa e combustível resultante da fermentação da matéria orgânica presente nos resíduos é composta por  $CH_4$  (de 55 a 65%),  $CO_2$  (de 35 a 45%) e frações menores de gases como  $O_2$ ,  $N_2$  e  $H_2$ , além de uma pequena quantidade de outros compostos.

Johannessen (1999) sustenta que o biogás gerado em aterros sanitários é um poderoso gás de efeito estufa (GEE) que, se não tiver sua emissão controlada, pode contribuir com 2 a 4% das emissões totais globais de GEE's.

A extração controlada desses gases é necessária, uma vez que sua emissão de forma descontrolada pode resultar em problemas de saúde para a população local e contribuir para o efeito estufa (OTSUKA, 2010). Essa extração também pode ser vantajosa economicamente, visto que o biogás é combustível e sua queima pode ser usada como fonte de energia. Além disso, a não extração do biogás pode resultar em altas concentrações de metano no interior da pilha de resíduos ou no solo vizinho ao aterro, o que pode provocar explosões (Johannessen, 1999).

### 2.2.2 Percolados

De acordo com Boscov (2008), percolado ou lixiviado é o efluente da massa de resíduos, resultante da percolação de águas de precipitação e da própria decomposição dos resíduos. A ABNT (1992) define chorume ou sumeiro como um líquido, produzido pela decomposição de substâncias contidas nos resíduos sólidos, que é caracterizado pela cor escura, pelo mau cheiro e pela elevada demanda bioquímica de oxigênio (DBO).

Renou et al (2008) afirma que o volume de percolado produzido depende da natureza do resíduo (conteúdo de água), do grau de compactação da massa de resíduos (quanto menor a compactação, maior a produção de chorume, devido à maior taxa de infiltração de água) e até do clima da região do aterro (influência no volume de precipitação e na taxa de evaporação).

Ainda de acordo com o autor, muitos fatores influenciam na qualidade do percolado de aterros sanitários, como idade dos resíduos, quantidade de precipitação, variações climáticas sazonais, tipo de resíduos e sua composição. As características desse percolado podem ser representadas por parâmetros básicos, como demanda bioquímica de oxigênio (DBO), demanda química de oxigênio (DQO), taxa DBO/DQO, pH, sólidos suspensos (SS), nitrogênio amoniacal ( $\text{NH}_3\text{-N}$ ), nitrogênio Kjeldahl total e metais pesados. A composição do lixiviado de diferentes aterros pode variar muito, mas normalmente apresenta grandes quantidades de matéria orgânica, que deve ser removida antes da descarga desse material em corpos hídricos.

De acordo com Zekkos et al (2010), a recirculação e a coleta de chorume em uma célula de RSU podem impactar no teor de umidade e na taxa de biodegradação dos resíduos. Segundo Imhoff et al (2007), a recirculação de chorume na pilha de resíduos e o controle das reações químicas e biológicas que nela ocorrem podem transformar o aterro em um biorreator. O autor afirma que o controle da umidade é o parâmetro mais crítico para garantir o sucesso de operação do biorreator. A baixa umidade limita a taxa de biodegradação dos resíduos, e seu excesso pode gerar escoamentos indesejados, má coleta de gás e poropressão excessiva, que pode resultar em instabilidade geotécnica.

Permitir a infiltração da água da chuva pela cobertura do aterro é uma alternativa para garantir maior umidade para o maciço de resíduos. No entanto, essa alternativa é de difícil controle, visto que a umidade varia com a quantidade de água que penetra na pilha e essa infiltração depende da intensidade e da frequência das precipitações.

Assim, recircular o chorume pelo maciço de resíduos torna-se uma opção válida para garantir o teor de umidade no aterro, uma vez que a quantidade de percolado recirculado é definida em projeto e pode ser constante, mantendo sempre a umidade ótima do maciço. É por isso que, de modo geral, aterros que possuem recirculação de percolados apresentam melhores taxas de decomposição dos resíduos.

A drenagem do chorume em aterros sanitários é sempre necessária, independentemente de haver posterior recirculação de chorume pelo aterro ou não, uma vez que essa medida evita o excesso de poropressão no maciço e a consequente instabilização geotécnica, além de prevenir o vazamento desse líquido para o meio ambiente e a contaminação do solo e dos lençóis freáticos.

## 2.3 CARACTERÍSTICAS DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

De acordo com Carvalho (1999), quando depositados, os RSU formam um maciço heterogêneo e poroso, com comportamento peculiar, diferente dos maciços de solo compactados. Além disso, os resíduos se transformam ao longo do tempo devido a fenômenos físicos, químicos e biológicos, acarretando em alterações das suas características. Por isso, ao trabalhar com as propriedades de RSU, é importante sempre especificar as condições do resíduo estudado (idade, composição, umidade, estágio de decomposição da matéria orgânica).

### 2.3.1 Características físicas dos resíduos sólidos urbanos

#### 2.3.1.1 Composição

A composição física ou gravimétrica dos RSU define a porcentagem em peso dos componentes presentes nos resíduos (NASCIMENTO, 2007). Devido à origem

variada, os RSU não têm uma composição definida, que pode variar com diversos fatores, como local de origem, hábitos e nível educacional da população, atividade econômica predominante, desenvolvimento econômico e clima, sendo que regiões mais desenvolvidas tendem a produzir resíduos com menor teor de materiais putrescíveis (BOSCOV, 2008).

A determinação dessa composição física é importante para a obtenção dos parâmetros geotécnicos do RSU, já que cada componente presente nos resíduos afeta de modo diverso esses parâmetros. Segundo Zekkos et al (2010), a quantidade de matéria orgânica presente nos resíduos é conhecida por influenciar seu potencial de recalque, tanto primário quanto secundário. De modo geral, resíduos com um maior percentual de matéria orgânica apresentam maior compressibilidade e menor resistência ao cisalhamento que resíduos com baixo percentual desse componente (ZEKKOS ET AL, 2010).

A Tabela 2.1 apresenta valores obtidos da literatura para a ocorrência dos principais componentes dos RSU, informados através da sua porcentagem em peso. O termo fração pastosa é, de modo geral, constituído por restos alimentares, podas de jardim, eventuais quantidades de solo de cobertura, materiais em diferentes estágios de decomposição e outros de difícil identificação (NASCIMENTO, 2007; MACHADO ET AL, 2005; CARVALHO, 1999). A inclusão desse termo na classificação dos RSU torna-se necessária principalmente na análise de resíduos mais antigos, normalmente retirados de perfurações no aterro. Isso porque quanto mais antigo é o resíduo, mais difícil torna-se a diferenciação macroscópica entre a matéria orgânica em decomposição e o solo de cobertura e outros materiais incluídos nesse termo. A ocorrência de matéria orgânica, nos casos em que foi possível quantificá-la, é apresentada como uma porcentagem do total e não da fração pastosa. Eventualmente, alguns autores apresentaram outros componentes na composição dos resíduos (em quantidades significativamente menores que dos componentes apresentados). Quando possível, esses componentes foram incluídos na tabela associados com outros já apresentados. Quando essa associação não foi possível, foram incluídos na categoria “Outros”.

Em sua caracterização, Nas e Bayram (2008) identificaram uma fração dos RSU como “cinzas e escória” (25,7% do total), que aqui foi incluído na categoria “Outros”, junto com os 18% já separados nessa categoria pelos autores. Outra fração dos resíduos, identificada pelos autores como “alimentação e jardinagem”, foi considerada neste trabalho como sendo de matéria orgânica.

Farias e Jucá (2000) incluíram na categoria “Outros” papel, papelão, ossos, cascas de coqueiro e coco em pequenos tamanhos, material têxtil, pedaços pequenos de madeiras e pedras, e náilon.

Gabr e Valero (1995) classificaram componentes biodegradáveis em uma categoria de cinzas, rochas e solo, devido à dificuldade em segregar esses componentes, uma vez que já estavam em avançado estado de degradação. Na Tabela 2.1 esses materiais foram incluídos na categoria “Pedra”.

De modo geral, e devido ao processo de degradação, é observada uma redução no teor de matéria orgânica conforme os resíduos se tornam mais antigos. Os resíduos estudados por Farias e Jucá (2000) possuem um tempo de aterro entre 6 meses e um ano. Nas e Bayram (2008) caracterizaram resíduos novos. Nascimento (2007) apresenta resíduos novos e com até 4 anos. Já os utilizados por Carvalho (1999) são mais antigos e possuem aproximadamente 15 anos de aterro. Os resíduos caracterizados por Gabr e Valero (1995) apresentam entre 15 e 30 anos de idade. Geosyntec (1996)<sup>1</sup> apud Zekkos et al (2010) não especifica a idade dos resíduos coletados.

---

<sup>1</sup> Geosyntec. “Waste mass Field investigation. Operating Industries Inc. landfill, Monterey Park, California”. Rep. No. SWP-2, Geosyntec Consultants, Huntington Beach, California, 1996.

**TABELA 2.1. VALORES OBTIDOS DA LITERATURA PARA COMPOSIÇÃO DE RSU.**

Referência	Origem dos RSU	Ocorrência dos materiais (% em peso)									
		Fração pastosa/ matéria orgânica	Madeira	Pedra	Têxteis	Borracha	Plástico	Vidro	Papel	Metal	Outros
Carvalho (1999)	Aterro Sanitário Bandeirantes - SP	55/ 12	4	10	3	2	17	2	2	5	-
Farias e Jucá (2000)	Aterro da Muribeca – PE	- / 49,02	-	-	-	-	12,73	1,62	-	3,51	34,88
Gabr e Valero (1995)	Aterro Pioneer Crossing – Pennsylvania, EUA	0 / 0	9	33	23	13		10	2	10	-
Nas e Bayram (2008)	Área aberta de deposição dos RSU da província de Gümüşhane, Turquia	-/29,8	-	-	1,4	-	7,8	3,3	9,8	1,6	43,7
Nascimento (2007)	Aterro Metropolitano Centro – Salvador - BA	<sup>2</sup> 42,13/ 24,04	4,22	9,64	0,95	0,03	16,47	5,23	15,60	1,36	-
		<sup>3</sup> 44,23/ 24,28	3,85	12,55	9,46	0,11	17,08	1,21	10,68	0,83	-
		<sup>4</sup> 31,45/ 7,30	12,64	5,78	3,30	0,99	34,25	3,55	5,50	2,55	-
Geosyntec (1996) apud Zekkos et al (2010)	Aterro Oil – Los Angeles, EUA	84,8/ -	2,3	-	0,7	1,2	5,8	2,5	1,6	0,6	0,5

<sup>2</sup> Resíduo novo coletado em março de 2006

<sup>3</sup> Resíduo novo coletado em outubro de 2006

<sup>4</sup> Resíduo antigo com 4 anos de aterro

### 2.3.1.2 Distribuição granulométrica

A distribuição granulométrica dos RSU é feita com o material *in natura* e pode variar muito, dependendo da composição dos resíduos. Segundo Mahler e Neto (2000), a massa de resíduos pode ser caracterizada por um material predominantemente granular com elevadas porcentagens de fração grosseira.

De modo geral, para obtenção da curva granulométrica dos RSU os materiais fibrosos (têxteis e plásticos moles) são retirados antes do peneiramento e podem ou não ser incluídos na curva posteriormente (CARVALHO, 1999; NASCIMENTO, 2007).

De acordo com Boscov (2008), com o tempo, os resíduos passam de material granular a material fino e pastoso, ou seja, a biodegradação do material putrescível aumenta a fração fina do material. Nascimento (2007), em sua caracterização do resíduo do Aterro Metropolitano Centro, em Salvador, Bahia, também atenta para uma diminuição da textura do resíduo com o aumento da sua idade.

### 2.3.1.3 Peso específico natural

O peso específico é definido como a razão entre peso e volume de uma amostra coletada de RSU (Equação (2.3)). Para que esse valor represente condições reais dos RSU, o peso específico calculado deve ser do material natural, ou em uma condição o mais próximo possível da *in situ*.

$$\gamma = \frac{\text{Peso}}{\text{Volume}} \left[ \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \right] \quad (2.3)$$

De acordo com Zekkos et al (2006), a retirada de uma amostra indeformada de RSU não é o método mais recomendado para obtenção do peso específico dos RSU. Isso porque a amostra retirada dificilmente será representativa e realmente indeformada, já que as maiores partículas contidas nos resíduos são difíceis de serem amostradas ou podem perturbar a amostragem do material próximo. Em seu trabalho, os autores citam outros métodos de obtenção do peso específico dos RSU.

O peso específico dos RSU depende principalmente da composição do resíduo, da distribuição granulométrica e do grau de compactação. O grau de degradação também é importante, visto que as características do material sólido remanescente são muito diferentes das do material original (BOSCOV, 2008). O teor de umidade e a presença de solo de cobertura das células dos aterros são fatores que também influenciam no valor do peso específico dos resíduos (CARVALHO, 1999). Pode-se observar uma tendência de o peso específico aumentar com o aumento da profundidade em que se encontra o resíduo, devido à maior compressão.

Segundo Zekkos et al (2006), o peso específico de RSU é utilizado para diversas análises de engenharia em aterros, como análises de estabilidade dos taludes, de perfuração nas geomembranas, de danos nos tubos de drenagem e de avaliação da capacidade do aterro. Os autores também atentam para a diferença entre os pesos específicos dos RSU, da cobertura de solo utilizada no aterro e da mistura dos dois, presumindo que os valores citados na literatura são do peso específico total da mistura solo-RSU, que é o parâmetro relevante para as análises em engenharia. A preocupação na diferenciação desses valores só ocorre quando o material utilizado para o cálculo do peso específico é o resíduo antigo retirado de perfurações feitas no aterro. Isso porque o material utilizado para o cálculo do peso específico do resíduo fresco é coletado antes da sua deposição no solo e, conseqüentemente, sem mistura com o solo de cobertura.

A Tabela 2.2 apresenta valores da literatura para o peso específico natural dos RSU.



**TABELA 2.2. VALORES OBTIDOS DA LITERATURA PARA PESO ESPECÍFICO NATURAL DE RSU.**

<b>Referência</b>	<b>Origem dos RSU</b>	<b>Peso específico natural (kN/m<sup>3</sup>)</b>
Carvalho (1999)	Aterro Sanitário Bandeirantes - SP	8 - 15
Chen et al (2009)	Aterro Qizhishan, China	6 - 15
Farias e Jucá (2000)	Aterro da Muribeca - PE	11 - 14
Geosyntec (2003) <sup>5</sup> apud Zekkos et al (2006)	Aterro Cherry Island – Delaware, USA	8 - 12
Matasovic e Kavazanjian JR (1998)	Aterro OII – Los Angeles, EUA	12 - 21
Zekkos et al (2006)	Aterro Tri-Cities – Califórnia, EUA	10 - 16
Zornberg et al (1999)	Aterro localizado em San Gabriel Valley, Los Angeles County, EUA	10 - 15

#### 2.3.1.4 Teor de umidade

O teor de umidade dos RSU não costuma ter distribuição homogênea dentro do maciço de resíduos e varia com a composição do material, com a profundidade, com as condições climáticas locais, com o processo de operação dos aterros, com a taxa de biodegradação, com a capacidade e funcionamento do sistema de coleta e drenagem de chorume e com a cobertura do aterro (CARVALHO, 1999, BOSCOV, 2008). Segundo Zekkos et al (2010), o teor de umidade e o percentual de matéria orgânica são dois parâmetros físicos amplamente reconhecidos por terem uma importante influência nas propriedades mecânicas dos materiais. O autor afirma ainda que o teor de umidade tem impacto sobre a consistência dos materiais mais finos e sobre peso específico e sucção em materiais não saturados, além de poder também influenciar a taxa de recalque e a resistência ao cisalhamento do material estudado.

A Tabela 2.3 apresenta o teor de umidade encontrado por Carvalho (1999) para diversos materiais constituintes dos RSU do Aterro Sanitário Bandeirantes, em São Paulo, mostrando a heterogeneidade das propriedades dos RSU. Os teores de umidade

<sup>5</sup> Geosyntec. "Waste characterization report". Cherry Island Landfill Expansion Project, Wilmington, Del., Geosyntec Consultants Project Number ME0250, Columbia, Md, 2003.

apresentados foram obtidos para resíduos após aproximadamente 15 anos de sua deposição no aterro.

**TABELA 2.3. UMIDADE DOS COMPONENTES DE RSU. FONTE: CARVALHO (1999).**

Componentes	Umidade (%)	
	Base seca	Base úmida
Metais	19,6	16,4
Papel	74,8	42,8
Vidro	5,9	5,57
Plástico	41,5	29,3
Borracha	24,5	19,6
Têxteis	55,0	35,5
Pedra	12,6	11,2
Madeira	69,8	41,1
Pasta orgânica	47,0	32,0

De acordo com Imhoff et al (2007) o teor de umidade dentro de uma célula de resíduos (volume de controle dentro de um aterro sanitário) influencia a biodegradação da matéria orgânica contida nesses resíduos, o fluxo de gases e líquidos no interior da célula e a estabilidade geotécnica do aterro.

Rodriguez et al (2001)<sup>6</sup> apud Imhoff et al (2007) afirmam que o teor de umidade ótimo para que ocorra a biodegradação é de cerca de 65%, mas, de modo geral, o valor encontrado em aterros sanitários é bem menor. A Tabela 2.4 apresenta valores da literatura para o teor de umidade de RSU.

---

<sup>6</sup> RODRIGUEZ, C., HILIGSMANN, M., LARDINOIS, M., DESTAIN, J., RADU, J. P., CHARLIER, R., THONART, P. Cellulose enzymatic availability in solid waste. In: Proceedings Sardinia 2001 Eight international Waste Management and Landfill Symposium, CISA, 2001, Environmental Sanitary Engineering Centre, Italy.

**TABELA 2.4. VALORES ENCONTRADOS NA LITERATURA PARA O TEOR DE UMIDADE DE RSU.**

<b>Referência</b>	<b>Origem dos RSU</b>	<b>Teor de umidade</b>	<b>Comentário</b>
Carvalho (1999)	Aterro sanitário Bandeirantes - SP	45 - 110%	Resíduo com 15 anos
Farias e Jucá (2000)	Aterro da Muribeca – PE	13 – 26%	Diferentes profundidades de resíduo com idade entre 6 meses e 1 ano
Gabr e Valero (1995)	Aterro Pioneer Crossing – Pennsylvania, EUA	30 – 130%	Diferentes profundidades de resíduo com idade entre 15 e 30 anos
Nascimento (2007)	Aterro Metropolitano Centro – Salvador – BA	80 - 130%	Resíduo novo coletado em diferentes épocas
		65%	Resíduo com 4 anos
Zekkos et al (2006)	Aterro Tri-Cities – Califórnia, EUA	12 – 25%	-
	Aterro Oll – Los Angeles, EUA	15 – 42%	-
	Aterro Azusa – Los Angeles, EUA	8 – 50%	-
	Aterro Cherry Island – Delaware, USA	20 – 50%	-

### 2.3.1.5 Permeabilidade

Segundo Carvalho (1999), o coeficiente de permeabilidade dos RSU é um importante parâmetro de projeto e operação de aterros sanitários, principalmente para avaliar problemas de estabilidade e migração não controlada de chorume. Ainda segundo a autora, de modo geral a permeabilidade é avaliada através de ensaios de laboratório e ensaios *in situ*, executados em trincheiras e poços escavados de grande diâmetro ou em furos de sondagem, e seu valor tende a diminuir com a profundidade devido à consolidação dos RSU.

A Tabela 2.5 apresenta valores da literatura para o coeficiente de permeabilidade de RSU.

**TABELA 2.5. VALORES ENCONTRADOS NA LITERATURA PARA O COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE DE RSU.**

<b>Referência</b>	<b>Origem dos RSU</b>	<b>k (cm/s)</b>	<b>Comentário</b>
Carvalho (1999)	Aterro Sanitário Bandeirantes - SP	$5 \times 10^{-6}$ a $8 \times 10^{-4}$	Medição <i>in situ</i>
Nascimento (2007)	Aterro Metropolitano Centro – Salvador – BA	$6,9 \times 10^{-4}$ a $2,7 \times 10^{-3}$	Medição em corpo de prova saturado
Reddy et al (2009)	Aterro Orchard Hills – Illinois, EUA	$10^{-6}$ a $10^{-2}$	Medição em equipamento de ensaio triaxial sob diferentes tensões confinantes
Rocha (2008)	Aterro controlado de Ponte Nova - MG	$9,7 \times 10^{-6}$ a $3,6 \times 10^{-4}$	Medição em permeâmetro de carga constante

### 2.3.2 Características geotécnicas dos resíduos sólidos urbanos

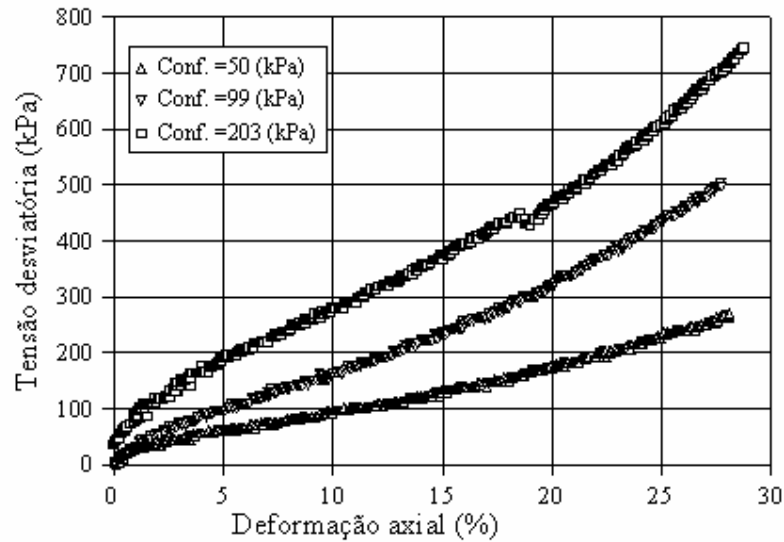
#### 2.3.2.1 Comportamento da curva tensão x deformação

##### 2.3.2.1.1 Em ensaios triaxiais

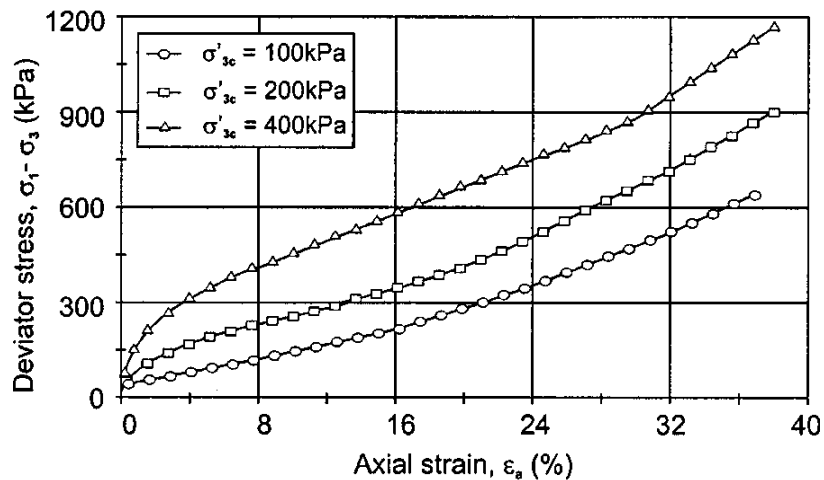
As curvas tensão x deformação obtidas para RSU a partir de ensaios triaxiais apresentam um comportamento típico de aumento de tensões com aumento das deformações axiais, sem apresentar um pico de resistência definido (CARVALHO, 1999, BOSCOV, 2008). As Figuras 2.4 e 2.5 apresentam exemplos da literatura para curvas tensão x deformação obtidas a partir de ensaios triaxiais realizados com RSU. Esses ensaios foram feitos com diferentes tensões confinantes e para RSU de lugares diversos e com diferentes pesos específicos e idades. No entanto, todas as curvas obtidas apresentam o comportamento típico das curvas tensão-deformação de RSU.

Os ensaios que originaram as curvas da Figura 2.4 foram realizados com RSU novo do Aterro Metropolitano Centro, em Salvador. Esses resíduos apresentaram peso específico médio de  $8 \text{ kN/m}^3$  e foram moldados em corpos de prova de aproximadamente 215mm de diâmetro por 380mm de altura. Já os RSU utilizados nos ensaios que geraram as curvas da Figura 2.5 foram retirados do Aterro Bandeirantes, em São Paulo, e apresentaram aproximadamente 15 anos de idade e peso específico

de 10 kN/m<sup>3</sup>. Esses ensaios foram realizados com corpos de prova de 150 e 200mm de diâmetro e 300 e 400mm de altura.

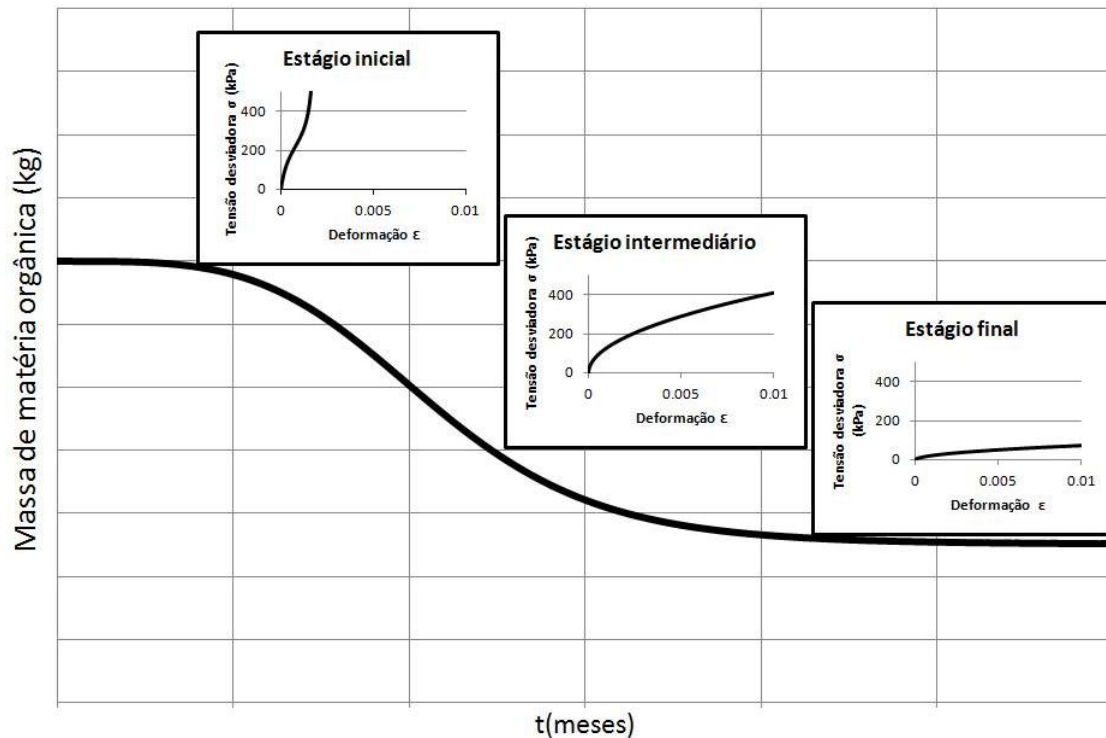


**FIGURA 2.4. CURVAS TENSÃO X DEFORMAÇÃO OBTIDAS A PARTIR DE ENSAIOS TRIAXIAIS REALIZADOS COM RSU NOVO. FONTE: MACHADO ET AL (2005).**



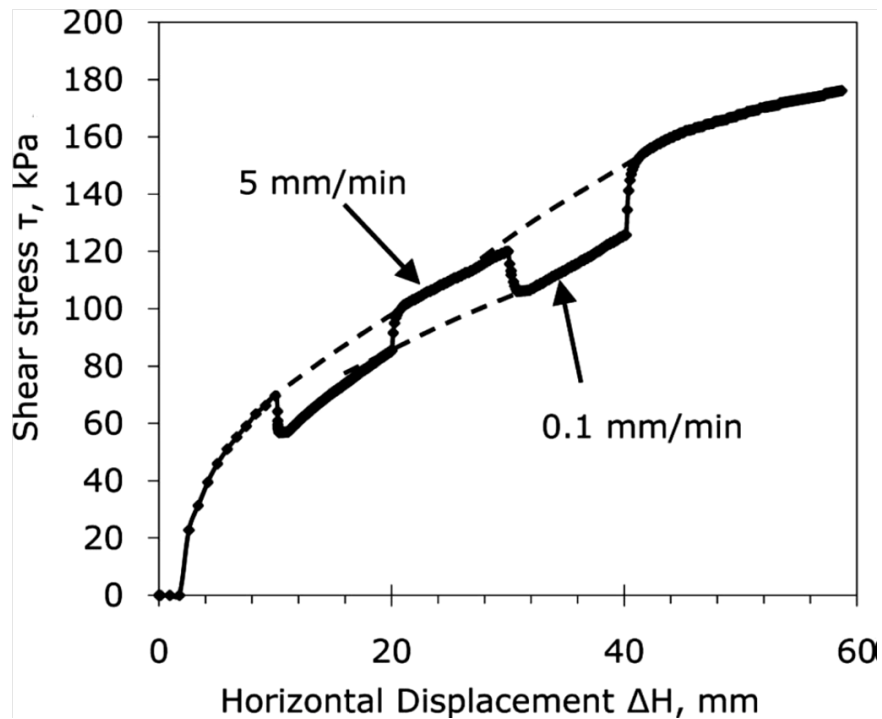
**FIGURA 2.5. CURVAS TENSÃO-DEFORMAÇÃO OBTIDAS A PARTIR DE ENSAIOS TRIAXIAIS REALIZADOS COM RSU COM 15 ANOS DE IDADE. FONTE: MACHADO ET AL (2002).**

Através da análise de curvas e de simulações de ensaios realizadas com o modelo hiperbólico proposto por Otsuka (2010) e Nocko(2010), Nocko (2010) observou que o comportamento da curva tensão-deformação obtida em um ensaio triaxial também depende, além da tensão confinante e composição dos RSU, entre outros, do estágio de degradação em que o resíduo se encontra (Figura 2.6).



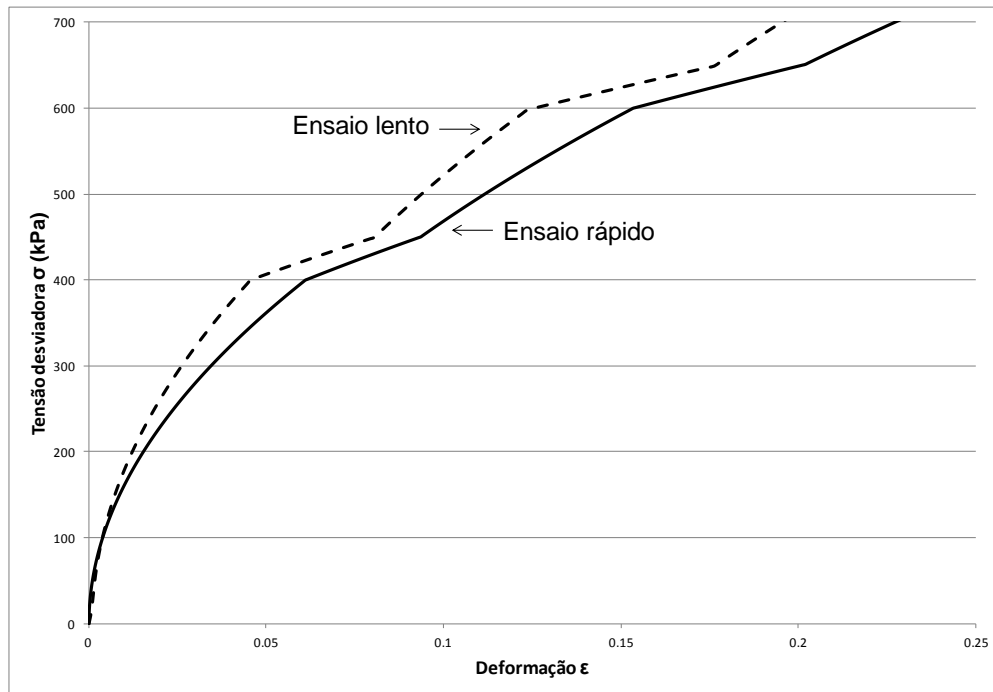
**FIGURA 2.6. RESPOSTA DA CURVA TENSÃO X DEFORMAÇÃO DOS RSU EM FUNÇÃO DA TAXA DE BIODEGRADAÇÃO.**

Ao realizar simulações de carregamentos lentos e rápidos com diferentes tensões verticais aplicadas, Nocko (2010) observou que a taxa de carregamento influencia na resistência dos RSU e aponta para uma taxa ótima de carregamento, conforme já observado por Zekkos et al (2007) e Bray et al (2009). A Figura 2.7 apresenta uma curva tensão-deslocamento obtida experimentalmente por Bray et al (2009) a partir de um ensaio de cisalhamento direto com deslocamento controlado, variando a taxa de deslocamento da amostra de RSU. Essa figura indica um aumento da resistência dos RSU amostrados com o aumento da taxa de deslocamento aplicada no ensaio. Zekkos et al (2007) obtiveram resultados semelhantes aos de Bray et al (2009) para ensaios triaxiais realizados com RSU.



**FIGURA 2.7. CURVA EXPERIMENTAL MOSTRANDO A VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA DOS RSU A PARTIR DA VARIAÇÃO DA TAXA DE CARREGAMENTO. FONTE: BRAY ET AL (2009).**

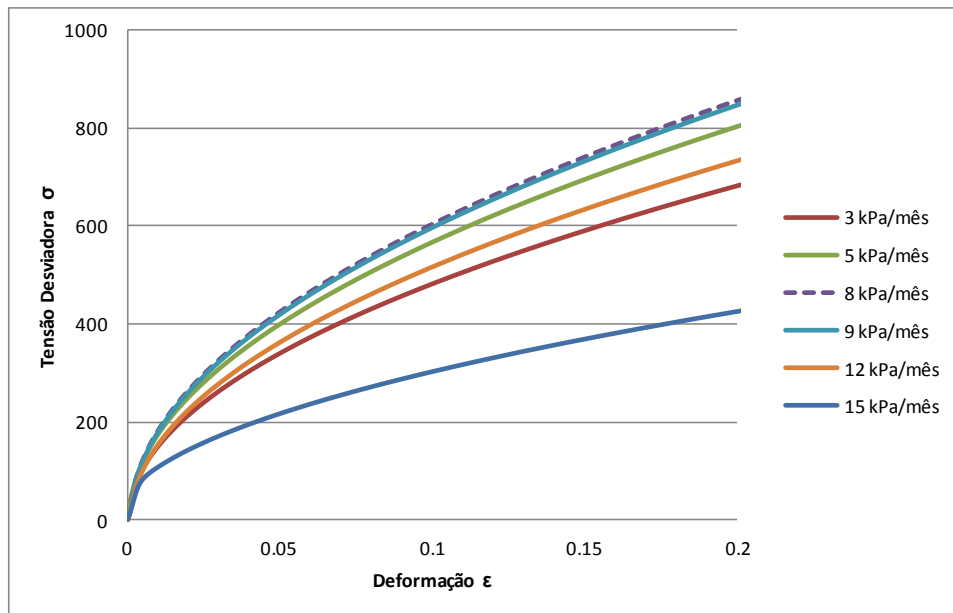
A Figura 2.8 foi obtida através de uma simulação realizada utilizando o modelo matemático proposto por Otsuka (2010) e Nocko (2010) e mostra essa variação de resistência observada por Zekkos et al (2007) e Bray et al (2009). Foram simuladas duas situações: um ensaio triaxial rápido e um carregamento lento, simulando o carregamento de um aterro sanitário. No ensaio triaxial rápido, foram alternadas taxas de aproximadamente 67 kPa/h e 133 kPa/h. O ensaio começa com a taxa de 133 kPa/h e mostra que o ganho de resistência é maior com a maior taxa de carregamento. Na simulação de carregamento lento o mesmo padrão de ganho de resistência é observado, mas as taxas de carregamento alternam entre 3 kPa/mês e 9 kPa/mês. A taxa de carregamento inicial é de 9 kPa/mês.



**FIGURA 2.8. APLICAÇÃO DO MODELO DE OTSUKA (2010) E NOCKO (2010) PARA VERIFICAÇÃO DO GANHO DE RESISTÊNCIA DOS RSU EM FUNÇÃO DO AUMENTO DA TAXA DE CARREGAMENTO.**

No entanto, Bray et al (2009) e Zekkos et al (2007) sugeriram que a resistência do material sempre aumenta com o aumento da taxa de carregamento, enquanto o modelo de Nocko (2010) revelou que esse comportamento só ocorre até um certo limite, a partir do qual a resistência dos resíduos volta a diminuir. A Figura 2.9 apresenta simulações de ensaios triaxiais com diversas taxas de carregamento, apontando que, para uma tensão confinante de 133kPa, uma aplicação de 8kPa mensais de tensão desviadora confere maior resistência aos resíduos.





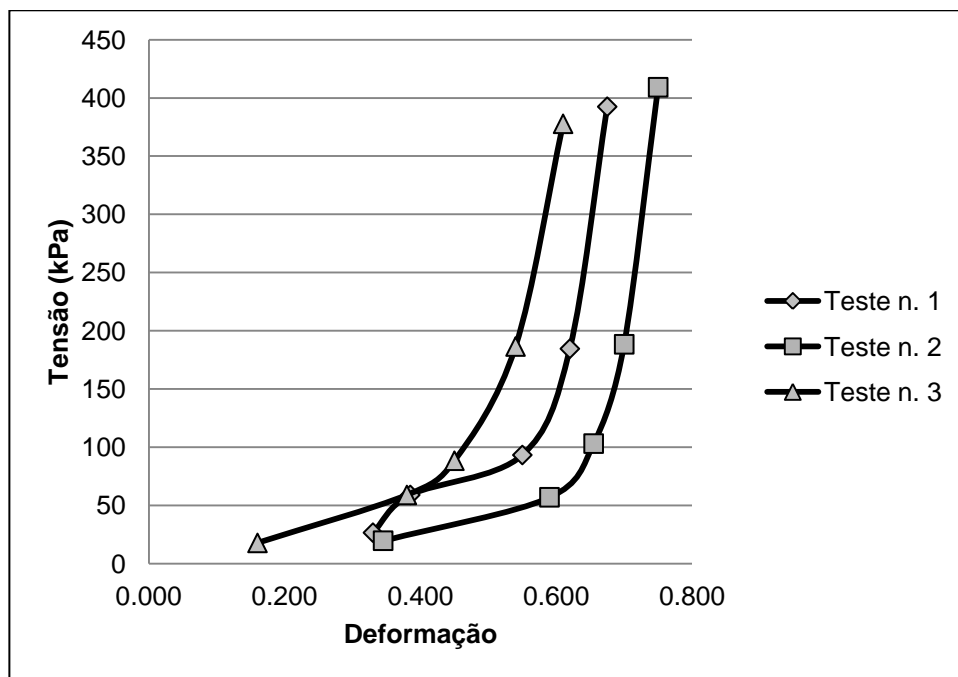
**FIGURA 2.9. VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA DOS RSU EM FUNÇÃO DA TAXA DE TENSÃO DESVIADORA APLICADA. FONTE: NOCKO (2010).**

O fato de a taxa ótima de carregamento ser um valor intermediário, apresentando diminuição da resistência da pilha de resíduos se aumentada ou diminuída, pode explicar alguns casos de ruptura de aterros, mostrando que nem sempre uma maior taxa de carregamento vai proporcionar uma maior resistência ao aterro. Um exemplo disso é a ruptura de um aterro sanitário citado por Qian et al (2001), em 1984. As razões apontadas para essa ruptura, segundo os autores, foram uma chuva ocorrida nos três dias anteriores ao deslizamento e uma deposição de resíduos muito rápida realizada justamente no local da ruptura nos 4 ou 5 meses anteriores ao acidente.

#### 2.3.2.1.2 Em ensaios edométricos

As curvas tensão x deformação obtidas de ensaio edométricos realizados com RSU são muito similares às obtidas com solos. A principal diferença observada entre elas está na magnitude das deformações sofridas: RSU costumam apresentar deformações maiores devido à presença de componentes compressíveis, como plástico (CHEN ET AL, 2010). A Figura 2.10 apresenta exemplos de curvas tensão x deformação obtidas a partir de ensaios edométricos realizados com RSU sintéticos,

produzidos a partir de uma mistura de resíduos reais, para se obter as mesmas características e composição dos RSU nas condições de campo. As amostras ensaiadas foram montadas com um teor de matéria orgânica de 32,5% e diferem pelo seu peso específico seco, sendo o teste n° 1 realizado com um peso específico seco intermediário (2,5 kN/m<sup>3</sup>), o teste n° 2 com um peso específico seco menor (1,9 kN/m<sup>3</sup>) e o teste n°3 com o maior valor de peso específico seco (2,9 kN/m<sup>3</sup>) (CHEN ET AL, 2010).



**FIGURA 2.10. CURVAS TENSÃO X DEFORMAÇÃO OBTIDAS A PARTIR DE ENSAIOS EDMÉTRICOS REALIZADOS COM RSU SINTÉTICOS. FONTE: ADAPTADO DE CHEN ET AL (2010).**

A Figura 2.10 mostra que as curvas apresentam um comportamento inicial bem acentuado, sofrendo grandes deformações no início do ensaio, mas estabilizando esses valores em seguida. Isso ocorre porque, além da expulsão de líquidos da amostra, durante o início do ensaio também ocorre a compressão de componentes menos resistentes, como alguns plásticos e metais.

### 2.3.2.2 Parâmetros de compressibilidade

Os índices de compressão primária ( $C_c$ ) e secundária ( $C_\alpha$ ) são os parâmetros de compressibilidade mais comumente definidos para os RSU. Ambos são obtidos a partir de resultados de ensaios edométricos realizados com os resíduos. No entanto, o índice de compressão primária, ou simplesmente índice de compressão, relaciona o índice de vazios do corpo de prova com a tensão aplicada, enquanto o índice de compressão secundária relaciona o índice de vazios com o tempo (CARVALHO, 1999).

Segundo Carvalho (1999), nos RSU a compressão primária ocorre devido à drenagem dos líquidos presentes no interior do aterro e a compressão secundária é resultante da degradação físico-química e biológica que ocorre com os RSU. A Tabela 2.6 apresenta valores encontrados na literatura para os índices de compressão primária e secundária dos RSU.

**TABELA 2.6. VALORES ENCONTRADOS NA LITERATURA PARA OS ÍNDICES DE COMPRESSÃO PRIMÁRIA E SECUNDÁRIA DOS RSU.**

Referência	Origem do RSU	Índice de compressão primária ( $C_c$ )	Índice de compressão secundária ( $C_\alpha$ )
Carvalho (1999)	Aterro Bandeirantes – SP	0,56 – 0,92	0,004 – 0,047
Chen et al (2009)	Aterro Qizhishan, China	0,2 – 1,4	-
Gabr e Valero (1995)	Aterro Pioneer Crossing – Pensilvânia, EUA	0,4 – 0,9	0,009 – 0,03
Nascimento (2007)	Aterro Metropolitano Centro – Salvador, BA	1,459 – 1,585	0,058 – 0,098
Stoltz et al (2010)	Aterro na França	1,03 – 1,48	-

### 2.3.2.3 Parâmetros de resistência ao cisalhamento

De acordo com Carvalho (1999), as principais propriedades mecânicas dos RSU são fortemente influenciadas pela composição e estado de alteração do resíduo, assim como pelo comportamento mecânico de cada componente. A resistência ao cisalhamento em aterros de RSU é função tanto do atrito entre os resíduos e o solo do aterro quanto do reforço realizado pelos componentes fibrosos dos resíduos (PINTO, 2008), ou seja, depende diretamente da composição dos RSU estudados.

#### 2.3.2.3.1 Ângulo de atrito interno

De acordo com Pinto (2006), o ângulo de atrito interno ( $\phi'$ ) é o ângulo máximo que a força transmitida pelo corpo à superfície pode fazer com a normal ao plano de contato sem que haja deslizamento. Esse parâmetro depende das características do material estudado e apresenta diferentes valores para diferentes tipos de solos. Como os RSU são um material cuja composição é muito diversa, não é possível definir um único valor para seu ângulo de atrito interno, mas, sim, uma faixa de valores aceitáveis. A Tabela 2.7 apresenta valores encontrados na literatura para o ângulo de atrito interno dos RSU e apresenta uma tendência de aumento do ângulo de atrito com a idade.

**TABELA 2.7. VALORES ENCONTRADOS NA LITERATURA PARA O ÂNGULO DE ATRITO INTERNO DOS RSU.**

Referência	Origem dos RSU	$\Phi'$ (°)	Comentários
Carvalho (1999)	Aterro Sanitário Bandeirantes – SP	21 – 27	Ensaio triaxial
		26 – 32	Sondagem SPT
Gabr e Valero (1995)	Aterro Pioneer Crossing – Pennsylvania, EUA	34	Média dos valores obtidos em ensaios triaxiais CU – resíduos com idade entre 15 e 30 anos
		20,5 – 39	Ensaio de cisalhamento direto
Nascimento (2007)	Aterro Metropolitano Centro – Salvador – BA	14 – 27	Ensaio triaxial CD – resíduo novo
		14 – 40	Ensaio triaxial CD – resíduo com 4 anos
Ribeiro (2007)	Aterro sanitário da cidade de Viçosa - MG	30	Retro-análises de rupturas em modelo reduzido Valor sugerido para projetos de estabilidade de taludes de RSU
Reddy et al (2009)	Aterro Orchard Hills – Illinois, EUA	26 - 30	Ensaio de cisalhamento direto

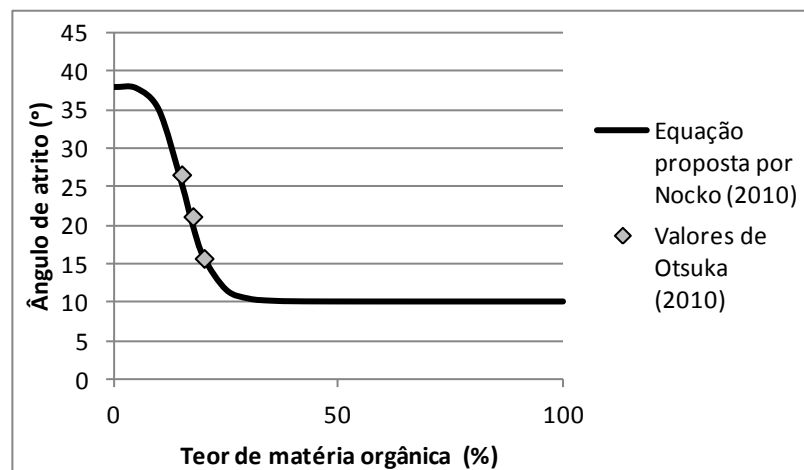
Visando descrever o comportamento desse parâmetro em função da variação do teor de matéria orgânica dos RSU, Nocko (2010) propôs a Equação (2.4). Essa equação foi proposta com base em resultados de ensaios de laboratório realizados por Otsuka (2010) ao simular o comportamento de RSU.

$$\phi(MO') = \phi_{res} + (\phi_0 - \phi_{res}) \cdot \left[ \frac{1}{1 + (\alpha_\phi \cdot \frac{MO'}{M_{total}})^{n_\phi}} \right]^{m_\phi} \quad (2.4)$$

Nessa equação,  $\phi$  (MO) representa o ângulo de atrito interno, em graus ( $^\circ$ ), em função do teor de matéria orgânica dos resíduos;  $\phi_0$  e  $\phi_{res}$  representam os valores, em graus, dos ângulos de atrito interno inicial e residual, respectivamente; e  $\alpha_\phi$ ,  $n_\phi$  e  $m_\phi$  são parâmetros adimensionais para ajuste da curva. A razão  $\frac{MO'}{M_{total}}$  (massa de matéria orgânica por massa total do resíduo) define o teor de matéria orgânica e varia de 0 (resíduo sem matéria orgânica) a 1 (resíduo composto 100% por matéria orgânica). A relação entre  $m_\phi$  e  $n_\phi$  é apresentada na Equação (2.5) (NOCKO, 2010).

$$m_\phi = \frac{n_\phi}{2} \quad (2.5)$$

O comportamento obtido através dessa equação para o ângulo de atrito interno dos RSU em função da variação do teor de matéria orgânica é apresentado na Figura 2.11.



**FIGURA 2.11. VARIAÇÃO DO ÂNGULO DE ATRITO INTERNO DOS RSU EM FUNÇÃO DO TEOR DE MATÉRIA ORGÂNICA. FONTE: NOCKO (2010)**

### 2.3.2.3.2 Coesão

A coesão  $c$ , ao contrário do ângulo de atrito interno, é independente da tensão normal aplicada no plano: esse parâmetro corresponde à atração química entre as partículas de solo (PINTO, 2006). Otsuka (2010) define coesão como um fator de resistência inicial apresentado pelo material.

Os RSU podem apresentar elevados valores de coesão devido à presença de componentes fibrosos (plásticos, têxteis, alguns papéis e papelões, etc) em sua composição. Mahler e Neto (2000) ressaltam que essa coesão, melhor denominada coesão das fibras, é um parâmetro totalmente distinto da coesão definida para solos, visto que não depende das forças eletroquímicas de atração das partículas.

A Tabela 2.8 apresenta valores encontrados na literatura para o intercepto coesivo ( $c'$ ) dos RSU, que é o valor obtido graficamente para representar a coesão.

**TABELA 2.8. VALORES ENCONTRADOS NA LITERATURA PARA O INTERCEPTO COESIVO DOS RSU.**

<b>Referência</b>	<b>Origem dos RSU</b>	<b><math>c'</math> (kPa)</b>	<b>Comentários</b>
Carvalho (1999)	Aterro Sanitário Bandeirantes – SP	42 – 60	Ensaio triaxial
		90 – 150	Sondagem SPT
Gabr e Valero (1995)	Aterro Pioneer Crossing – Pennsylvania, EUA	16,8	Média dos valores obtidos em ensaios triaxiais CU – resíduos com idade entre 15 e 30 anos
		0 – 27,5	Ensaios de cisalhamento direto
Nascimento (2007)	Aterro Metropolitano Centro – Salvador – BA	0 – 26	Ensaio triaxial CD – resíduo novo
		4 – 26	Ensaio triaxial CD – resíduo com 4 anos
Ribeiro (2007)	Aterro sanitário da cidade de Viçosa - MG	12	Retro-análises de ruptura em modelo reduzido (Valor sugerido para projetos de estabilidade de taludes de RSU)
Reddy et al (2009)	Aterro Orchard Hills – Illinois, EUA	31 - 64	Ensaios de cisalhamento direto

Assim como o ângulo de atrito interno, a coesão também varia muito para os RSU devido à sua composição diversificada. Singh e Murphy (1990) apresentam uma relação entre a coesão e o ângulo de atrito interno dos RSU que indica uma redução no valor da coesão conforme o ângulo de atrito interno aumenta (Figura 2.12). Essa relação também foi observada por Ribeiro (2007), a partir de resultados de ensaios edométricos em grande escala com RSU e de rupturas de taludes de resíduos em modelos reduzidos. A área sombreada da Figura 2.12 é, segundo Singh e Murphy (1990), a faixa de valores dos parâmetros de resistência sugerida para o uso em análises de estabilidade.

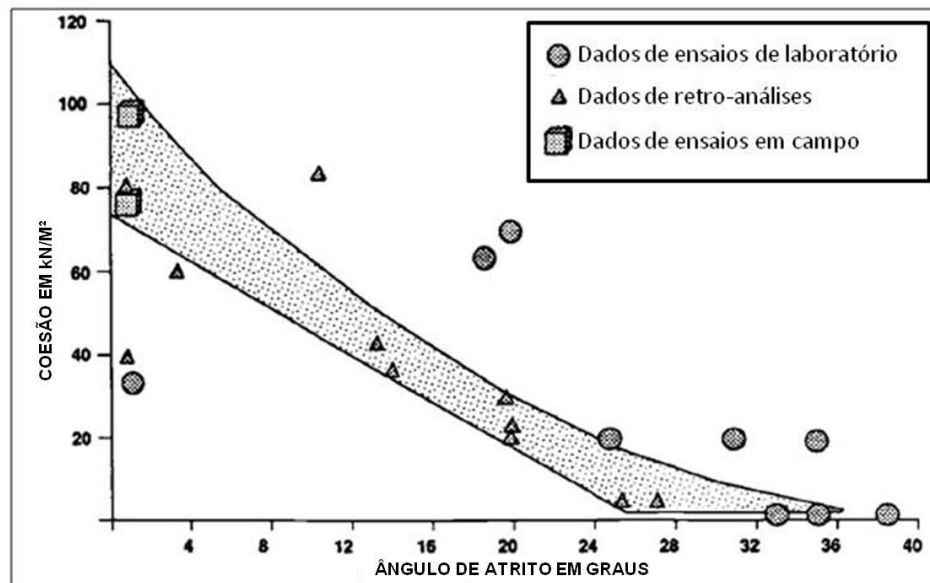


FIGURA 2.12. RELAÇÃO ENTRE COESÃO E ÂNGULO DE ATRITO INTERNO PARA RSU. FONTE: ADAPTADO DE SINGH E MURPHY (1990).

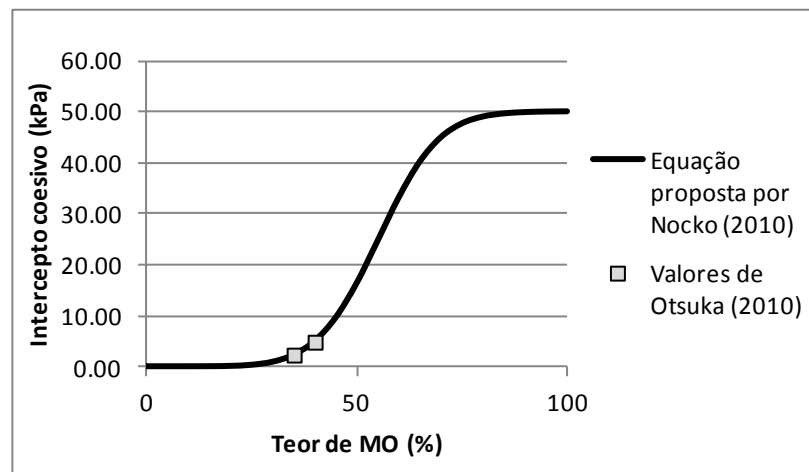
Assim, da mesma forma que para o ângulo de atrito interno, Nocko (2010) propôs a Equação (2.6) para descrever o comportamento do intercepto coesivo em função da variação do teor de matéria orgânica dos RSU.

$$c'(MO') = c'_0 + (c'_{m\acute{a}x} - c'_0) \cdot \left\{ 1 - \left[ \frac{1}{1 + \left( \alpha_c \cdot \frac{MO'}{M_{total}} \right)^{n_c}} \right]^{m_c} \right\} \quad (2.6)$$

Na Equação (2.6),  $c'(MO)$  é o intercepto coesivo, em kPa, para um determinado teor de matéria orgânica;  $c'_0$  e  $c'_{max}$  representam os valores, em kPa, dos interceptos coesivos inicial e máximo, respectivamente; e  $\alpha_c$ ,  $n_c$  e  $m_c$  são parâmetros adimensionais para ajuste da curva. A relação entre  $m_c$  e  $n_c$  é definida pela Equação (2.7).

$$m_c = \frac{n_c}{2} \quad (2.7)$$

A curva obtida através da Equação (2.6) para descrever o comportamento do intercepto coesivo dos RSU em função da variação do teor de matéria orgânica é apresentada na Figura 2.13.



**FIGURA 2.13. VARIAÇÃO DO INTERCEPTO COESIVO DOS RSU EM FUNÇÃO DO TEOR DE MATÉRIA ORGÂNICA. FONTE: NOCKO (2010).**

## 2.4 METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DE SISTEMAS NÃO CONSERVATIVOS DE MASSA

Os parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo são determinados, de modo geral, por ensaios de laboratório. Os mais comumente utilizados são os ensaios de cisalhamento direto e de compressão triaxial (DAS, 2007). O ensaio edométrico é utilizado para a obtenção de parâmetros relacionados com o recalque de um solo no campo.



No entanto, quando o material estudado é o resíduo, os ensaios mais utilizados são o ensaio triaxial e o edométrico. O ensaio de compressão triaxial é mais comum que o ensaio de cisalhamento direto por fornecer informações mais completas a respeito do comportamento da amostra estudada. Segundo Bardet (1997), o ensaio triaxial é usado para determinar as características de resistência tensão-deformação de solos sob condição drenada ou não drenada e, por permitir em laboratório a reprodução das variações de tensões no campo, é mais realista que o ensaio de cisalhamento direto. Da mesma forma, Das (2007) afirma que o ensaio de compressão triaxial é um dos mais confiáveis métodos disponíveis para a determinação dos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos.

O ensaio edométrico relaciona a variação na altura da amostra, dada uma carga aplicada no corpo de prova, com a variação do seu índice de vazios, e permite a obtenção da sua tensão de pré-adensamento, além de outros parâmetros geotécnicos utilizados para o cálculo de recalques em solos (módulo de compressão volumétrica, coeficientes de deformação volumétrica e de compressibilidade, índice de compressibilidade). Todos os ensaios laboratoriais citados são descritos detalhadamente por Bardet (1997).

Segundo Carvalho (1999), a principal dificuldade na obtenção e análise dos resultados de ensaios de laboratório realizados com RSU é devido à heterogeneidade do material, que pode apresentar diferentes propriedades e dimensões. Bray et al (2009) afirmam que, além da heterogeneidade, outro obstáculo para obtenção da resistência ao cisalhamento dos RSU é a dificuldade em obter e testar amostras representativas de resíduos devido às grandes dimensões de alguns de seus constituintes. Além disso, diferentemente de quando se lida com solos, quando o material em estudo são os RSU os parâmetros físicos e geotécnicos que os descrevem variam no tempo devido à biodegradação. Devido a essas dificuldades, muitas propriedades geotécnicas desses resíduos acabam sendo estimadas sem muito rigor ou ainda sem uma metodologia padrão bem definida entre os autores.

Buscando entender esses sistemas não conservativos de massa, Otsuka et al (2010) desenvolveram um material composto por areia e coloide gelatinoso. Esse material permitiu a simulação de ensaios feitos com resíduos, com a vantagem de

apresentar um custo reduzido, obter parâmetros geotécnicos de forma padronizada e permitir que os ensaios fossem feitos com amostras menores, mas igualmente representativas. Além disso, a presença do componente coloidal permitiu a simulação da redução de massa do resíduo devido ao processo de biodegradação através da transformação da fase semi-sólida do coloide em fase líquida. Os autores observaram também uma tendência de aumento do intercepto coesivo e diminuição do ângulo de atrito conforme o teor de coloide aumentava. Ensaio triaxiais realizados com solo-coloide por Otsuka et al (2010) e Sales (2010) confirmaram a eficácia do uso da mistura solo-coloide como ferramenta para auxiliar o entendimento da dinâmica de sistemas não conservativos de massa.

## 2.5 MODELOS

A biodegradação dos RSU depende de diversos fatores, como umidade e temperatura, que são de difícil monitoramento se considerada a disposição desses resíduos em células integrantes de um aterro sanitário. Nessas instalações, a degradação de matéria orgânica resulta em um aumento do índice de vazios e redução da resistência do aterro, com consequente diminuição do seu volume e recalque (EL-FADEL e KHOURY, 2000). Além disso, o processo de biodegradação também resulta na geração de biogás e chorume e altera diversas propriedades do maciço de resíduos, como ângulo de atrito, coesão, peso específico e teor de umidade, que influenciam seu comportamento mecânico.

Diversos modelos foram propostos para simular a geração de biogás e chorume, decorrentes da biodegradação, no interior de aterros sanitários (MACHADO ET AL, 2009; MERAZ ET AL, 2004; EL-FADEL ET AL, 1996a; EL-FADEL ET AL, 1996b; USTOHALOVA ET AL, 2006; HASHEMI, 2002; NASTEV ET AL, 2001). Habitzreuter (2005) propôs o Modelo Unificado de Geração de Gás (MUG<sup>2</sup>), calibrado por Otsuka (2007), que estima a geração de biogás através do processo de biodegradação. A Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (*United States Environmental Protection Agency*) (USEPA, 1995) também propôs uma formulação para a geração de metano e outros gases em células de RSU.

Pinto (2008) adaptou o MUG<sup>2</sup> para a geração de líquidos em aterros sanitários. A autora modelou matematicamente uma equação química proposta por Meraz et al (2004), que considera a glicose como substância representativa de toda a matéria orgânica presente nos resíduos. Nessa reação, a glicose, reagindo com a amônia como fonte de nitrogênio, gera metano, gás carbônico, água e biomassa, em uma reação que, segundo os autores, representa o processo de biodegradação da matéria orgânica na presença de bactérias anaeróbias. Com esse modelo é possível determinar a taxa de geração de biogás e líquidos no aterro em função do tempo de degradação do resíduo, permitindo dimensionar sistemas de coleta e tratamento desses efluentes de forma mais objetiva.

Cortázar e Monzón (2007) propuseram o MODUELO 2, que é uma versão aperfeiçoada do MODUELO 1, programa desenvolvido para calcular a geração tanto de gases quanto de líquidos em aterros (LOBO ET AL, 2008).

Além de modelos para descrever os processos que ocorrem no interior de um aterro sanitário, também estão sendo propostos modelos para descrever o comportamento mecânico do aterro como um todo, acoplado ou não o processo de biodegradação, a fim de diagnosticar áreas de possível instabilidade geotécnica e evitar deslizamentos da pilha de resíduos.

### 2.5.1 Modelos para previsão do comportamento mecânico de RSU em aterros sanitários

Devido à grande quantidade de fatores que influenciam o comportamento dos RSU ao longo do tempo, a modelagem matemática do comportamento mecânico desses resíduos envolve diversas aproximações e pode ser analisada através de diferentes abordagens. El-Fadel e Khoury (2000) afirmam que, apesar de muitos modelos matemáticos reconhecerem a importância da biodegradação no recalque de aterros, são poucos os que relacionam esse processo quantitativamente, devido às dificuldades em estimar parâmetros para descrever essas complexas reações biológicas em aterros. De modo geral, os modelos para previsão do comportamento

mecânico dos RSU utilizam como ponto de partida as formulações da mecânica dos solos.

Ling et al (1998) propuseram um modelo hiperbólico reológico para previsão dos recalques em aterros sanitários. A curva resultante do modelo se ajusta bem aos pontos experimentais, mostrando que a formulação hiperbólica apresenta resultados satisfatórios na previsão do comportamento mecânico dos RSU. No entanto, os autores apontam para a necessidade de calibração dos parâmetros utilizados no modelo: foi observado que esses parâmetros possuem relação com o teor de umidade dos resíduos, mas nenhuma formulação foi proposta. Ling et al (1998) também não consideraram o processo de biodegradação na sua formulação.

Simões (2000) propôs um modelo em que o recalque total sofrido em cada camada de resíduo é resultante da soma dos recalques devido ao carregamento, ao comportamento viscoso ou *creep* dos resíduos e à sua biodegradação. As parcelas de carregamento e comportamento viscoso são descritas por funções logarítmicas e a parcela da biodegradação é descrita por um decaimento exponencial da massa do resíduo. O autor considera que os parâmetros utilizados no modelo (peso específico, teor de umidade, biodegradabilidade potencial, coeficientes de compressão) são constantes ao longo do tempo.

Assim como o de Simões (2000), o modelo proposto por Marques et al (2002) também é a combinação de três mecanismos de compressão: compressão mecânica primária, compressão mecânica secundária e uma compressão secundária devido à biodegradação. O modelo reológico proposto utiliza cinco parâmetros dos resíduos como dados de entrada: coeficientes de compressão mecânica primária e secundária, taxas de compressão mecânica secundária e de compressão biológica secundária, e compressão total devido à degradação dos resíduos. Além disso, também utiliza os valores de tensão vertical inicial, de incremento de tensão vertical e de tempo (tanto o tempo de deposição quanto o tempo de aplicação da carga). Os autores desenvolveram um código computacional para calcular os recalques do aterro com base no modelo proposto e a comparação desses valores com dados do Aterro Bandeirantes, em São Paulo, apresentou bons resultados. No entanto, todos os parâmetros dos resíduos

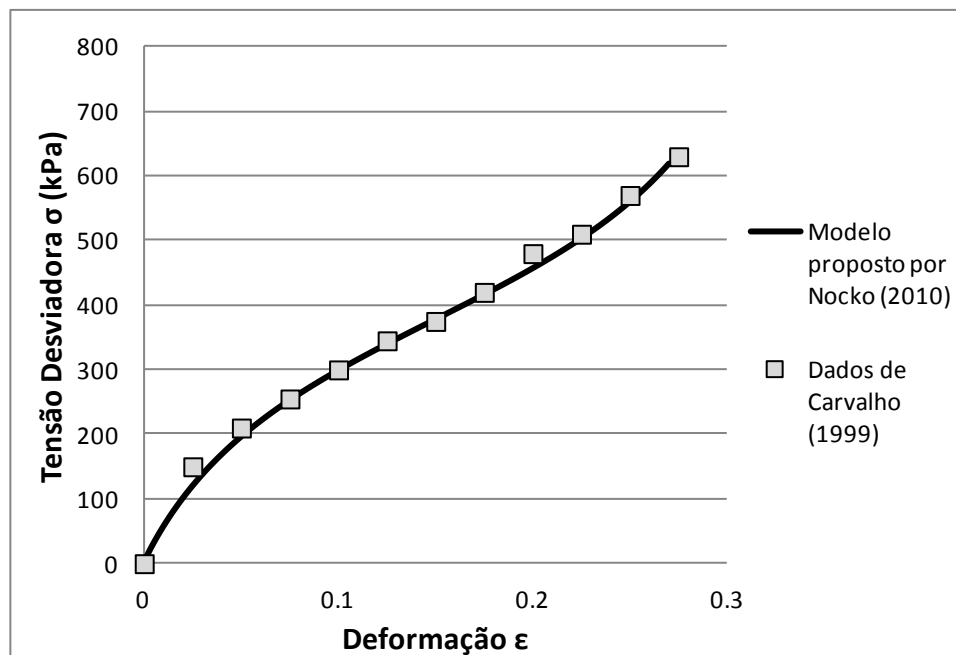
utilizados no código computacional, incluindo o peso específico, foram considerados constantes.

Machado et al (2002) desenvolveram um modelo em que são sugeridos dois efeitos diferentes responsáveis pelo comportamento mecânico dos RSU: o reforço dos resíduos pelas fibras sintéticas e o comportamento da fração pastosa dos resíduos. Cada um desses efeitos possui um modelo constitutivo próprio, sendo o primeiro um modelo elasto-plástico perfeito e o segundo um modelo elasto-plástico não reológico. Assim, considera-se que a deformação volumétrica dos resíduos é igual à deformação sofrida pela fração pastosa, negligenciando a deformação sofrida pelas fibras, e que a tensão desviadora aplicada no resíduo é uma média ponderada das tensões que agem nas fibras e na fração pastosa. O modelo foi desenvolvido com base em dados da literatura, em dados de ensaios de laboratório realizados com RSU e em dados de medição de recalques de um aterro sanitário. No entanto, apesar de apresentar resultados satisfatórios para a curva tensão x deformação gerada por ensaios triaxiais com RSU, o modelo utiliza, como dados de entrada, valores que podem ser de difícil obtenção, como os volumes da fração pastosa e das fibras e o índice de vazios da fração pastosa.

Babu et al (2010) propuseram uma formulação baseada no modelo Cam Clay modificado, que prevê o comportamento tensão-deformação de uma amostra submetida a um carregamento em um ensaio triaxial. Essa formulação utiliza funções exponenciais para descrever o *creep* e a biodegradação sofrida pela matéria orgânica contida nos resíduos e considera que a resposta tensão-deformação apresentada pelos RSU é ditada pela sua natureza fibrosa. Apesar de o modelo proposto por Babu et al (2010) se mostrar mais acurado que o Cam Clay na previsão do comportamento tensão-deformação de RSU, a curva gerada não conseguiu acompanhar os dados experimentais com precisão ao longo de toda a simulação.

Otsuka (2010) propôs uma formulação baseada no modelo hiperbólico proposto por Kondner (1963), que descreve a curva tensão-deformação de um solo submetido a um ensaio triaxial sob tensão confinante constante. O modelo hiperbólico foi escolhido por Otsuka (2010) para descrever o comportamento mecânico dos RSU visto que, ao descrever o comportamento geomecânico dos solos, esse modelo não apresenta picos

de resistência, assim como as curvas tensão-deformação dos RSU. Após a proposição da equação geral do modelo por Otsuka (2010), Nocko (2010) propôs as equações constitutivas desse modelo, descrevendo o ângulo de atrito interno, o intercepto coesivo e os parâmetros  $k$  e  $n$  da equação de Janbu (obtidos como proposto por Duncan e Chang (1970)) como funções do teor de matéria orgânica dos RSU, e a biodegradação da matéria orgânica presente nos RSU como função do tempo. O modelo conseguiu reproduzir satisfatoriamente curvas experimentais encontradas na literatura, obtidas através de ensaios triaxiais realizados com RSU, como apresentado na Figura 2.14. A formulação também permite obter, a partir de dados de ensaios triaxiais, a taxa de biodegradação dos resíduos no momento do ensaio, além de uma taxa ótima de deposição de resíduos para que a resistência do aterro seja máxima.



**FIGURA 2.14. MODELO PROPOSTO POR OTSUKA (2010) E NOCKO (2010) APLICADO AOS DADOS DE ENSAIOS TRIAXIAIS DE CARVALHO (1999), REALIZADOS COM TENSÃO CONFINANTE DE 200 KPA. FONTE: NOCKO (2010).**

A Tabela 2.9 é um resumo dos modelos anteriormente discutidos e apresenta a equação geral de cada modelo, juntamente com as hipóteses adotadas para cada um e suas vantagens e desvantagens. O significado de cada símbolo utilizado nas formulações está apresentado no Apêndice A.

**TABELA 2.9. RESUMO DOS MODELOS PARA PREVISÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DOS RSU.**

Autor	Formulação geral	Hipóteses	Vantagens e desvantagens
Babu et al (2010)	$d\varepsilon_v = \frac{\kappa}{1+e} \frac{dp'}{p'} + \left( \frac{\lambda - \kappa}{1+e} \right) \left[ \frac{dp'}{p'} + \frac{2\eta d\eta}{M^2 + \eta^2} \right] + cb\Delta\sigma e^{-ct} dt$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Elasto-plástico</li> <li>• Baseado no Cam Clay modificado</li> <li>• Reológico</li> </ul>	<p>+ Considera o processo de biodegradação na sua formulação;</p> <p>– Apresenta parâmetros somente para três situações bem definidas: resíduo novo, resíduo com 1,5 anos de idade e resíduo sintético;</p> <p>– Os parâmetros foram obtidos a partir de ensaios de compressão rápidos. Para simular ensaios lentos os parâmetros devem ser recalculados.</p>
Ling et al (1998)	$S = \frac{t}{1/\rho_0 + t/S_{ult}}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hiperbólico</li> <li>• Reológico</li> </ul>	<p>+ Mostra que a função hiperbólica é uma alternativa bastante precisa para a previsão de recalques em aterros sanitários;</p> <p>– Não considera o processo de biodegradação na sua formulação;</p> <p>– Não apresenta uma forma padronizada de obtenção de seus parâmetros.</p>
Machado et al (2002)	<p>Deformação volumétrica total:</p> $d\varepsilon_v = V_e \left( \frac{1+e_p}{1+V_e e_p} \right) d\varepsilon_{vp}$ <p>Deformação cisalhante elástica:</p> $d\varepsilon_s = d\varepsilon_{sp} \cdot V_p + d\varepsilon_{sf} \cdot V_f$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Elasto-plástico perfeito para o reforço fibroso</li> <li>• Elasto-plástico para o comportamento da fração pastosa</li> </ul>	<p>+ Considera a presença de uma fração pastosa com características mecânicas diferenciadas nos resíduos;</p> <p>– Não considera o processo de biodegradação na sua formulação;</p> <p>– É necessária a análise da composição gravimétrica do resíduo para obter a proporção de fibras presente;</p> <p>– A aplicação do modelo depende da obtenção de seus parâmetros através de ensaios de laboratório adaptados para grandes amostras ou de retro-análises realizadas em aterros.</p>

<p>Marques et al (2002)</p>	$\varepsilon = \frac{\Delta H}{H} = C'_c \cdot \log \left[ \frac{(\sigma_0 + \Delta\sigma_v)}{\sigma_0} \right] + \Delta\sigma_v \cdot b(1 - e^{-ct'})$ $+ E_{DG}(1 - e^{-dt''})$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Logaritmo e exponencial</li> <li>• Reológico</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Considera o processo de biodegradação na sua formulação;</li> <li>- Os parâmetros característicos dos resíduos são considerados constantes com o tempo.</li> </ul>
<p>Otsuka (2010) e Nocko(2010)</p>	$\frac{\partial Etg}{\partial t} = \frac{\partial Ei}{\partial t} - 2R_f \cdot \sigma_d \cdot \frac{\partial(Ei/S)}{\partial t} + (R_f \cdot \sigma_d)^2 \cdot \frac{\partial(Ei/S^2)}{\partial t}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hiperbólico</li> <li>• Reológico</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Acopla o processo de biodegradação à sua formulação;</li> <li>+ Considera seus parâmetros variáveis com o teor de matéria orgânica e propõe equações constitutivas para obtê-los;</li> <li>+ Permite a obtenção da taxa de degradação dos resíduos ensaiados;</li> <li>+ Permite a determinação de uma taxa de carregamento ótima para o aterro;</li> <li>- Exige a realização de ensaios triaxiais em RSU, o que é caro e complexo se for realizado em maior escala, a fim de obter a real resposta do material;</li> <li>- Algumas equações apresentam restrições de uso por não estarem bem calibradas.</li> </ul>
<p>Simões (2000)</p>	<p>Carregamento: <math>\Delta H_1 = H_0 \cdot C_R \cdot \log \left( \frac{P_0 + \Delta P}{P_0} \right)</math></p> <p>Creep: <math>\Delta H_2 = H_0 \cdot C_\alpha \cdot \log \frac{t}{t_i}</math></p> <p>Biodegradação: <math>\Delta M_{ij}(t) = M_{ij0} \cdot (1 - e^{-k_{ij}(t-t_0)})</math></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Logaritmo e exponencial</li> <li>• Reológico</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Considera o processo de biodegradação na sua formulação;</li> <li>- Apresenta um meio de cálculo dos parâmetros que exige o estudo da composição gravimétrica de cada amostra de RSU ensaiada;</li> <li>- Considera que os parâmetros do modelo não variam com o tempo.</li> </ul>



### 3 COMPONENTE EXPERIMENTAL

Para o desenvolvimento e calibração de um modelo de previsão do comportamento de RSU submetidos a ensaios edométricos eram necessários dados de laboratório que permitissem o estudo da variação do comportamento e das propriedades desses resíduos em função da variação do seu teor de material pastoso. Para isso, foram realizados ensaios edométricos com solo-coloide, mistura proposta por Otsuka et al (2010). Esse material foi escolhido por simular de forma bastante satisfatória o comportamento de RSU submetidos a ensaios triaxiais (OTSUKA ET AL, 2010, SALES, 2010), com a vantagem de ser um material mais barato, mais homogêneo e mais simples de lidar que os resíduos, além de permitir a utilização de uma metodologia de montagem de corpos de prova padronizada.

Para a realização de ensaios com essa mistura, foi necessário fazer uma caracterização prévia tanto do solo quanto do coloide utilizado. Também foi estabelecida uma metodologia de montagem de corpos de prova para ensaios edométricos, bem como para a realização do ensaio.

#### 3.1 CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS

Para o desenvolvimento de corpos de provas produzidos com solo-coloide foi necessário realizar, primeiramente, a caracterização tanto do solo quanto do coloide gelatinoso usado.

##### 3.1.1 Caracterização do solo

O solo utilizado para a realização dos ensaios foi uma areia quartzosa, escolhida por ser um material similar ao utilizado por Otsuka et al (2010) e Sales (2010) na definição de metodologias de montagem dos corpos de prova feitos com solo-coloide. Para a caracterização do solo foram definidos: o peso específico real dos grãos, a curva granulométrica do material, a relação entre altura de queda e densidade relativa do solo quando realizada uma chuva de areia, o coeficiente de permeabilidade do material e os

parâmetros de resistência ao cisalhamento (coesão e ângulo de atrito interno). Todo o material utilizado nos ensaios foi previamente seco ao ar e passado em uma peneira de 2mm.

A densidade real dos grãos foi determinada de acordo com o ME 093/94 (DNER, 1994).

A curva granulométrica do solo foi construída com base nos resultados dos ensaios de sedimentação e peneiramento fino do solo, ambos realizados de acordo com a NBR 7181 (ABNT, 1984).

Segundo Presti et al (1992), o método da chuva de areia é a melhor alternativa para obtenção dos índices de vazios máximo e mínimo de um solo granular, sendo preferível até em relação aos métodos que incluem vibração, visto que apresenta menor segregação das partículas devido ao seu tamanho, medição mais acurada da densidade e melhor repetibilidade do experimento. Assim, a curva da variação da densidade relativa do solo foi traçada em função da altura de queda do material no processo de chuva de areia.

A chuva de areia foi feita com base nos trabalhos de Presti et al (1992) e Miura e Toki (1982). Um funil foi utilizado para precipitar a areia, com vazão de queda constante, dentro de um cilindro com 10 cm de diâmetro interno e 30 cm de altura, com uma borda superior de 10,7 cm de diâmetro interno e 1,4 cm de altura. A chuva foi feita até uma altura de queda de 50cm, a partir da qual começou a ser observado um efeito de borda, em que os grãos da areia batem nas bordas do cilindro durante a queda, alterando sua altura de queda efetiva. Após encher o cilindro, a superfície livre era nivelada com uma régua metálica para garantir o volume de solo.

Sabendo-se a densidade real dos grãos, o volume ocupado pelo solo no cilindro e a massa de solo utilizada no procedimento, foi possível calcular o índice de vazios obtido para cada altura de queda. A densidade relativa foi calculada de acordo com ASTM (2006).

O índice de vazios máximo foi obtido com uma chuva de areia feita com altura de queda igual a zero. O índice de vazios mínimo foi obtido com uma chuva de areia com altura de queda de aproximadamente 85 cm, com vibração do cilindro durante e após seu preenchimento.

Para determinação do coeficiente de permeabilidade da areia foi utilizado um permeâmetro de carga constante, como o permeâmetro do tipo 1 descrito na NBR 13292 (ABNT, 1995). O corpo de prova também foi montado de acordo com a norma, com a areia sendo depositada no permeâmetro com auxílio de um funil e com altura de queda próxima a zero. O corpo de prova não foi submetido a compactação.

A saturação da areia foi feita por fluxo ascendente. Após completa saturação da areia, o sentido do fluxo de água foi invertido. Quando as cargas nos tubos manométricos se igualaram, a válvula para saída de água na parte inferior do permeâmetro foi aberta. Após a estabilização das cargas, foi feita uma medição da diferença de cargas nos tubos e da vazão de saída de água do permeâmetro. A partir desses dados, das características do permeâmetro e da Lei de Darcy, obteve-se o coeficiente de permeabilidade do material,  $k$ .

Os parâmetros de resistência ao cisalhamento foram determinados a partir de ensaios de cisalhamento direto realizados com a areia seca. O corpo de prova foi montado diretamente na caixa de cisalhamento através de chuva de areia com altura de queda nula, ou seja, com o maior índice de vazios possível. Os ensaios foram realizados com deslocamento controlado de aproximadamente 0,13 mm/min (1mm a cada 7,5 minutos) e tensões normais de 20, 28, 40, 60, 80, 100 e 120 kPa.

### 3.1.2 Caracterização do coloide

O material utilizado para elaboração do coloide foi colágeno de origem animal industrializado, comercialmente designado como gelatina. Esse colágeno possui origem bovina com processo de produção controlado. Diferentemente de Sales (2010) e Otsuka (2010), optou-se por utilizar o colágeno sem açúcar, sem cor e sem sabor, visando evitar um possível aumento de resistência causado pela cristalização do açúcar contido nesses tipos de produtos. O material utilizado é produzido pela Kraft Foods, é vendido em embalagens de 24g, separada em dois envelopes de 12g cada, e é denominado comumente de gelatina Royal.

O coloide foi preparado de acordo com as instruções contidas na embalagem, sendo que cada embalagem de 12g rendeu 0,5l de mistura líquida.

Para determinação da massa específica do coloide no estado líquido (aproximadamente 37°C) foram utilizados picnômetros de 50ml, onde a mistura foi adicionada e o conjunto foi pesado. A partir da relação de massa e volume obtida foi calculada a massa específica do coloide no estado líquido.

Para a determinação da massa específica da mistura no estado coloidal, uma amostra de coloide foi preparada e deixada na geladeira até obtenção do estado coloidal do material e estabilização da temperatura (aproximadamente 3°C). Nessa amostra foi cravado um anel metálico com altura de 2cm e diâmetro interno de 7,64cm e, a partir da relação entre os valores de massa e volume obtidos, foi calculada a massa específica da mistura no estado coloidal.

### 3.2 METODOLOGIA PARA MONTAGEM DOS CORPOS DE PROVA

Para montagem dos corpos de prova foram utilizados bipartidos de PVC de 10 cm de diâmetro interno por 20 cm de altura. Os bipartidos possuíam peças para sua vedação superior e inferior. Para vedação dos contatos entre as peças foi utilizado silicone.

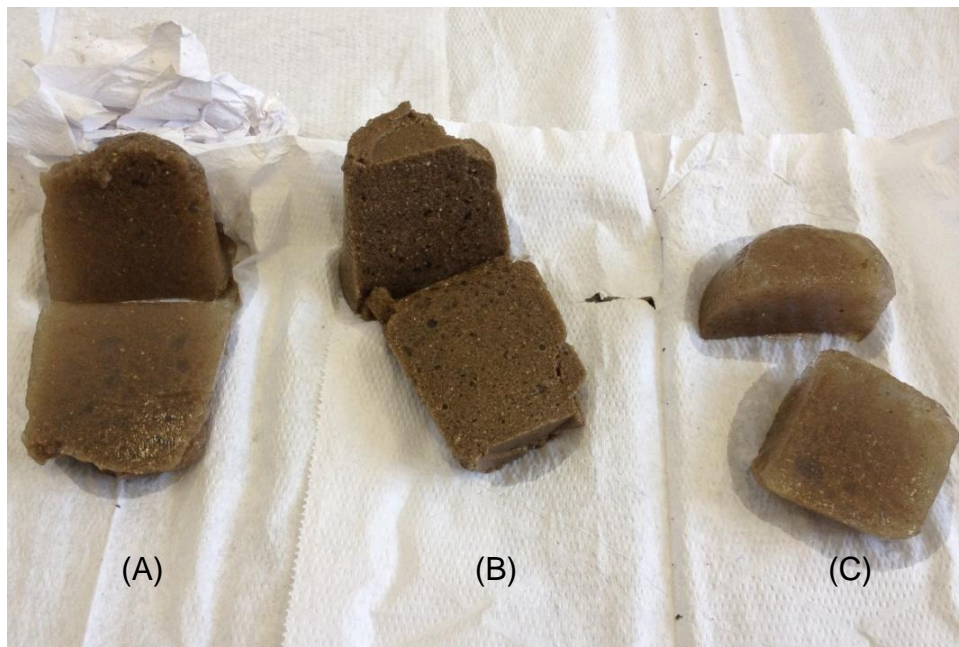
Antes da montagem de cada corpo de prova era aplicada uma camada de vaselina sólida no interior dos bipartidos e na peça de vedação inferior, para que, depois de pronta, a mistura solo-coloide se soltasse do molde com facilidade, sem romper. Após aplicada a vaselina, o bipartido era montado, vedado com silicone e deixado em repouso por aproximadamente 24 horas para a secagem completa da vedação.

O coloide era preparado como indicado na embalagem e, depois de pronto, era despejado dentro do bipartido previamente seco. O conjunto era levado à geladeira a uma temperatura próxima de 3°C por aproximadamente 70 minutos, até atingir um estado intermediário entre o estado líquido e o estado coloidal, quando, então, a areia era adicionada à mistura e os dois eram misturados até a máxima homogeneidade. Nesse estado físico da mistura era possível acrescentar a quantidade desejada de areia sem que o solo decantasse, permitindo uma mistura visualmente homogênea. Após a

mistura, o conjunto permanecia na geladeira por, no mínimo, mais 12 horas, para garantir um estado semissólido homogêneo em toda a amostra.

Para a amostra somente de coloide, o procedimento era o mesmo, mas sem a mistura de solo.

A Figura 3.1 apresenta amostras de solo-coloide em corte, com diferentes teores de coloide, para possibilitar a análise da homogeneidade da mistura. É possível perceber que o teor de coloide é homogêneo na amostra como um todo, mas, como o solo é adicionado ao coloide quando esse já se encontra em um estado semissólido, a amostra apresenta regiões pontuais com maior concentração de coloide. A presença dessas regiões não é um problema, visto que, tratando-se de RSU, uma amostra de grandes dimensões também apresenta homogeneidade de um modo geral, mas possui pequenos núcleos formados pelos diferentes materiais componentes dos resíduos.



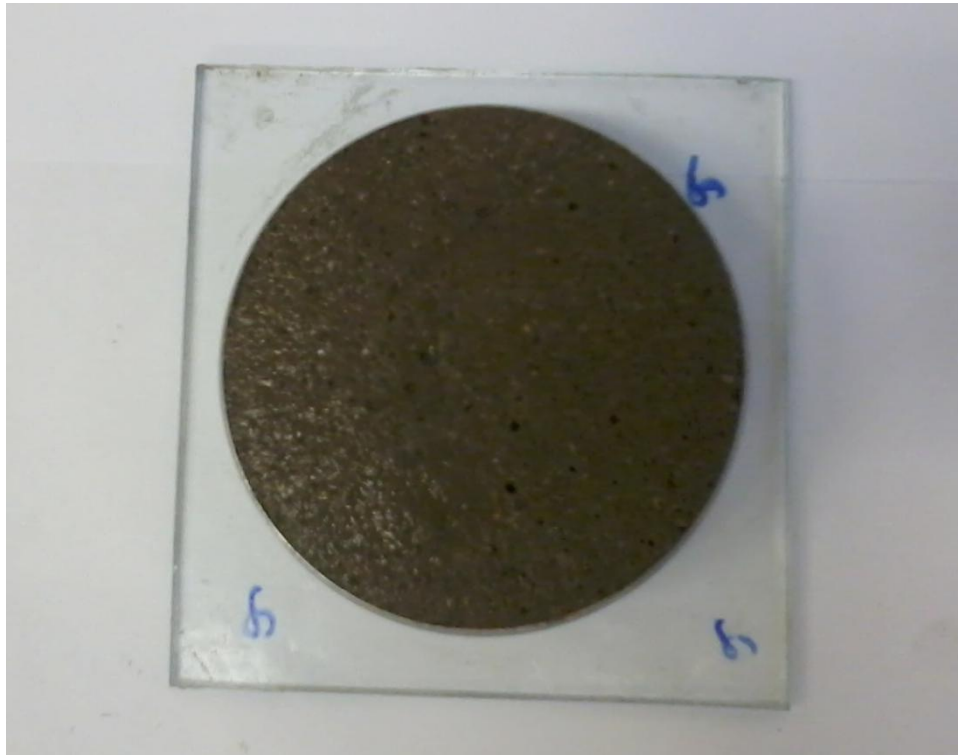
**FIGURA 3.1. AMOSTRAS DE SOLO-COLOIDE EM CORTE PARA ANÁLISE DA HOMOGENEIDADE DA MISTURA: (A) 87% DE COLOIDE, (B) 59% DE COLOIDE E (C) 95% DE COLOIDE.**

Por ter um diâmetro maior que o do anel de adensamento, a amostra produzida no bipartido permitia o cravamento desse anel, resultando na obtenção de um corpo de prova de tamanho exato.

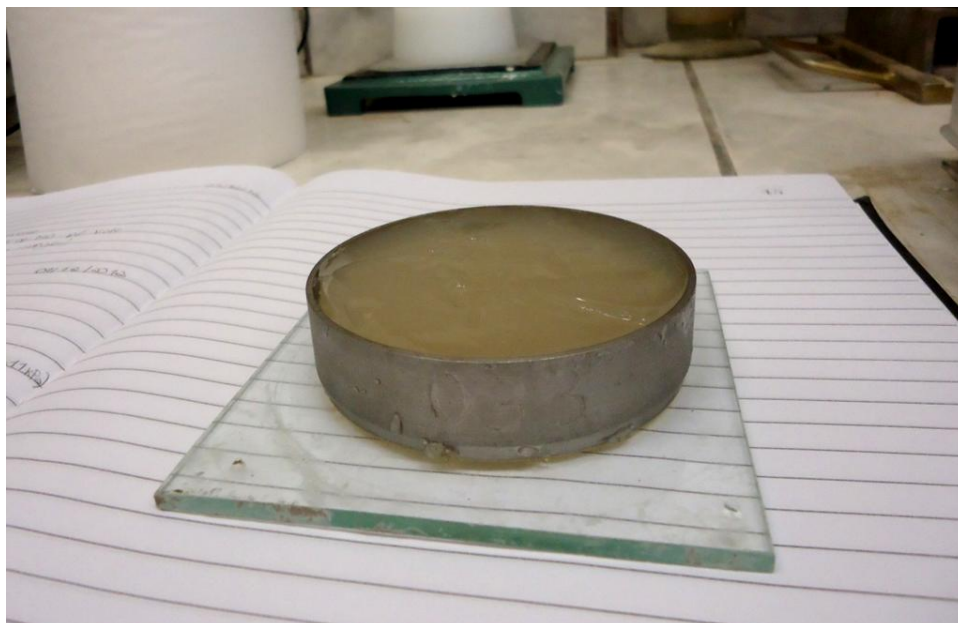
Antes de cravar o anel de adensamento, as amostras eram transferidas para o freezer por 40 minutos, para aumentar discretamente sua resistência, evitando sua deformação devido ao peso próprio (Figura 3.2). Após o cravamento do anel, as superfícies expostas do corpo de prova eram niveladas com uma lâmina para garantir um volume inicial de material constante em todos os ensaios (Figuras 3.3 e 3.4).



**FIGURA 3.2. BIPARTIDO DE PVC E AMOSTRA DE SOLO-COLOIDE PRONTA PARA O CRAVAMENTO DO ANEL DE ADENSAMENTO.**



**FIGURA 3.3. CORPO DE PROVA CONSTITUÍDO POR MISTURA SOLO-COLOIDE COM 43% EM MASSA DE COLOIDE.**



**FIGURA 3.4. CORPO DE PROVA CONSTITUÍDO SOMENTE POR GELATINA (100% COLOIDE).**

Apesar do teor de coloide no corpo de prova ser previamente determinado pela quantidade de areia acrescentada à mistura, esse valor nem sempre era obtido com

exatidão, visto que poderiam ocorrer pequenas variações nesse teor dependendo da altura da amostra onde era cravado o anel de adensamento. Assim, para todos os corpos de prova montados foi verificada a massa do conjunto “corpo de prova + anel de adensamento” e, aplicando a Equação (3.1), deduzida no Apêndice B, foi possível saber com precisão o teor de coloide de cada corpo de prova ensaiado.

$$W_{g1} = \frac{(\gamma_{sc} - \gamma_s)W_{g2}}{\gamma_g - \gamma_s} \quad (3.1)$$

Na Equação (3.1),  $W_{g1}$  é o peso de coloide contido no corpo de prova,  $\gamma_g$  e  $\gamma_s$  são os pesos específicos do coloide no estado coloidal e dos sólidos do solo, respectivamente,  $W_{g2}$  é o peso de coloide que ocupa o volume total do anel de adensamento e  $\gamma_{sc}$  é o peso específico da mistura solo-coloide. Os valores de  $W_{g2}$ ,  $\gamma_g$  e  $\gamma_s$  foram obtidos na caracterização dos materiais, e o valor de  $\gamma_{sc}$  foi obtido para cada corpo de prova a partir da relação entre sua massa e o volume do anel de adensamento.

O teor de coloide foi definido como a porcentagem, em massa, de coloide contida no corpo de prova, visto que, ao trabalhar com RSU, a caracterização do resíduo a partir da porcentagem dos componentes em massa é mais rápida e precisa que a partir da porcentagem em volume.

### 3.3 ENSAIOS EDOMÉTRICOS

Os ensaios edométricos foram realizados em uma prensa de adensamento do laboratório de solos da UFPR. O anel de adensamento possuía 76,37mm (3 polegadas) de diâmetro interno e 20mm de altura.

Os ensaios foram realizados com carregamentos a cada 1 hora e as leituras de deslocamento vertical foram feitas nos tempos 0s (imediatamente antes do carregamento), 8s, 15s, 30s, 1min, 2min, 4min, 8min, 15min, 30 min e 1 hora (intervalos sugeridos pela NBR 12007 (ABNT, 1990)). O tempo de duração de cada carregamento foi escolhido para que todo o ensaio pudesse ser realizado em um dia, visto que a



gelatina poderia apresentar variações no seu estado físico se ficasse muito tempo fora de refrigeração. Devido a isso, todos os ensaios foram realizados em laboratório com temperatura controlada, mantida entre 15°C e 20°C.

Foram realizados ensaios com corpos de prova com 26%, 38%, 43%, 47% e 74% de coloide. Também foram realizados ensaios com um corpo de prova constituído somente por solo (0% coloide) e outro constituído somente por gelatina (100% de coloide). Dessa forma, o comportamento do material pôde ser estudado em toda a faixa de abrangência da sua composição (0 a 100% de coloide).

Os primeiros corpos de prova ensaiados (0%, 26% e 38%) foram carregados com as mesmas tensões sugeridas pela NBR 12007 (ABNT, 1990): uma pressão de assentamento de 2 kPa por 5 minutos e carregamentos a cada uma hora de 10kPa, 20kPa, 40kPa, 80kPa e 160kPa. Os corpos de prova de 43% e 47% receberam uma pressão de assentamento de 2 kPa e carregamentos de 5kPa, 10kPa, 15kPa, 20kPa, 40kPa, 80kPa e 160kPa. O corpo de prova de 74% recebeu uma pressão de assentamento de 1kPa, com carregamentos de 2kPa, 3kPa, 4kPa, 5kPa, 6kPa, 8kPa, 10kPa, 12kPa, 15kPa, 20kPa, 30kPa e 40kPa. E o corpo de prova constituído somente por gelatina (100% coloide) recebeu uma pressão de assentamento de 0,25kPa e carregamentos de 0,5kPa, 1kPa, 1,5kPa, 2kPa, 2,5kPa, 3kPa, 4kPa, 5kPa, 7kPa, 10kPa, 15kPa e 20kPa.

Essa variação de carregamentos ocorreu porque quanto maior o teor de coloide presente no corpo de prova menor era a resistência apresentada pelo material. E, para teores de coloide maiores que 40%, a aplicação de 10kPa como primeiro carregamento implicava na ruptura do corpo de prova e vazamento de grandes quantidades de material (Figura 3.5), descaracterizando o comportamento esperado para o ensaio (processo de compressão sem extrusão do coloide do corpo de prova de uma determinada mistura solo-coloide). Assim, para maiores teores de coloide, os carregamentos tiveram que ser ajustados para permitir a avaliação da compressão do material.



**FIGURA 3.5. VAZAMENTO DE MATERIAL DO CORPO DE PROVA CAUSADO POR APLICAÇÃO DE CARREGAMENTOS MUITO GRANDES NO ENSAIO EDOMÉTRICO.**

### 3.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.4.1 Caracterização de materiais

##### 3.4.1.1 Caracterização do solo

Os ensaios para determinação da densidade real dos grãos forneceram um valor de 2,6608 para esse parâmetro, com desvio padrão de 0,0048.

A curva granulométrica do material revelou um solo arenoso, mais especificamente uma areia fina, com coeficiente de uniformidade igual a 2,72 e coeficiente de curvatura igual a 0,87. A Figura 3.6 e a Tabela 3.1 apresentam, respectivamente, a curva granulométrica obtida para o material e a porcentagem em massa de cada fração do material, classificadas de acordo com o diâmetro dos grãos segundo a NBR 6502 (ABNT, 1995).

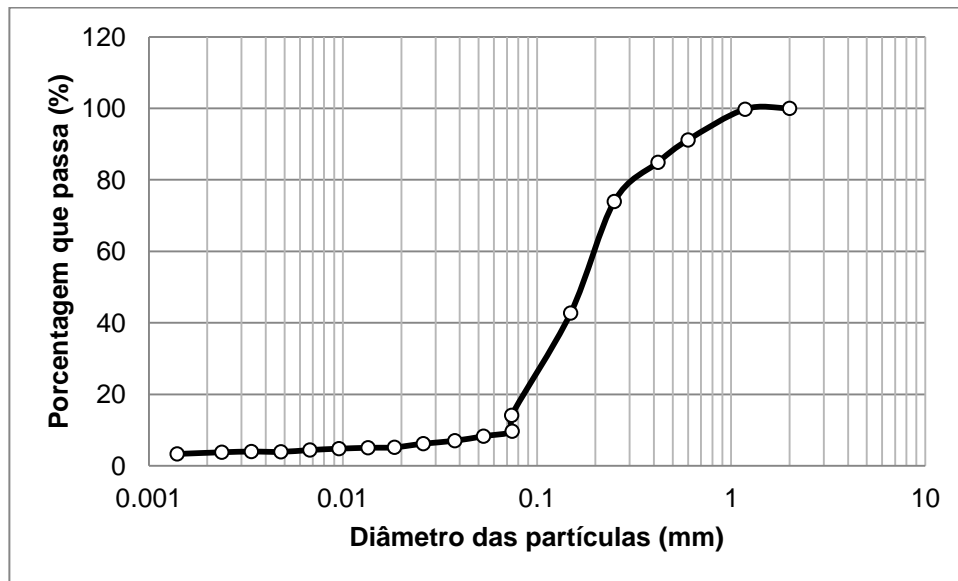


FIGURA 3.6. CURVA GRANULOMÉTRICA OBTIDA PARA O SOLO UTILIZADO NA MISTURA SOLO-COLOIDE.

TABELA 3.1. PORCENTAGEM EM MASSA DE CADA FRAÇÃO DE MATERIAL PRESENTE NO SOLO UTILIZADO NA MISTURA SOLO-COLOIDE.

Porcentagem de material em massa				
Argila	Silte	Areia Fina	Areia Média	Areia Grossa
<0.002 mm	0.002 - 0.06 mm	0.06 - 0.2 mm	0.2 - 0.6 mm	0.6 - 2.0 mm
3,60	5,13	49,76	32,66	8,85

O coeficiente de permeabilidade,  $k$ , obtido para o material foi de  $5,5 \times 10^{-5}$  m/s. O procedimento de obtenção de  $k$  foi repetido 14 vezes e o valor adotado é a média dos valores obtidos em laboratório. O desvio padrão apresentado foi de  $1,8 \times 10^{-6}$  m/s.

O gráfico gerado com base nos ensaios de chuva de areia, que relaciona a densidade relativa do material com a sua altura de queda, está apresentado no Apêndice C (Figura C.4). No gráfico também é exibida a equação que relaciona as duas variáveis, bem como o coeficiente de correlação da função com os dados experimentais,  $R^2$ . Os índices de vazios máximo e mínimo obtidos foram de 1,13 e 0,60, respectivamente.

No Apêndice C também são apresentadas as curvas tensão cisalhante x deslocamento horizontal (Figura C.1) e deslocamento vertical x deslocamento horizontal do material (Figura C.2), obtidas nos ensaios de cisalhamento direto realizado com a

areia, bem como a envoltória de ruptura resultante (Figura C.3). O ângulo de atrito obtido para a areia foi de  $32,8^\circ$  e o intercepto coesivo obtido foi de 8,6 kPa, valor resultante, provavelmente, da quantidade de finos presente no solo. O ângulo de dilatação obtido para o material foi de  $-9,6^\circ$ .

A Tabela 3.2 apresenta um resumo dos valores obtidos na caracterização do solo.

**TABELA 3.2. RESUMO DOS VALORES OBTIDOS NA CARACTERIZAÇÃO DO SOLO.**

Densidade real dos grãos	2,6608
Coefficiente de permeabilidade	$5,5 \times 10^{-5}$ m/s
Índice de vazios mínimo	0,60
Índice de vazios máximo	1,13
Intercepto coesivo	8,6 kPa
Ângulo de atrito	$32,8^\circ$
Ângulo de dilatação	$-9,6^\circ$

#### 3.4.1.2 Caracterização do coloide

Os ensaios para determinação da massa específica da gelatina no estado líquido, a uma temperatura de aproximadamente  $37^\circ\text{C}$ , forneceram um valor médio de  $1,0028 \text{ g/cm}^3$ , com desvio padrão de  $0,0004 \text{ g/cm}^3$ . Já os ensaios realizados com a gelatina no estado coloidal, a uma temperatura de aproximadamente  $3^\circ\text{C}$ , forneceram uma massa específica média de  $1,0454 \text{ g/cm}^3$ , com desvio padrão de  $0,0235 \text{ g/cm}^3$ . A Tabela 3.3 apresenta esses resultados.

**TABELA 3.3. VALORES OBTIDOS PARA MASSA ESPECÍFICA DO COLOIDE.**

	Massa específica do coloide ( $\text{g/cm}^3$ )	Massa específica média do coloide ( $\text{g/cm}^3$ )	Desvio padrão ( $\text{g/cm}^3$ )
$\rho_{37^\circ\text{C}}$	1,0027	1,0028	0,0004
	1,0024		
	1,0033		
$\rho_{3^\circ\text{C}}$	1,0209	1,0454	0,0235
	1,0475		
	1,0677		

Esses valores assemelham-se com a variação da massa específica da água, que atinge seu valor máximo na temperatura de 4°C. Como a água é a principal constituinte da mistura que caracteriza o coloide, então esses valores mostram-se condizentes com a realidade.

### 3.4.2 Ensaio edométrico

As Figuras 3.7 a 3.13 apresentam as curvas de altura do corpo de prova x raiz do tempo para os estágios de carregamento de todos os corpos de prova ensaiados. Observa-se que, com exceção para o corpo de prova formado somente por solo (Figura 3.7), o tempo de carregamento utilizado não é suficiente para a estabilização da altura do corpo de prova. Mesmo não seguindo a metodologia padrão de ensaios edométricos, os carregamentos foram feitos nesse pequeno intervalo de tempo para evitar variações no estado físico da gelatina, que, apesar de estar a uma temperatura constante, estava submetida à pressão do carregamento.

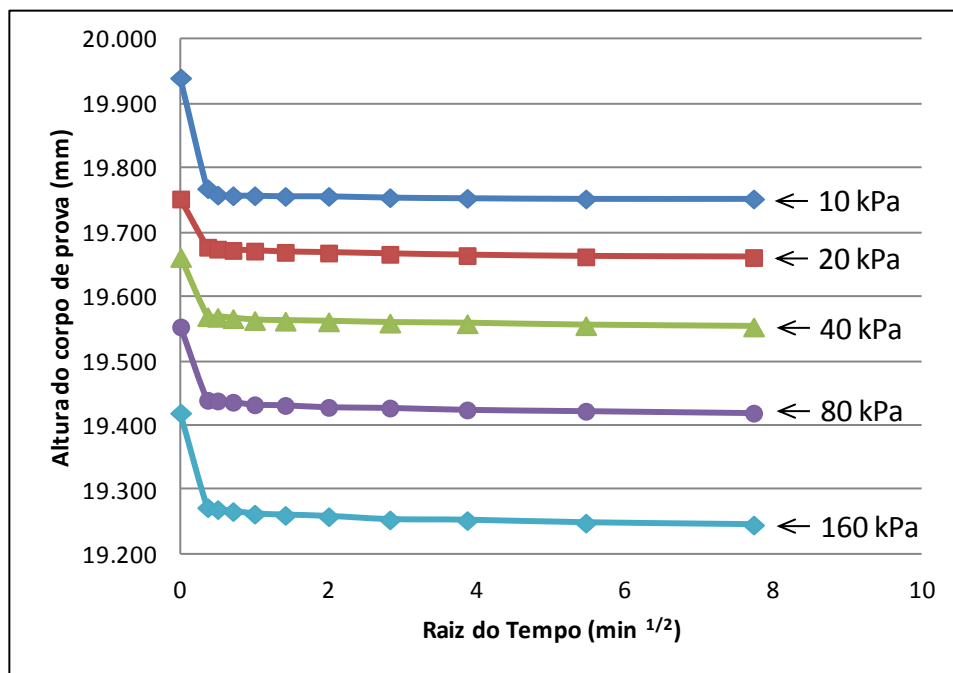


FIGURA 3.7. CURVAS DE ALTURA DO CORPO DE PROVA X RAIZ DO TEMPO PARA OS ESTÁGIOS DE CARREGAMENTO DO CORPO DE PROVA COM 0% DE COLOIDE.

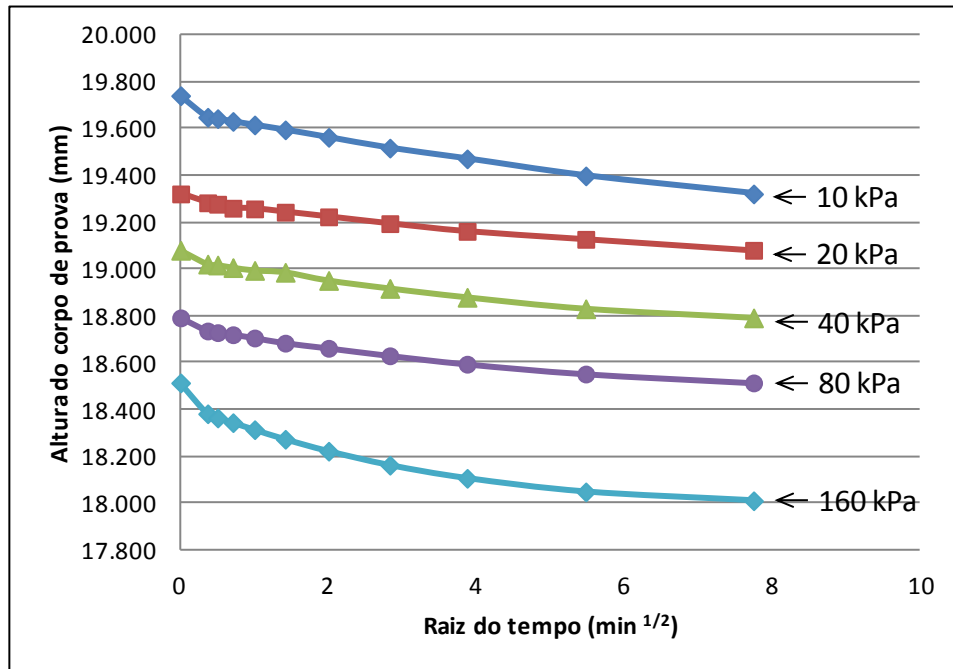


FIGURA 3.8. CURVAS DE ALTURA DO CORPO DE PROVA X RAIZ DO TEMPO PARA OS ESTÁGIOS DE CARREGAMENTO DO CORPO DE PROVA COM 26% DE COLOIDE.

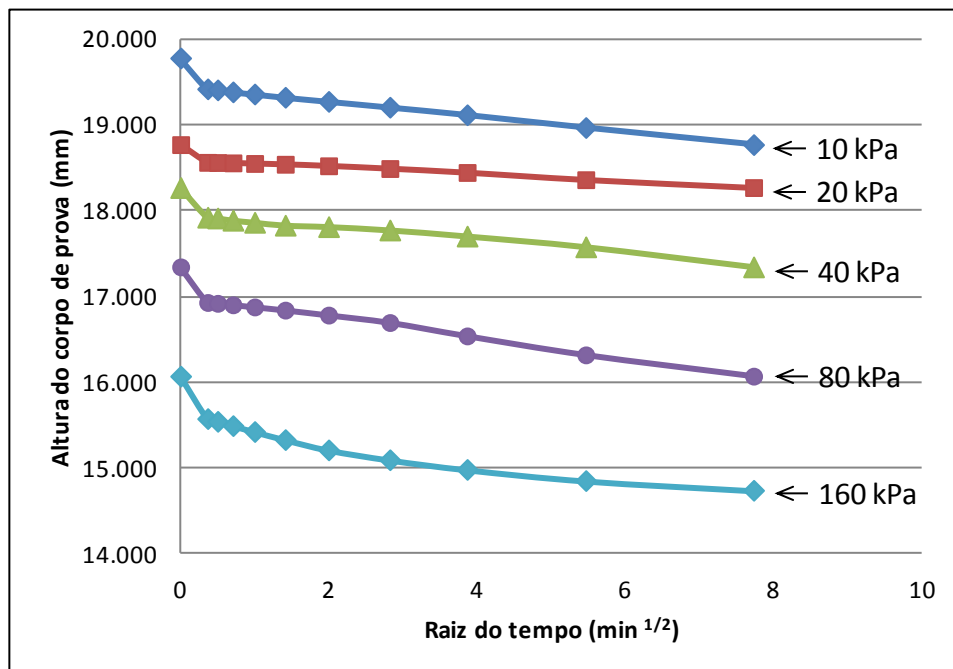


FIGURA 3.9. CURVAS DE ALTURA DO CORPO DE PROVA X RAIZ DO TEMPO PARA OS ESTÁGIOS DE CARREGAMENTO DO CORPO DE PROVA COM 38% DE COLOIDE.

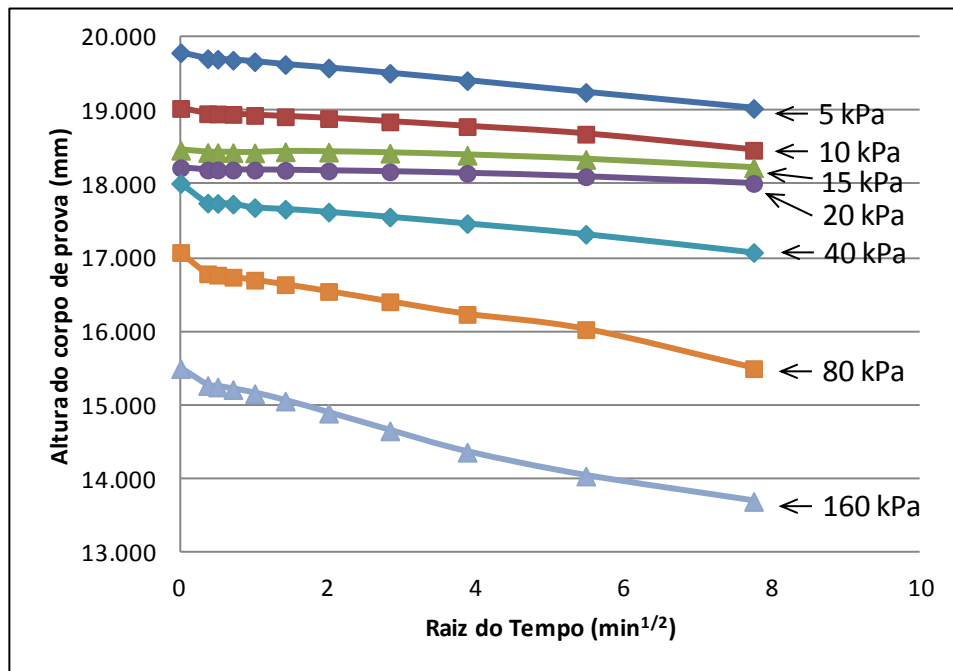


FIGURA 3.10. CURVAS DE ALTURA DO CORPO DE PROVA X RAIZ DO TEMPO PARA OS ESTÁGIOS DE CARREGAMENTO DO CORPO DE PROVA COM 43% DE COLOIDE.

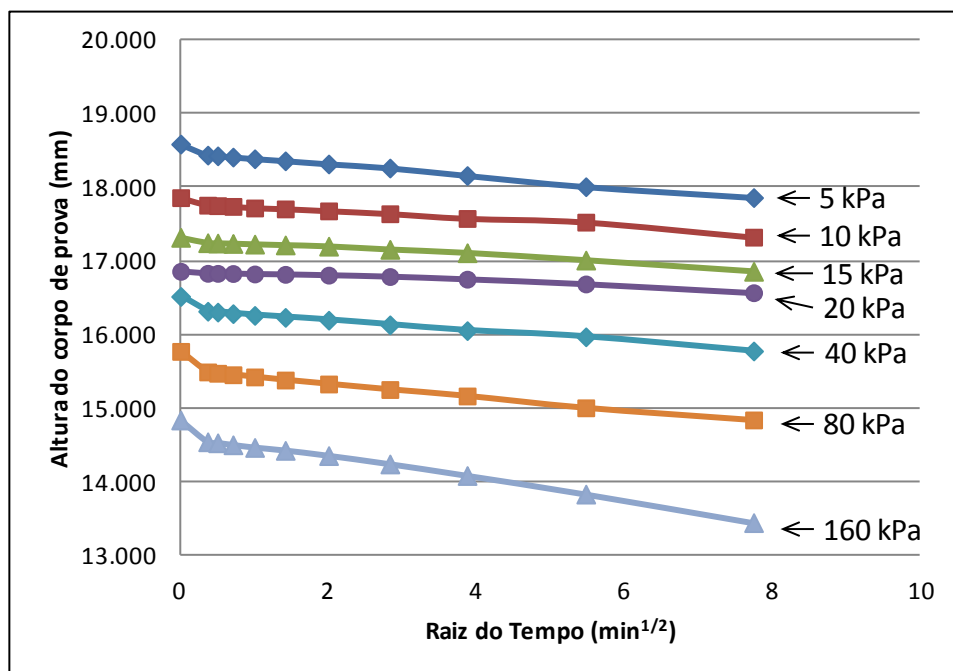
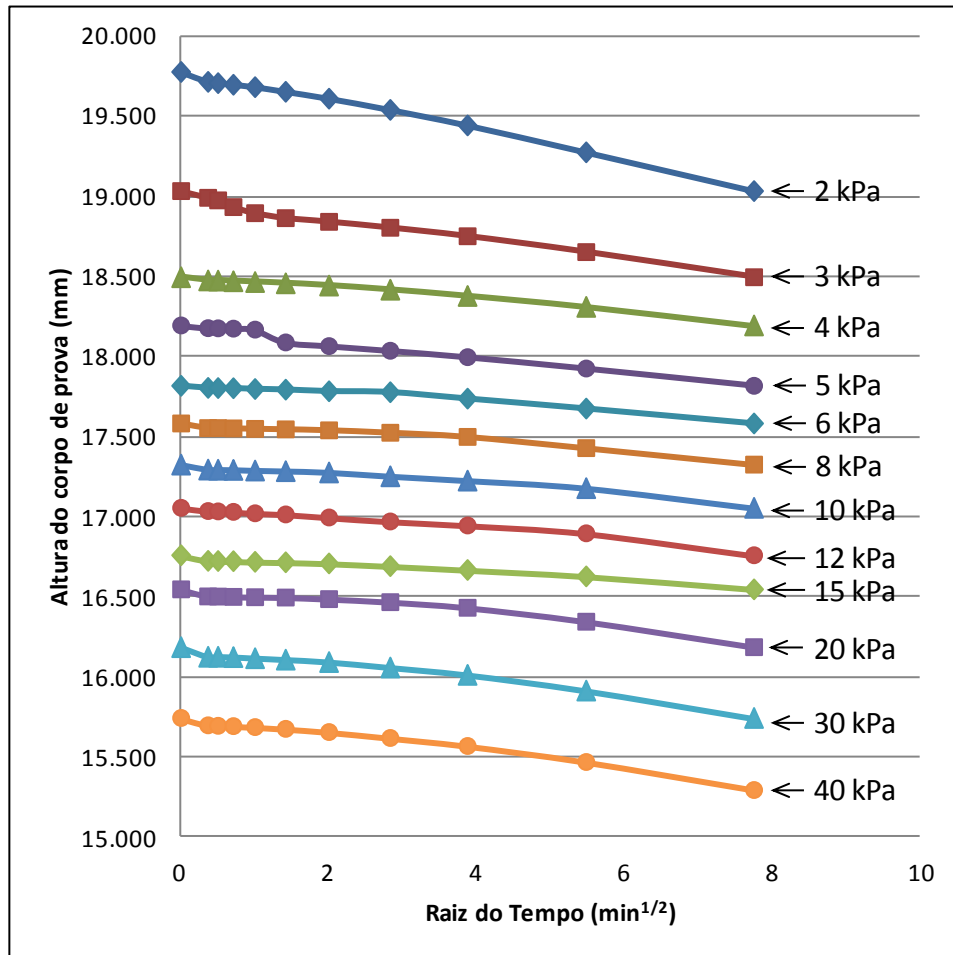
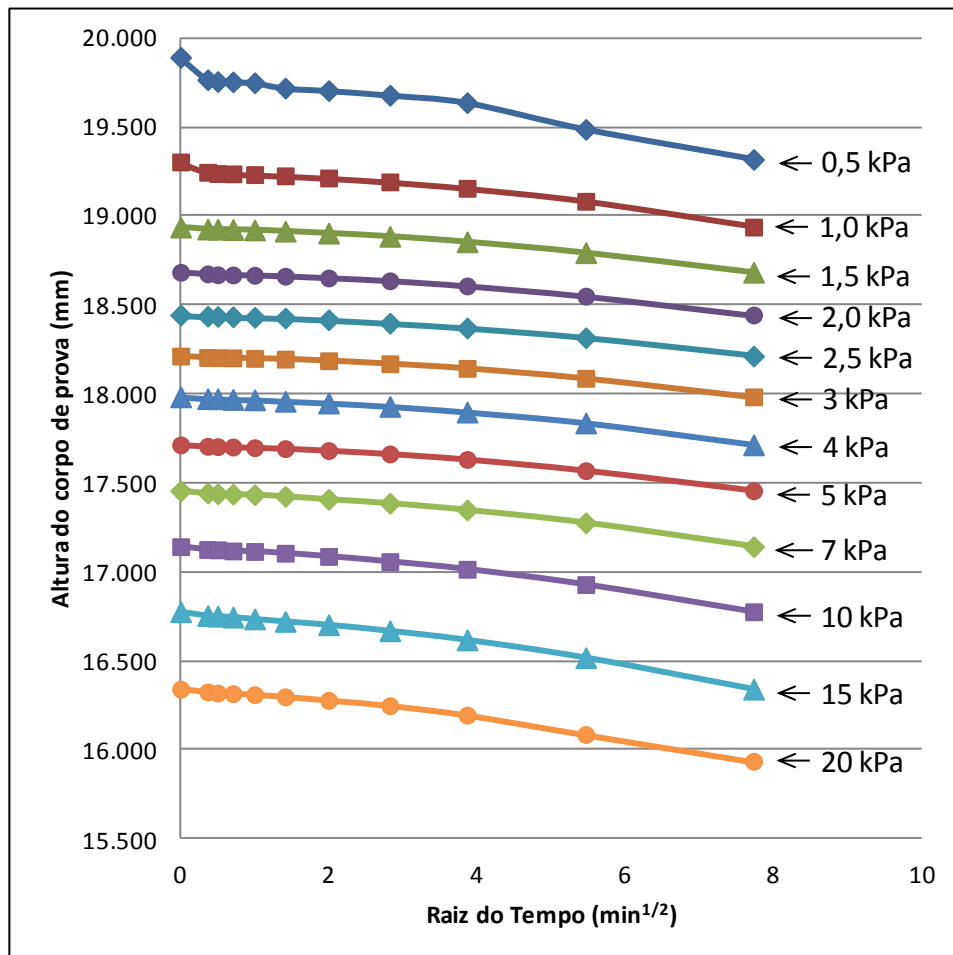


FIGURA 3.11. CURVAS DE ALTURA DO CORPO DE PROVA X RAIZ DO TEMPO PARA OS ESTÁGIOS DE CARREGAMENTO DO CORPO DE PROVA COM 47% DE COLOIDE.



**FIGURA 3.12. CURVAS DE ALTURA DO CORPO DE PROVA X RAIZ DO TEMPO PARA OS ESTÁGIOS DE CARREGAMENTO DO CORPO DE PROVA COM 74% DE COLOIDE.**





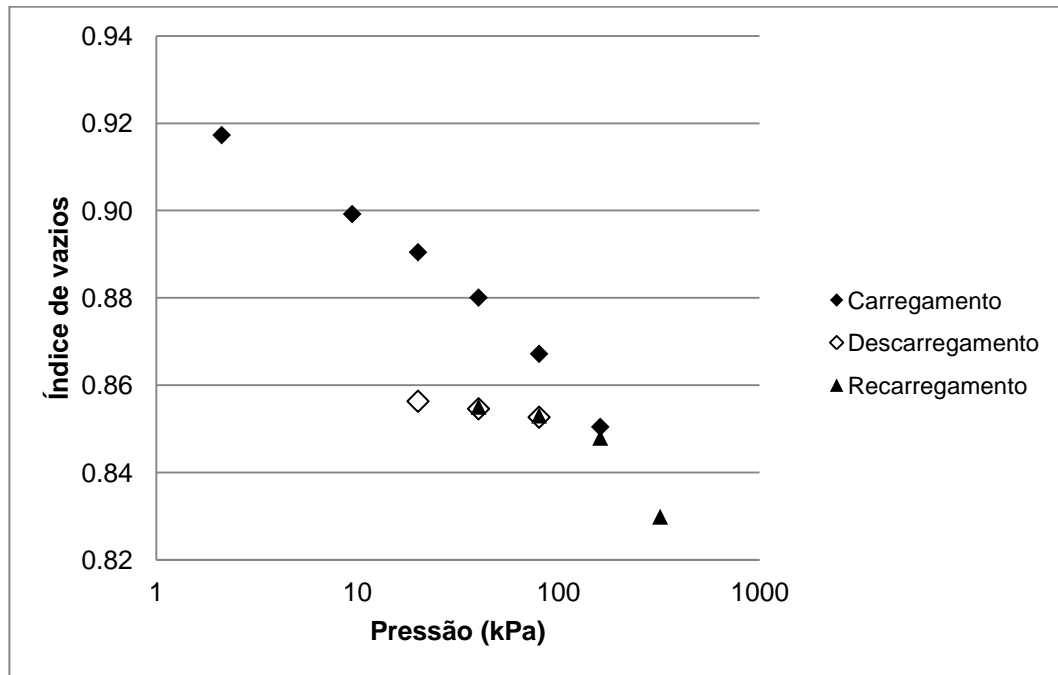
**FIGURA 3.13. CURVAS DE ALTURA DO CORPO DE PROVA X RAIZ DO TEMPO PARA OS ESTÁGIOS DE CARREGAMENTO DO CORPO DE PROVA COM 100% DE COLOIDE.**

Nas Figuras 3.7 a 3.9 é possível observar uma inclinação maior no início da curva, com estabilização da tangente após o instante inicial de carregamento. Na Figura 3.7 essa tangente residual é quase nula, confirmando a estabilização da altura do corpo de prova.

Nas Figuras 3.10 a 3.13 os incrementos de tensão aplicados foram diferentes, influenciando a resposta dada pelo gráfico, mas é possível perceber que quanto maior o teor de colóide no corpo de prova maior foi a deformação sofrida para os mesmos valores de tensão aplicada. Também se observa que quanto maior o teor de colóide menor a tendência de estabilização das alturas do corpo de prova.

As Figuras 3.14 a 3.19 apresentam os gráficos de índice de vazios x logaritmo da pressão, calculado segundo a NBR 12007 (ABNT, 1990). É importante ressaltar que esses gráficos gerados em ensaios com solo-colóide nem sempre permitem a mesma

interpretação que os gráficos gerados por amostras de solos padrão. Isso porque em uma amostra padrão há contato entre as partículas de solo, formando uma estrutura sólida que recebe tensão e se deforma ao longo do ensaio. Nos ensaios realizados com solo-coloide, principalmente os com corpos de prova com altos teores de coloide, o volume de gelatina pode ser tão grande em relação ao de solo que as partículas de solo não chegam a ter contato suficiente para formar uma estrutura sólida na amostra, tornando-a muito menos resistente. Assim, o índice de vazios pode não representar uma característica do solo, uma vez que os sólidos se encontram dispersos em um meio coloidal, e não formando uma estrutura sólida cujos vazios são ocupados por esse coloide.



**FIGURA 3.14. GRÁFICO DO ÍNDICE DE VAZIOS X LOG DA PRESSÃO OBTIDO NO ENSAIO EDMÉTRICO REALIZADO COM CORPO DE PROVA COM 0% DE COLOIDE (AREIA SECA).**

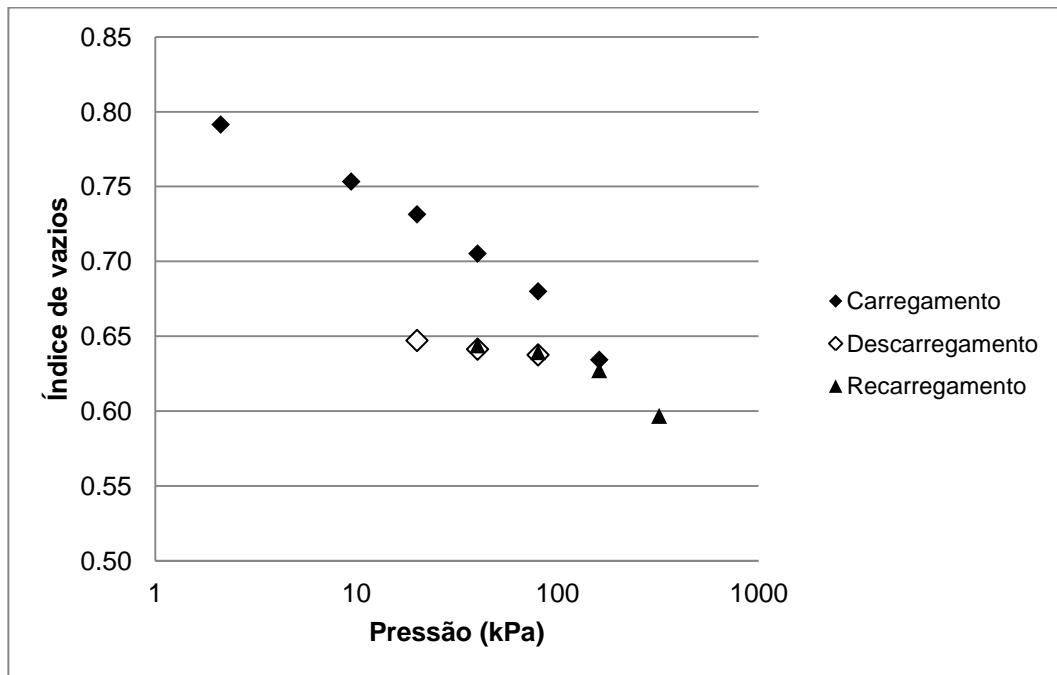


FIGURA 3.15. GRÁFICO DO ÍNDICE DE VAZIOS X LOG DA PRESSÃO OBTIDO NO ENSAIO EDOMÉTRICO REALIZADO COM CORPO DE PROVA COM 26% DE COLOIDE.

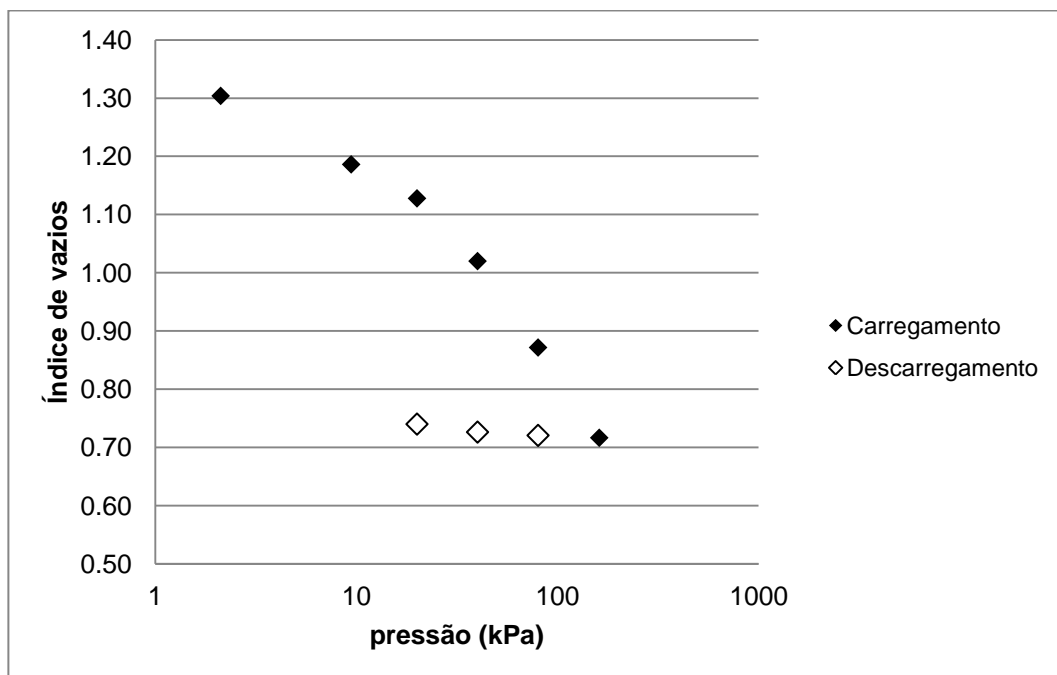
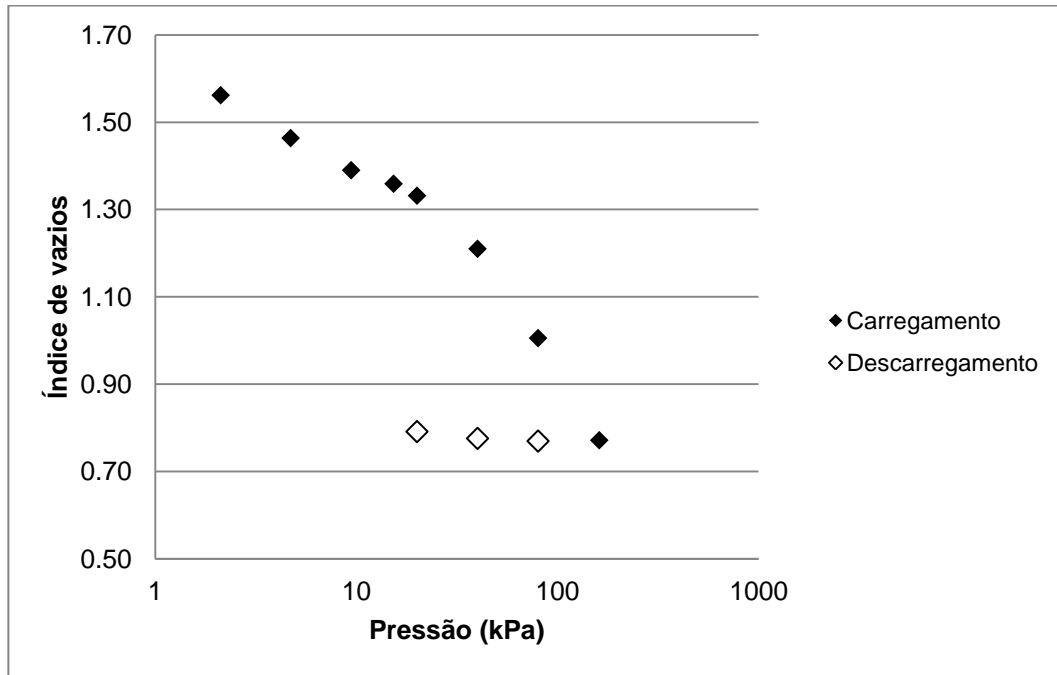
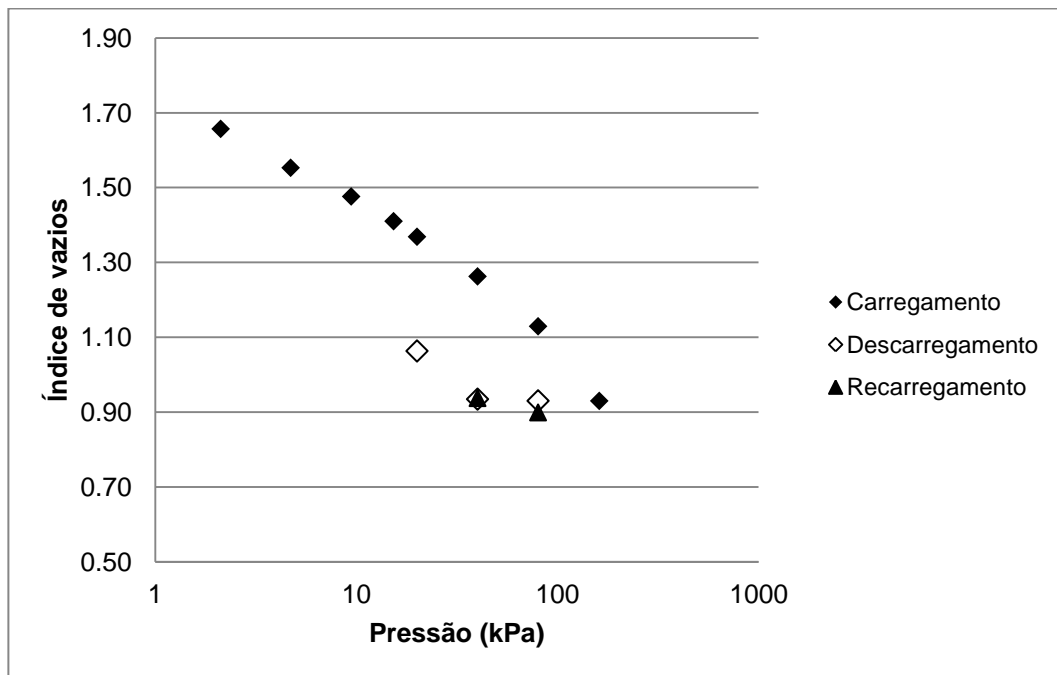


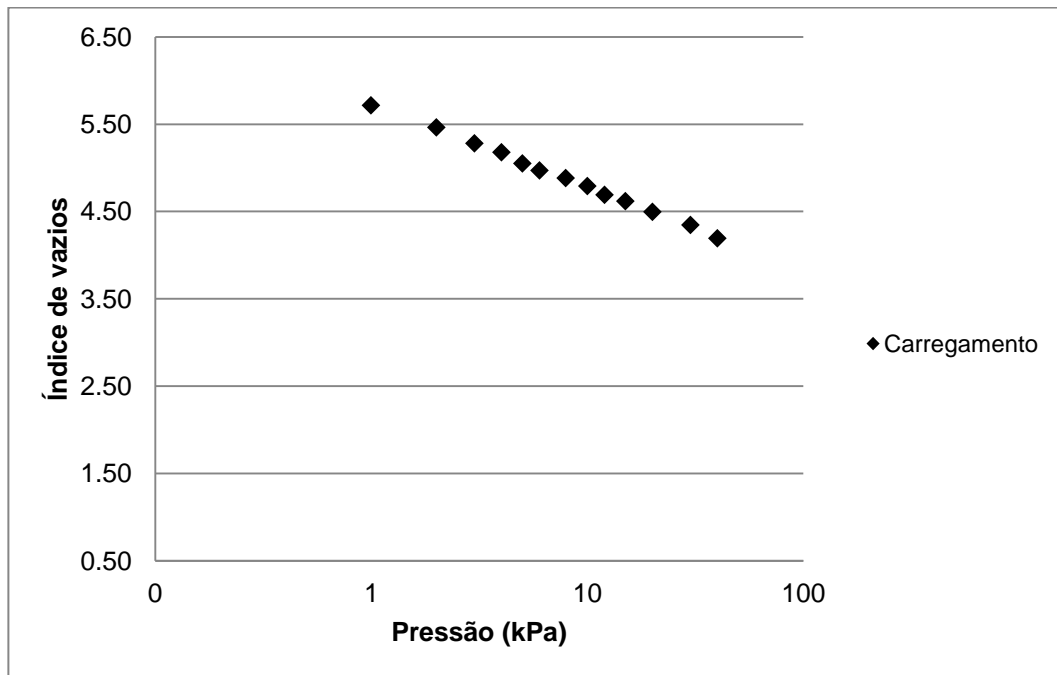
FIGURA 3.16. GRÁFICO DO ÍNDICE DE VAZIOS X LOG DA PRESSÃO OBTIDO NO ENSAIO EDOMÉTRICO REALIZADO COM CORPO DE PROVA COM 38% DE COLOIDE.



**FIGURA 3.17. GRÁFICO DO ÍNDICE DE VAZIOS X LOG DA PRESSÃO OBTIDO NO ENSAIO EDOMÉTRICO REALIZADO COM CORPO DE PROVA COM 43% DE COLOIDE.**



**FIGURA 3.18. GRÁFICO DO ÍNDICE DE VAZIOS X LOG DA PRESSÃO OBTIDO NO ENSAIO EDOMÉTRICO REALIZADO COM CORPO DE PROVA COM 47% DE COLOIDE.**



**FIGURA 3.19. GRÁFICO DO ÍNDICE DE VAZIOS X LOG DA PRESSÃO OBTIDO NO ENSAIO EDMÉTRICO REALIZADO COM CORPO DE PROVA COM 74% DE COLOIDE.**

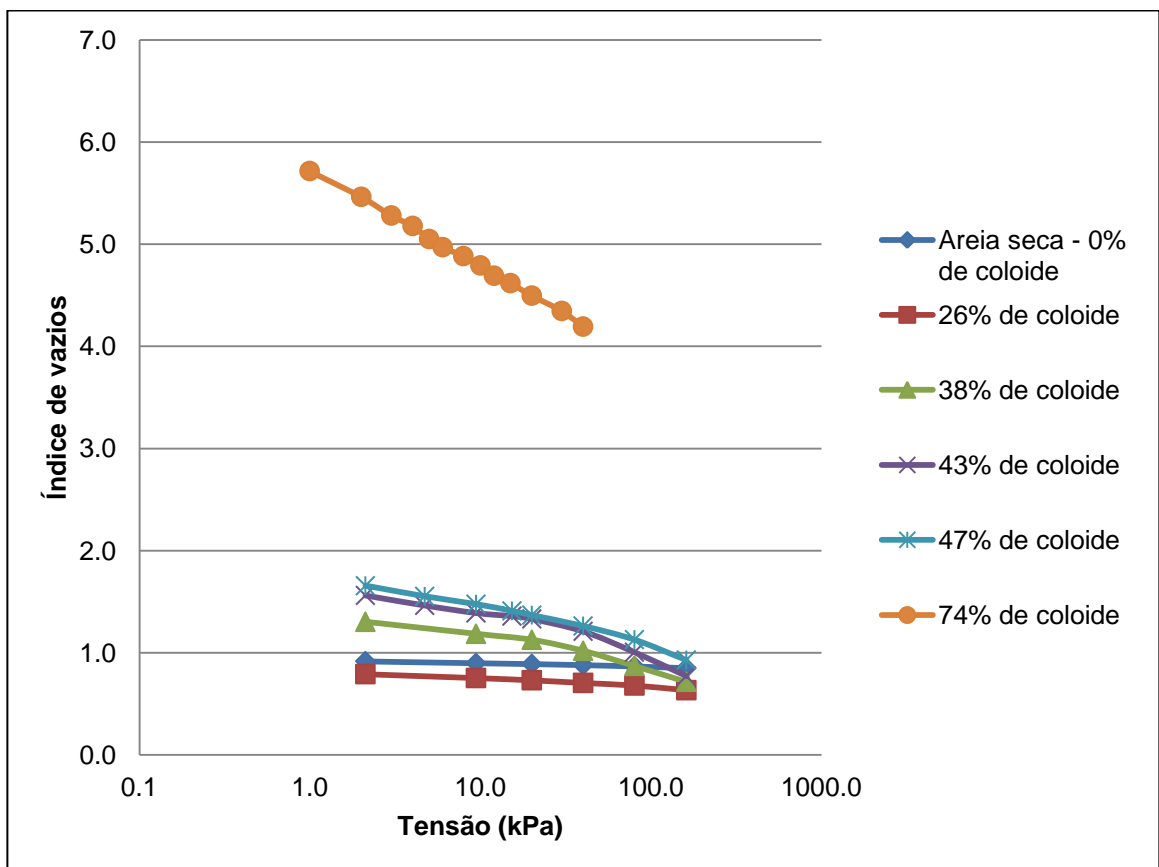
Para o corpo de prova formado somente por gelatina (100% coloide), não foi gerado o gráfico índice de vazios x logaritmo da tensão, visto que, sem sólidos no corpo de prova, não há sentido em calcular o índice de vazios.

Observou-se que o índice de vazios inicial da amostra com 26% de coloide foi menor que o da amostra de areia seca. Como a amostra com coloide não foi compactada de nenhuma forma, esse valor deveria ser semelhante. A razão mais provável para essa diferença nos valores é que a amostra de areia seca foi preparada com uma configuração fofa, cuidado que não foi tomado no preparo da mistura do solo com o coloide. Outro fator que pode ter influenciado é o fato do coloide, assim como a água, se contrair com a redução da temperatura até 4°C. Isso reduz o volume do coloide, induzindo uma aproximação das partículas de solo e conseqüente diminuição do volume de vazios na amostra.

Para altos teores de coloide, em que houve um maior número de estágios de carregamento, não houve tempo para realizar o estágio de recarregamento, e para o corpo de prova com 74% de coloide não houve tempo de concluir nem o estágio de carregamento. Isso porque os ensaios foram limitados ao horário de funcionamento do laboratório, tendo que ser encerrados ao fim do expediente e não podendo ser

continuados no dia seguinte a fim de evitar variações no estado físico da gelatina contida no corpo de prova.

A Figura 3.20 apresenta as curvas de carregamento de todos os gráficos apresentados nas Figuras 3.14 a 3.19. Essa figura permite observar o aumento do índice de vazios inicial conforme o teor de coloide da amostra aumenta. É possível perceber que no corpo de prova com 74% de coloide esse valor é bem superior aos das outras amostras (5,716 contra um máximo de 1,657). Outra característica que se observa é que as amostras com maiores teores de coloide apresentam maior redução nos valores de índice de vazios ao longo do ensaio.



**FIGURA 3.20. COMPARAÇÃO ENTRE AS CURVAS ÍNDICE DE VAZIOS X LOGARITMO DA TENSÃO PARA OS ESTÁGIOS DE CARREGAMENTO DOS ENSAIOS EDMÉTRICOS.**

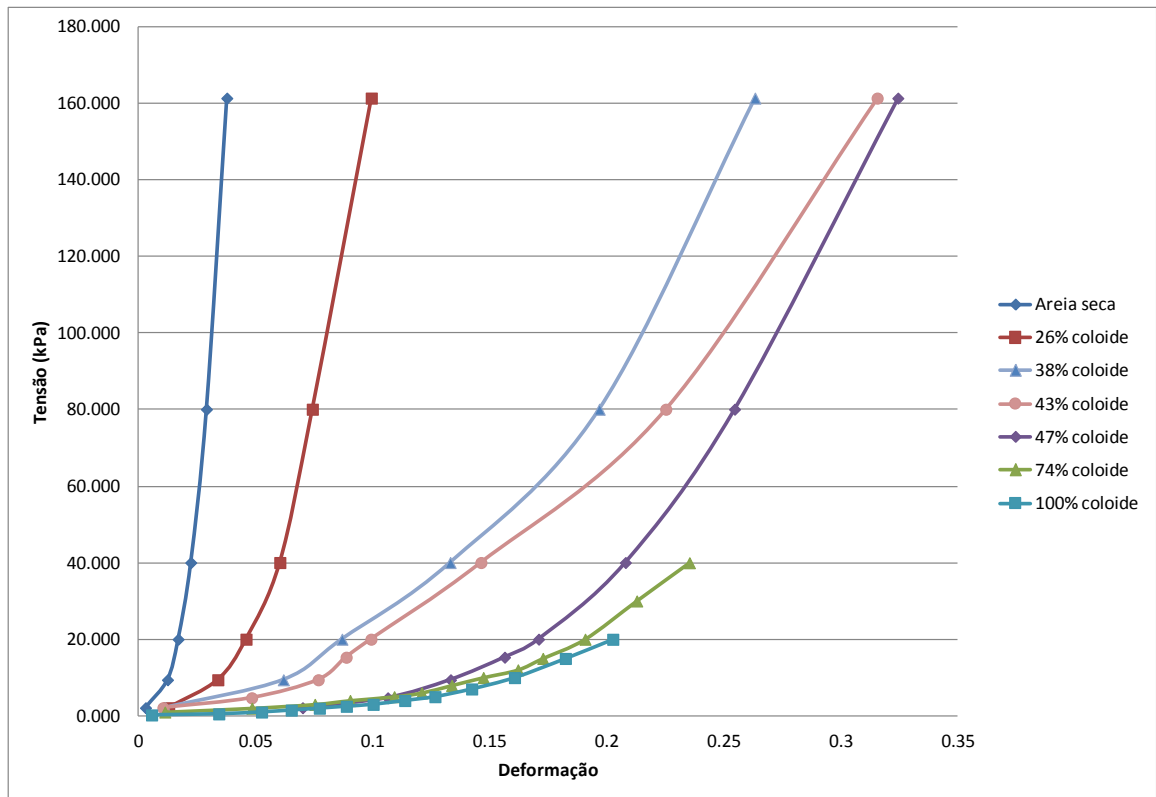
A Tabela 3.4 apresenta os valores dos índices de compressão ( $C_c$ ) e expansão ( $C_s$ ) obtidos para os corpos de prova ensaiados, bem como os valores do índice de vazios inicial apresentado pelo corpo de prova. Como o tempo de duração dos

carregamentos não foi suficiente nem para estabilizar a altura do corpo de prova, o índice de compressão secundária ( $C_{\alpha}$ ), que é expresso pela inclinação da porção final da curva compressão x log t (LAMBE E WHITMAN, 1969), não foi calculado. Os valores do índice de compressão são semelhantes aos valores observados na literatura para RSU.

**TABELA 3.4. VALORES DE ÍNDICE DE COMPRESSÃO E EXPANSÃO OBTIDOS PARA OS CORPOS DE PROVA ENSAIADOS.**

<b>Amostra</b>	<b>Índice de compressão, <math>C_c</math></b>	<b>Índice de expansão, <math>C_s</math></b>	<b>Índice de vazios inicial, <math>e_0</math></b>
Areia seca – 0% de coloide	0,055	0,006	0,917
26% de coloide	0,150	0,019	0,791
38% de coloide	0,510	0,046	1,304
43% de coloide	0,724	0,052	1,562
47% de coloide	0,656	0,221	1,657
74% de coloide	0,999	-	5,716
100% de coloide	-	-	-

A Figura 3.21 apresenta as curvas tensão x deformação obtidas. A análise do gráfico mostra que o comportamento das curvas depende diretamente da porcentagem de coloide contida no corpo de prova, e que quanto maior esse teor de coloide, maior é a deformação sofrida pelo corpo de prova e mais próximas as curvas ficam umas das outras. Também é possível observar que o comportamento apresentado pelos corpos de prova de solo-coloide é semelhante aquele apresentado por corpos de prova formados por RSU, confirmando a possibilidade de utilização do solo-coloide como substituto satisfatório dos RSU na realização de ensaios de laboratório de pequenas dimensões.

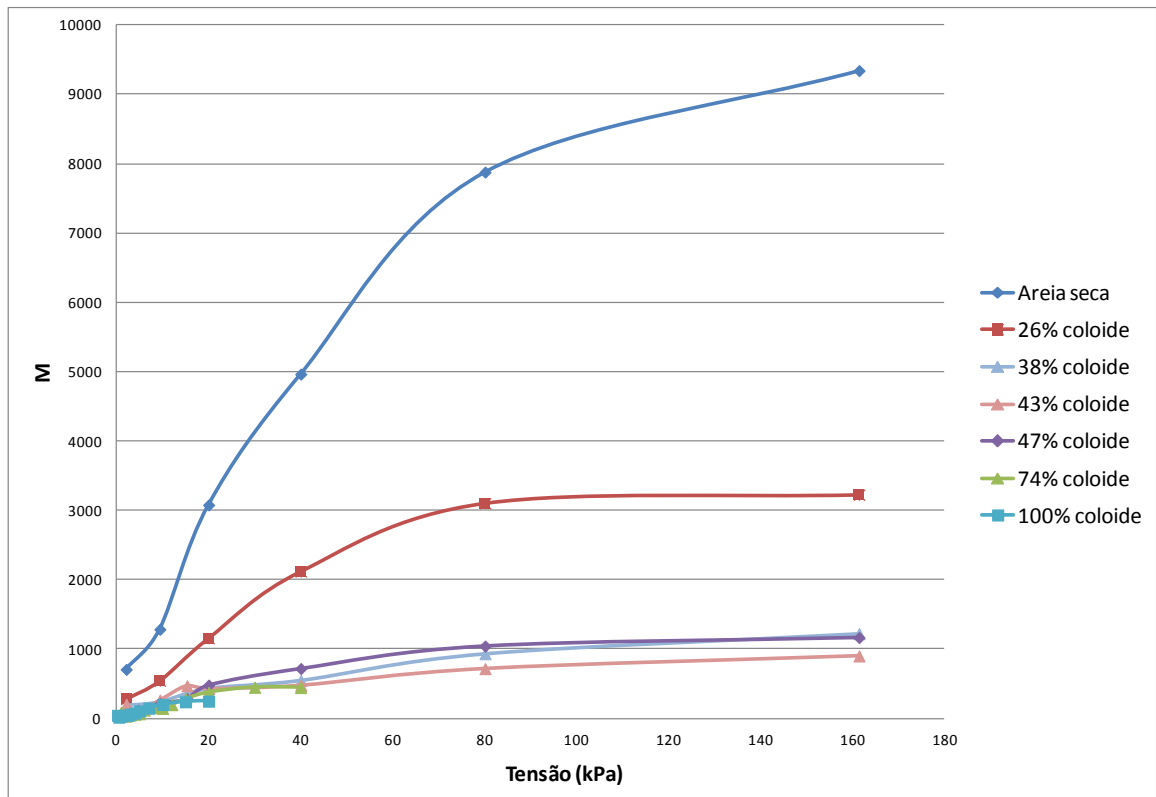


**FIGURA 3.21. CURVAS TENSÃO X DEFORMAÇÃO OBTIDAS PARA CORPOS DE PROVA COM DIVERSOS TEORES DE COLOIDE.**

O módulo tangente ( $M$ ) de cada ponto tensão x deformação obtido nos ensaios foi calculado utilizando os valores de tensão e deformação dos seus pontos adjacentes (Equação (3.2)). A Figura 3.22 mostra a variação desses módulos em relação à tensão aplicada, para cada teor de colóide utilizado.

$$M_i = \frac{\sigma_{i+1} - \sigma_{i-1}}{\varepsilon_{i+1} - \varepsilon_{i-1}} \quad (3.2)$$





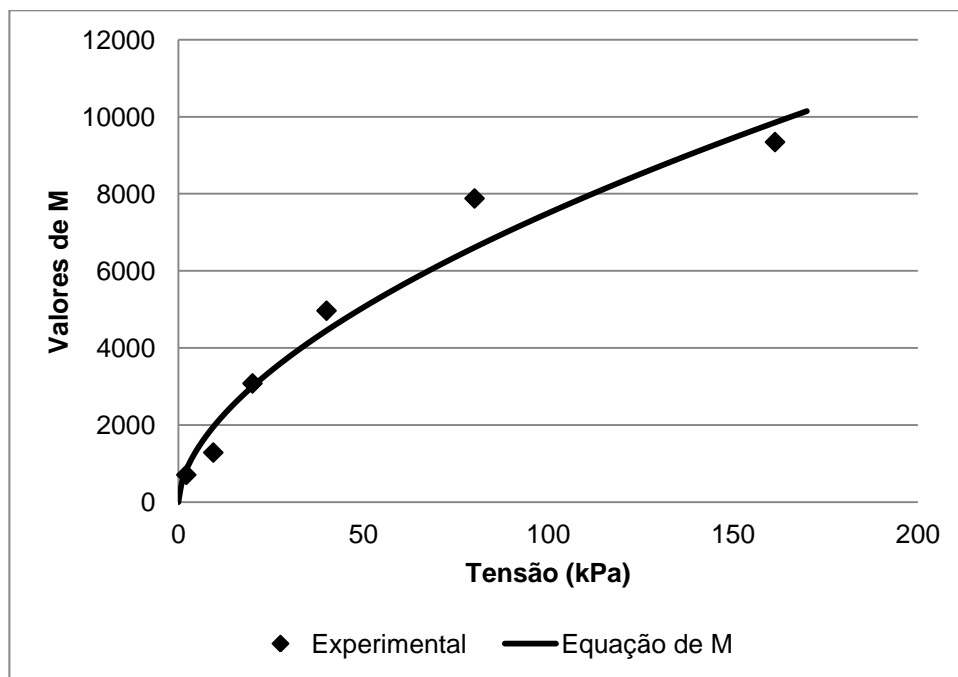
**FIGURA 3.22. VARIÇÃO DO MÓDULO TANGENTE (M) EM RELAÇÃO À TENSÃO APLICADA, PARA CADA TEOR DE COLOIDE UTILIZADO.**

Assim como a Figura 3.21, a Figura 3.22 permite constatar uma influência direta da porcentagem de colóide no comportamento do corpo de prova. Pode-se observar que quanto maior o teor de colóide na amostra, menor é o módulo tangente obtido nos ensaios edométricos, confirmando curvas tensão x deformação mais suaves e com maior deformação.

Para cada curva da Figura 3.22 foi aplicada a Equação (3.3), proposta por Janbu (1967) para descrever a variação do módulo tangente,  $M$ , em função da tensão vertical aplicada em um corpo de prova durante um ensaio edométrico ( $\sigma$ ). Nessa equação,  $p_a$  é uma pressão de referência, adotada como sendo igual à pressão atmosférica (100 kPa), e  $m$  e  $a$  são parâmetros de ajuste adimensionais denominados número do módulo e expoente da tensão, respectivamente.

$$M = m \cdot p_a \cdot \left(\frac{\sigma}{p_a}\right)^{1-a} \quad (3.3)$$

Os parâmetros  $a$  e  $m$  foram ajustados para cada curva, ou seja, para cada teor de coloide, de forma a obter a menor diferença entre os pontos experimentais e aqueles obtidos com a aplicação da equação. As Figuras 3.23 a 3.29 apresentam essas curvas para cada teor de coloide, mostrando tanto os pontos experimentais quanto as curvas das equações de variação do módulo ajustadas.



**FIGURA 3.23. APLICAÇÃO DA EQUAÇÃO DE M PARA OS DADOS EXPERIMENTAIS DO CORPO DE PROVA DE AREIA SECA, OU SEJA, COM 0% DE COLOIDE.**

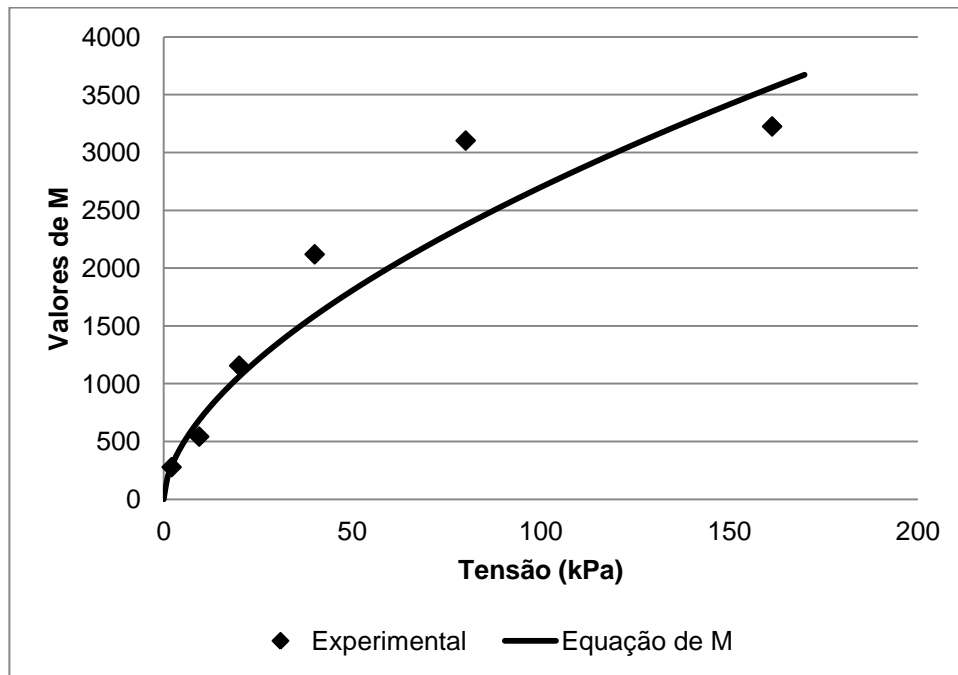


FIGURA 3.24. APLICAÇÃO DA EQUAÇÃO DE M PARA OS DADOS EXPERIMENTAIS DO CORPO DE PROVA COM 26% DE COLOIDE.

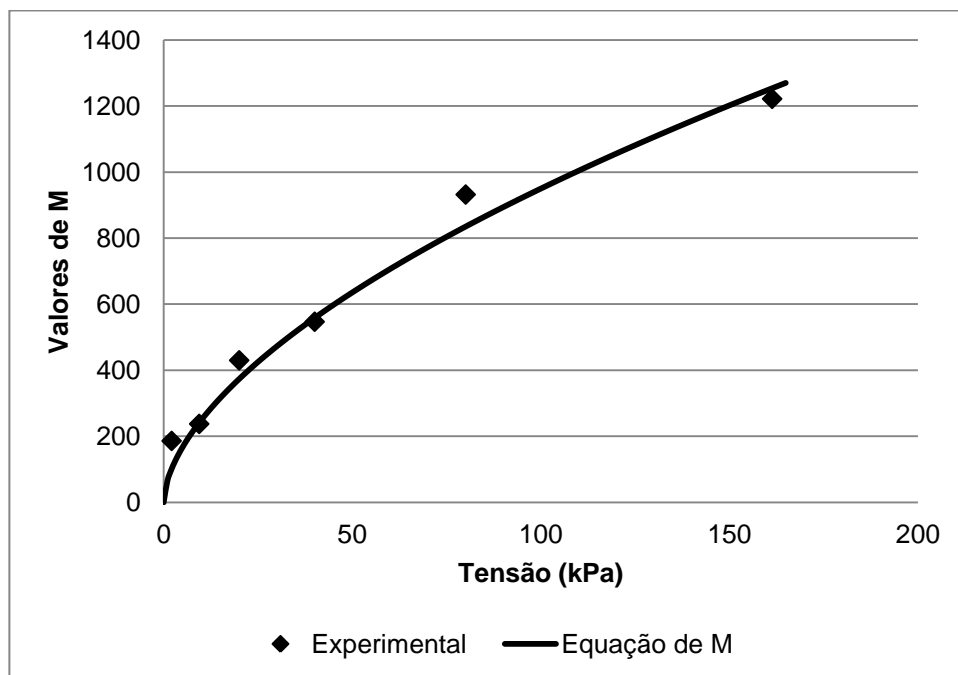


FIGURA 3.25. APLICAÇÃO DA EQUAÇÃO DE M PARA OS DADOS EXPERIMENTAIS DO CORPO DE PROVA COM 38% DE COLOIDE.

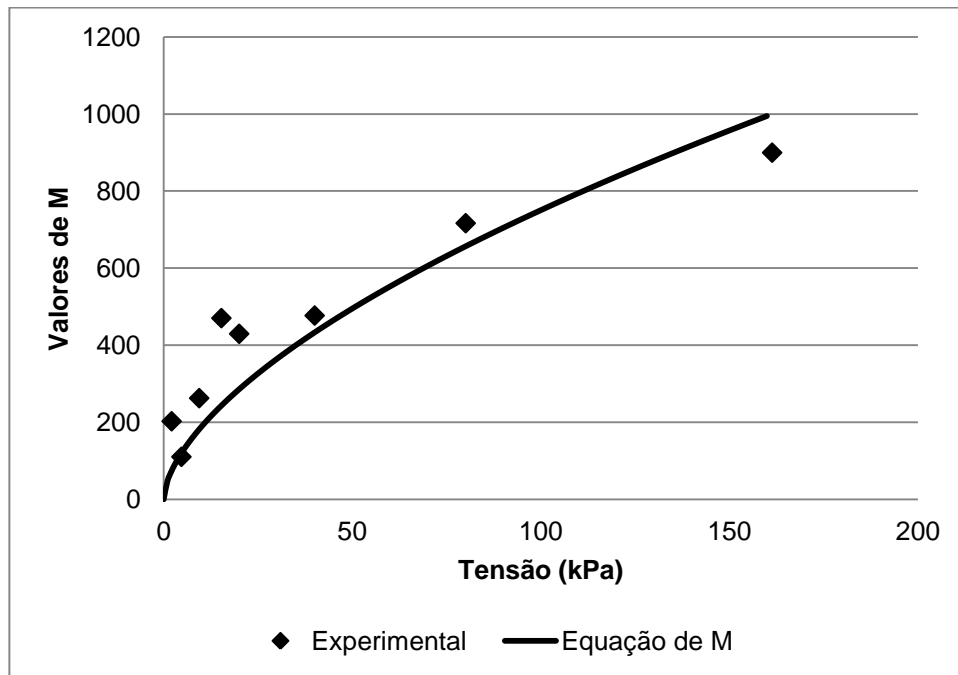


FIGURA 3.26. APLICAÇÃO DA EQUAÇÃO DE M PARA OS DADOS EXPERIMENTAIS DO CORPO DE PROVA COM 43% DE COLOIDE.

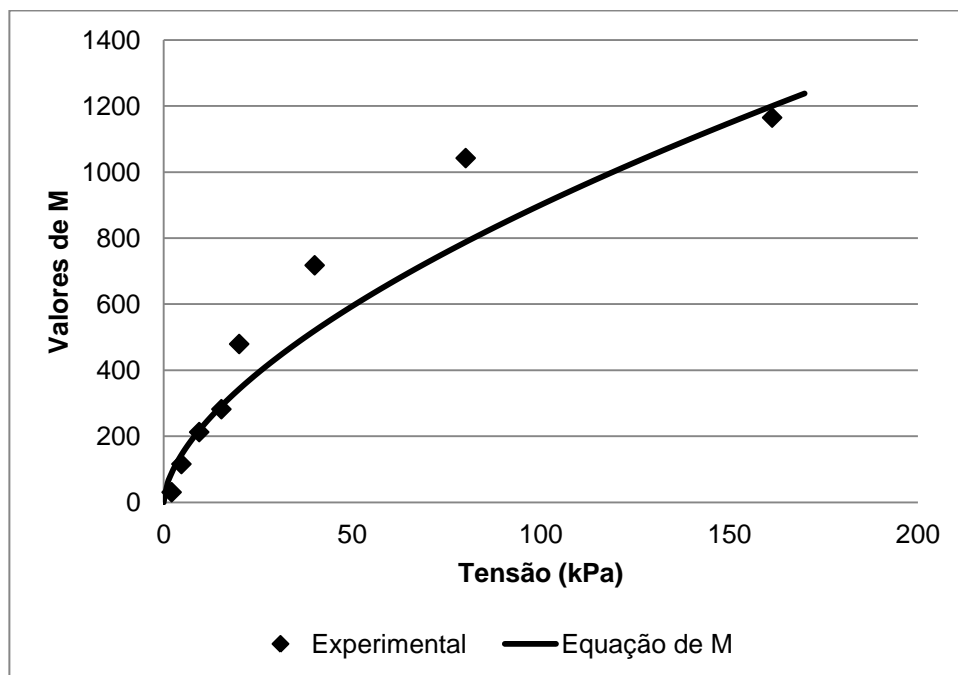


FIGURA 3.27. APLICAÇÃO DA EQUAÇÃO DE M PARA OS DADOS EXPERIMENTAIS DO CORPO DE PROVA COM 47% DE COLOIDE.

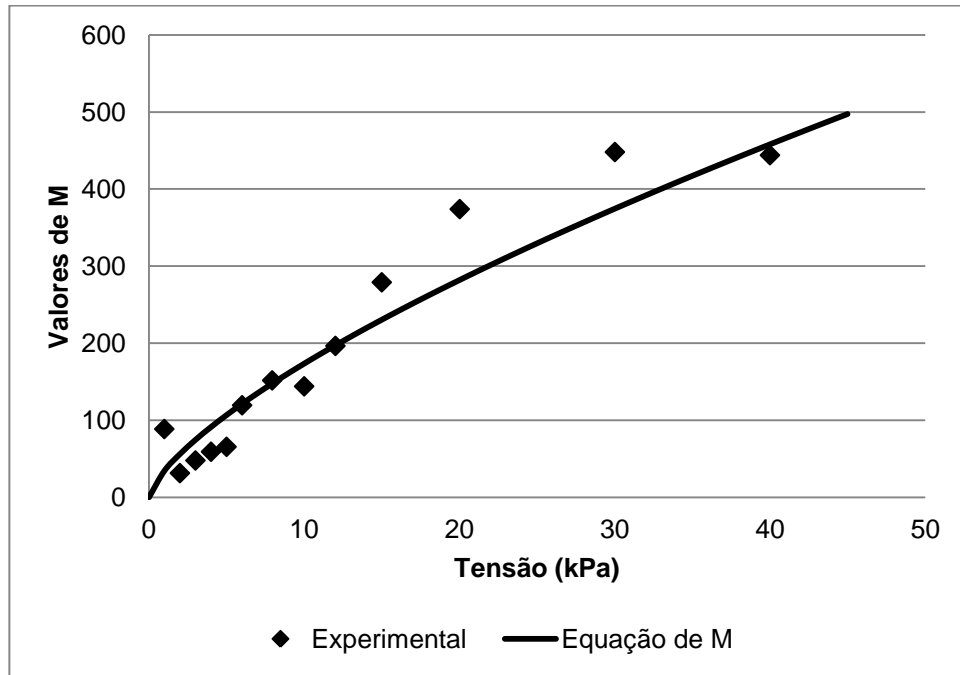


FIGURA 3.28. APLICAÇÃO DA EQUAÇÃO DE M PARA OS DADOS EXPERIMENTAIS DO CORPO DE PROVA COM 74% DE COLOIDE.

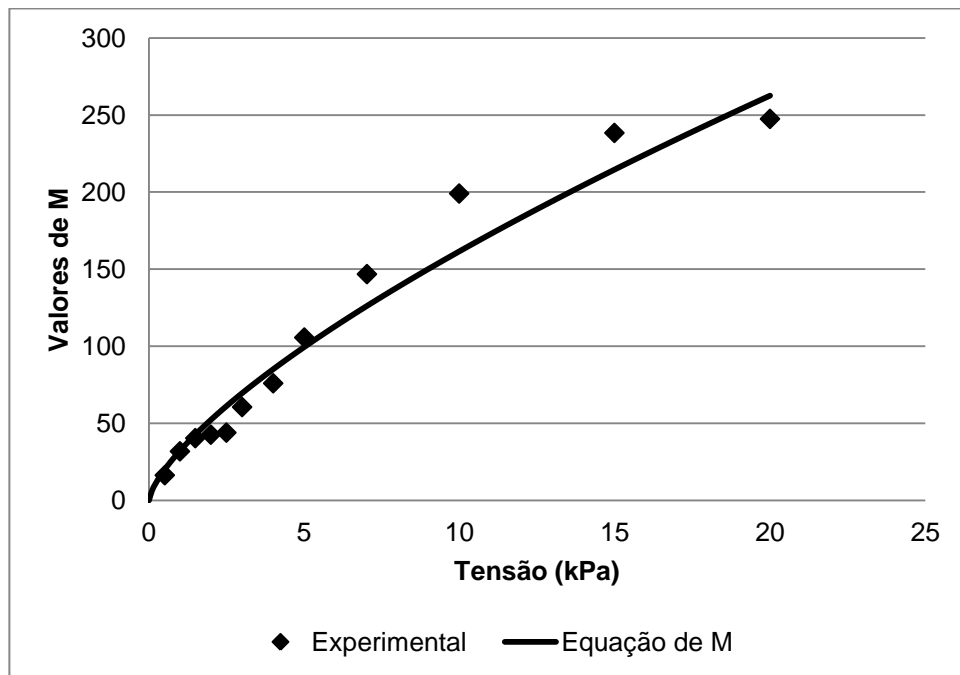


FIGURA 3.29. APLICAÇÃO DA EQUAÇÃO DE M PARA OS DADOS EXPERIMENTAIS DO CORPO DE PROVA COM 100% DE COLOIDE.

A análise dessas figuras mostra que, de modo geral, a equação de M se ajusta muito bem aos pontos iniciais da curva, subestimando os valores experimentais intermediários e voltando a se ajustar aos dados finais.

A Tabela 3.5 exibe os valores de  $a$  e  $m$  obtidos no ajuste da Equação (3.3) aos pontos experimentais apresentados nas Figuras 3.23 a 3.29.

**TABELA 3.5. VALORES OBTIDOS PARA OS PARÂMETROS  $a$  E  $m$  NO AJUSTE DA EQUAÇÃO DE M (EQUAÇÃO (3.3)).**

Teor de coloide	Parâmetro $m$	Parâmetro $a$
0% - Areia seca	75,00	0,43
26%	27,00	0,42
38%	9,50	0,42
43%	7,50	0,40
47%	9,00	0,40
74%	8,70	0,30
100%	8,10	0,30

Para cada parâmetro foi gerado um gráfico com os valores obtidos em função do teor de coloide. A partir da observação da tendência de comportamento desses pontos foram propostas e ajustadas as equações constitutivas que descrevem o comportamento de cada parâmetro.

O parâmetro  $a$  apresentou uma tendência de redução suave com o aumento da porcentagem de coloide contida no corpo de prova. Propõe-se a Equação (3.4) para descrição do seu comportamento.

$$a = a_{res} + (a_0 - a_{res}) \cdot \left[ \frac{1}{1 + (L_a \cdot MO)^{u_a}} \right]^{v_a} \quad (3.4)$$

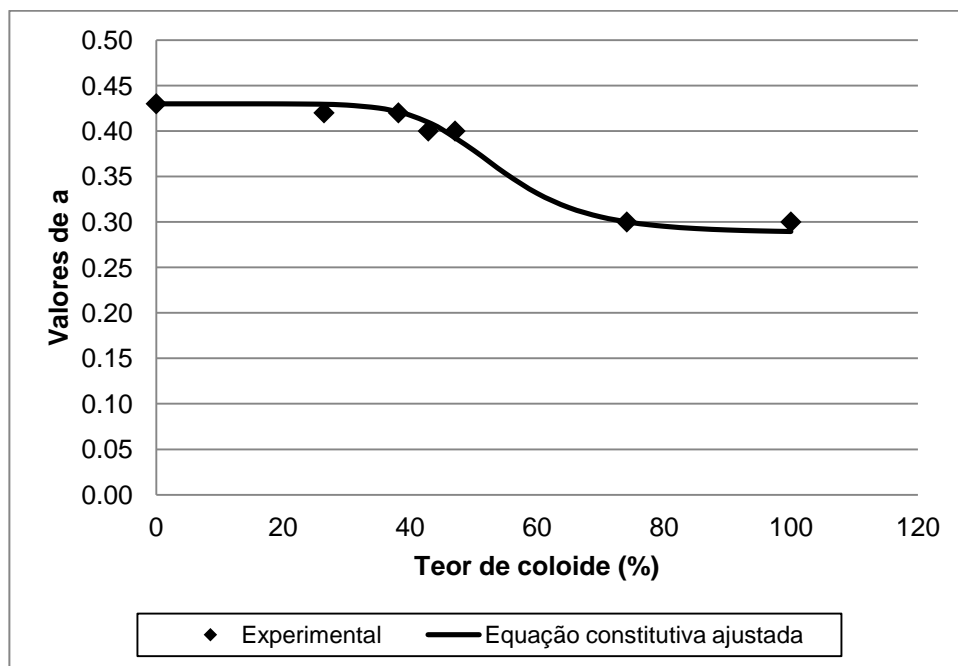
Na Equação (3.4),  $a_0$  e  $a_{res}$  representam, respectivamente, os valores inicial e residual do parâmetro  $a$ ,  $MO$  é o teor de material pastoso (coloide), e  $L_a$ ,  $u_a$  e  $v_a$  são parâmetros adimensionais de ajuste da equação. A relação entre os parâmetros  $u_a$  e  $v_a$  pode ser definida pela Equação (3.5).

$$v_a = 1 - \frac{1}{u_a} \quad (3.5)$$

A Tabela 3.6 mostra os valores obtidos para os parâmetros  $L_a$ ,  $u_a$  e  $v_a$  e para  $a_0$  e  $a_{res}$  após o ajuste da Equação (3.4) aos pontos obtidos experimentalmente para  $a$ . A Figura 3.30 apresenta um gráfico com esses dados experimentais e a Equação (3.4) já ajustada aos seus valores.

**TABELA 3.6. VALORES OBTIDOS PARA OS PARÂMETROS DA EQUAÇÃO (3.4) APÓS AJUSTE AOS PONTOS OBTIDOS EXPERIMENTALMENTE PARA O PARÂMETRO  $a$ .**

$a_0$	0,430
$a_{res}$	0,288
$L_a$	0,019
$u_a$	8
$v_a$	0,875



**FIGURA 3.30. PONTOS OBTIDOS EXPERIMENTALMENTE PARA  $a$  E EQUAÇÃO CONSTITUTIVA AJUSTADA.**

O parâmetro  $m$  também apresentou uma tendência de redução com o aumento da porcentagem de colóide contida no corpo de prova. Propõe-se a Equação (3.6) para a descrição do seu comportamento.

$$m = m_{res} + (m_0 - m_{res}) \cdot \left[ \frac{1}{1 + (L_m \cdot MO)^{u_m}} \right]^{v_m} \quad (3.6)$$

Similarmente à Equação (3.4), os parâmetros  $m_0$  e  $m_{res}$  da Equação (3.6) representam, respectivamente, os valores inicial e residual do parâmetro  $m$ ,  $MO$  é o teor de material pastoso (colóide), e  $L_m$ ,  $u_m$  e  $v_m$  são parâmetros adimensionais de ajuste da equação. A relação entre os parâmetros  $u_m$  e  $v_m$  pode ser definida pela Equação (3.7).

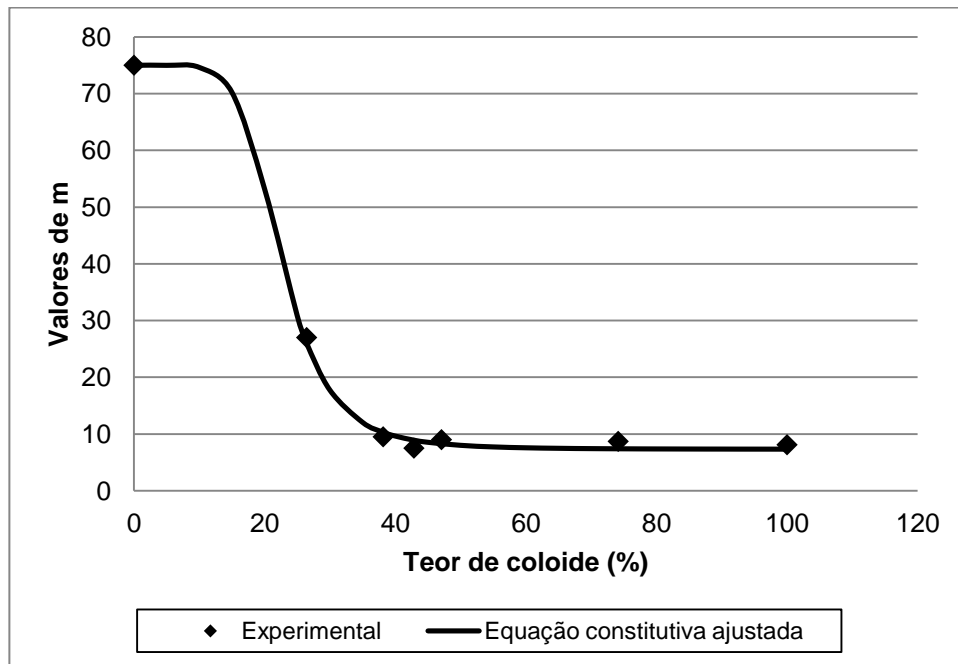
$$v_m = 1 - \frac{1}{u_m} \quad (3.7)$$

A Tabela 3.7 mostra os valores obtidos para os parâmetros  $L_m$ ,  $u_m$  e  $v_m$  e para  $m_0$  e  $m_{res}$  após o ajuste da Equação (3.6) aos pontos obtidos experimentalmente para  $m$ . A Figura 3.31 apresenta um gráfico com esses dados experimentais e a Equação (3.6) já ajustada aos seus valores.

**TABELA 3.7. VALORES OBTIDOS PARA OS PARÂMETROS DA EQUAÇÃO (3.6) APÓS AJUSTE AOS PONTOS OBTIDOS EXPERIMENTALMENTE PARA O PARÂMETRO  $m$ .**

$m_0$	75
$m_{res}$	7,300
$L_m$	0,046
$u_m$	6,500
$v_m$	0,846





**FIGURA 3.31. PONTOS OBTIDOS EXPERIMENTALMENTE PARA  $m$  E EQUAÇÃO CONSTITUTIVA AJUSTADA.**

Observa-se que as Equações (3.4) e (3.6) apresentam o mesmo formato. No entanto, é a definição dos parâmetros e dos valores inicial e residual de cada equação que determina sua faixa de abrangência de valores e o modo como a equação se comporta (amplitude, inclinação). Assim, torna-se fundamental que a metodologia experimental que resulta nos valores de  $a$  e  $m$  seja bem desenvolvida e padronizada, a fim de fornecer valores que expressem a realidade do comportamento de cada parâmetro estudado.

## 4 MODELO CONSTITUTIVO

### 4.1 EMBASAMENTO TEÓRICO

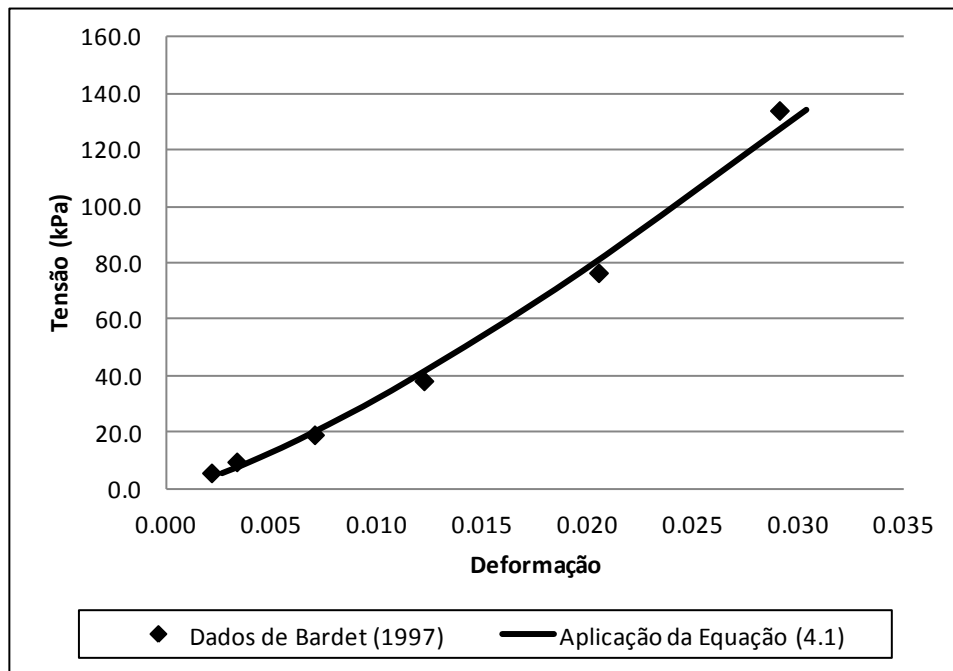
O modelo proposto objetiva simular o comportamento mecânico de RSU quando submetidos a um estado edométrico (deformações horizontais nulas). O ensaio edométrico possui a vantagem de possibilitar a caracterização do comportamento mecânico dos RSU utilizando amostras de grandes dimensões e de ter uma execução mais simples e barata que a de outros ensaios (como, por exemplo, o de compressão triaxial axi-simétrica). A realização do ensaio edométrico em grandes dimensões permite que o resíduo seja ensaiado em condições mais próximas às do seu estado *in natura*, ao invés de pré-tratado como é usualmente feito, proporcionando resultados mais realistas quanto à resposta dos RSU quando submetidos a tensão.

A deformação de um corpo de prova submetido a um ensaio edométrico pode ser estimada matematicamente por:

$$\varepsilon = \frac{p_a^{-a}}{m} \cdot \frac{\sigma^a}{a} \quad (4.1)$$

Onde  $p_a$  é uma pressão de referência, utilizada como sendo igual à pressão atmosférica (100 kPa),  $\sigma$  é a tensão vertical aplicada, e  $a$  e  $m$  são parâmetros de ajuste adimensionais.

A Figura 4.1 apresenta a aplicação da Equação (4.1) a dados experimentais de ensaios edométricos realizados com solo (argila siltosa). Os dados foram retirados de Bardet (1997) e os valores obtidos para os parâmetros  $a$  e  $m$  foram de 0,78 e 53, respectivamente.



**FIGURA 4.1 APLICAÇÃO DA EQUAÇÃO (4.1) A DADOS DA LITERATURA (BARDET, 1997) DE ENSAIOS EDMÉTRICOS REALIZADOS COM SOLO.**

Rearranjando a Equação (4.1), isolando a tensão  $\sigma$  e derivando-a em relação à deformação  $\varepsilon$ , obtém-se:

$$\frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon} = m \cdot p_a \cdot \left( \frac{\sigma}{p_a} \right)^{1-a} \quad (4.2)$$

A análise cautelosa da Equação (4.2) indica que esta é semelhante à equação proposta por Janbu (1967) para descrever a variação do módulo tangente  $M$  ao longo de uma curva tensão x deformação, também obtida em um ensaio edométrico (Equação (3.3)). Os parâmetros  $a$  e  $m$  são apresentados por Janbu (1967) como expoente da tensão e número do módulo, respectivamente.

Por definição, o módulo tangente  $M$  de uma curva tensão x deformação é a razão entre a tensão  $\sigma$  aplicada em uma direção e a deformação  $\varepsilon$  sofrida pelo corpo de prova nessa mesma direção devido à aplicação da tensão  $\sigma$  (Figura 4.2).

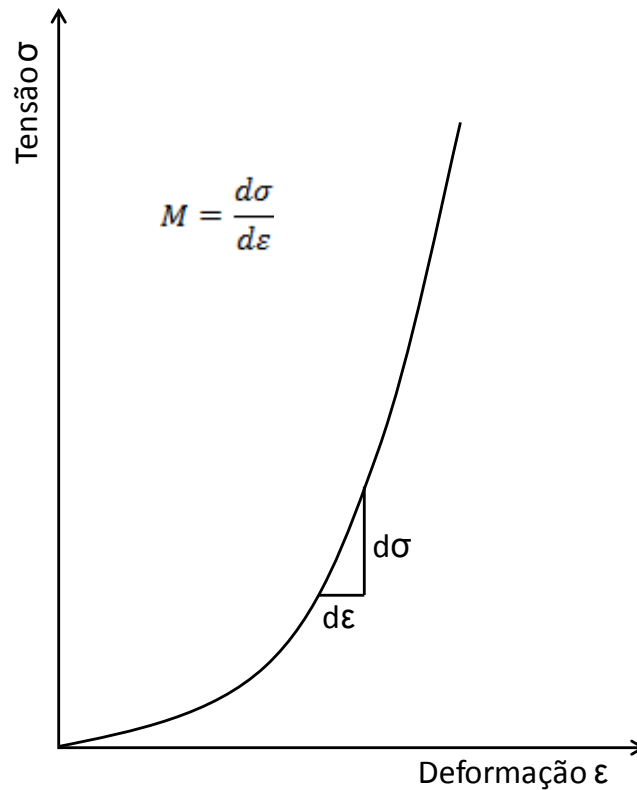


FIGURA 4.2. DEFINIÇÃO DO MÓDULO TANGENTE M.

Alternativamente, a curva tensão x deformação pode ser estimada de forma incremental a partir da derivação da Equação (4.1). Matematicamente tem-se:

$$\varepsilon_i = \delta\varepsilon_i + \sum_{j=0}^{i-1} \delta\varepsilon_j \quad (4.3a)$$

$$\varepsilon_i = \frac{\delta\sigma_i}{M_i} + \sum_{j=0}^{i-1} \delta\varepsilon_j \quad (4.3b)$$

Janbu (1967) definiu faixas de valores para os parâmetros  $m$  e  $a$ , indicando que são constantes para cada material, sendo definidos de acordo com a porosidade de cada tipo de solo. As Figuras 4.3 e 4.4 apresentam essas faixas de variação para os valores de  $m$  e  $a$ , respectivamente.

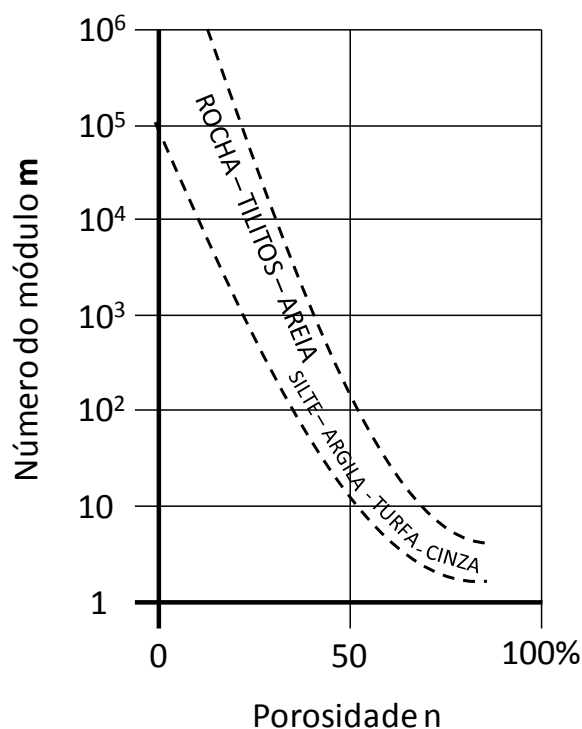


FIGURA 4.3. VARIAÇÃO DE  $m$  COM A POROSIDADE. FONTE: ADAPTADO DE JANBU (1967).

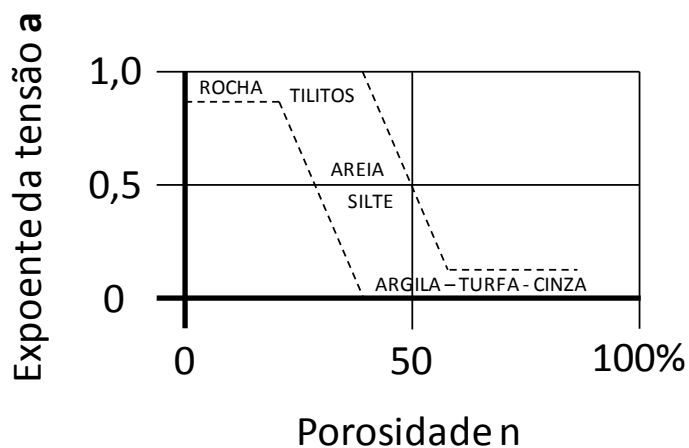


FIGURA 4.4. VARIAÇÃO DE  $a$  COM A POROSIDADE. FONTE: ADAPTADO DE JANBU (1967).

Os valores experimentais de  $a$  e  $m$  obtidos no capítulo anterior deste trabalho mostram que os comportamentos obtidos para esses parâmetros nos ensaios com solo-coloide são muito similares aos comportamentos apresentados por Janbu (1967) (Figuras 4.3 e 4.4). No entanto, Janbu (1967) propôs valores de parâmetros constantes para cada tipo de solo, enquanto neste trabalho, assim como apresentado por Otsuka

(2010) e Nocko (2010), os parâmetros variam em função do teor de colóide contido no corpo de prova. Assim, analisando RSU, os parâmetros  $a$  e  $m$  podem variar para uma mesma amostra ao longo do tempo, devido ao processo de degradação dos resíduos, e conseqüente redução do teor de matéria orgânica na amostra.

Diferentemente das equações desenvolvidas por Nocko (2010), o modelo proposto por este trabalho utilizou a porcentagem de material pastoso no lugar da matéria orgânica, uma vez que é a fração com comportamento pastoso, ou coloidal, dos RSU que altera suas propriedades mecânicas. Assim, os parâmetros  $a$  e  $m$  utilizados neste trabalho são considerados função do teor de material pastoso dos RSU, que varia conforme a degradação de seus constituintes, principalmente da matéria orgânica presente.

Além das formas integral (Equação (4.1)) e incremental (Equação (4.3)), a curva tensão x deformação também pode ser descrita de forma diferencial em relação ao tempo (Equação (4.4)). Na Equação (4.4),  $t$  refere-se ao tempo passado desde o início do processo de degradação dos resíduos e  $\Delta t_c$  refere-se ao incremento de tempo do ensaio edométrico que só ocorre a partir do primeiro carregamento de tensão.

$$\varepsilon(t + \Delta t_c) = \varepsilon(t) + \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \cdot \Delta t_c \quad (4.4)$$

Como a deformação do corpo de prova depende da tensão aplicada e dos parâmetros  $a$  e  $m$  (Equação (4.1)), e considerando que esses parâmetros variam com o teor de material pastoso contido nos resíduos (MO), que, por sua vez, varia com o tempo devido à degradação da matéria orgânica presente, o termo diferencial da Equação (4.4) pode ser expandido como:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \frac{\partial \varepsilon}{\partial a} \cdot \frac{\partial a}{\partial MO} \cdot \frac{\partial MO}{\partial t} + \frac{\partial \varepsilon}{\partial m} \cdot \frac{\partial m}{\partial MO} \cdot \frac{\partial MO}{\partial t} + \frac{\partial \varepsilon}{\partial \sigma} \cdot \frac{\partial \sigma}{\partial t} \quad (4.5)$$

O termo  $\frac{\partial \sigma}{\partial t}$ , na Equação (4.5), representa a taxa de carregamento aplicada no corpo de prova, enquanto as Equações (4.6) a (4.11) apresentam os termos da

Equação (4.5) expandidos. As Equações (4.6) e (4.7) foram obtidas a partir da derivação da Equação (4.1) em relação a  $a$  e  $m$ , respectivamente, e a Equação (4.8) foi obtida da definição de módulo tangente.

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial a} = \frac{1}{m \cdot a} \cdot \left(\frac{\sigma}{p_a}\right)^a \cdot \left(\ln \frac{\sigma}{p_a} - \frac{1}{a}\right) \quad (4.6)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial m} = -\frac{p_a^{-a} \cdot \sigma^a}{a \cdot m^2} \quad (4.7)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial \sigma} = \frac{1}{M} \quad (4.8)$$

Derivando as equações constitutivas de  $a$  e  $m$  obtidas no capítulo anterior (Equações (3.4) e (3.6)) em relação ao teor de material pastoso (MO), foram obtidos os termos  $\frac{\partial a}{\partial MO}$  e  $\frac{\partial m}{\partial MO}$  (Equações (4.9) e (4.10)).

$$\frac{\partial a}{\partial MO} = (a_0 - a_{res}) \cdot \left\{ \frac{-v_a \cdot u_a \cdot L_a \cdot (L_a \cdot MO)^{u_a}}{[1 + (L_a \cdot MO)^{u_a}]^{v_a+1}} \right\} \quad (4.9)$$

$$\frac{\partial m}{\partial MO} = (m_0 - m_{res}) \cdot \left\{ \frac{-v_m \cdot u_m \cdot L_m \cdot (L_m \cdot MO)^{u_m}}{[1 + (L_m \cdot MO)^{u_m}]^{v_m+1}} \right\} \quad (4.10)$$

O termo  $\frac{\partial MO}{\partial t}$  pode ser estimado utilizando-se a formulação proposta por Nocko (2010). Matematicamente tem-se:

$$\frac{\partial MO}{\partial t} = (MO_0 - MO_{res}) \cdot \left[ \frac{-m_{MO} \cdot n_{MO} \cdot \alpha_{MO} \cdot (\alpha_{MO} \cdot t)^{n_{MO}-1}}{[1 + (\alpha_{MO} \cdot t)^{n_{MO}}]^{m_{MO}+1}} \right] \quad (4.11)$$

Onde  $MO_0$  e  $MO_{res}$  representam, respectivamente, os valores inicial e residual de teor de material pastoso na amostra, em porcentagem, e  $t$  representa o tempo de degradação do resíduo. Os parâmetros  $\alpha_{MO}$ ,  $m_{MO}$  e  $n_{MO}$  dependem das características

do processo de degradação (temperatura, umidade) e  $\alpha_{MO}$  tem unidade de 1/tempo, enquanto  $m_{MO}$  e  $n_{MO}$  são adimensionais. A Equação (4.12) apresenta a relação utilizada entre  $m_{MO}$  e  $n_{MO}$  para este trabalho.

$$m_{MO} = 1 - \frac{1}{n_{MO}} \quad (4.12)$$

A Equação (4.11) tem o mesmo formato da equação proposta por Nocko (2010) para descrever a taxa de variação da massa de matéria orgânica dos RSU ao longo do tempo devido ao processo de biodegradação. No entanto, neste trabalho ela é utilizada para descrever a taxa de variação da porcentagem de material pastoso, em massa, na amostra ao longo do tempo devido a esse mesmo processo. Essa alteração foi feita para facilitar a implementação, uma vez que os parâmetros  $a$  e  $m$  são definidos em função da porcentagem de material pastoso nos RSU, e não da sua massa.

A relação apresentada na Equação (4.12) difere da relação proposta por Nocko (2010), mas é aceitável, visto que Nocko (2010) afirma que os parâmetros  $\alpha_{MO}$ ,  $m_{MO}$  e  $n_{MO}$  podem ser ajustados para diferentes características do processo de biodegradação da matéria orgânica. Além disso, ajustando os valores desses parâmetros é possível obter curvas idênticas com as duas relações.

Como, para o modelo proposto, os parâmetros  $a$  e  $m$  variam de acordo com a porcentagem de material pastoso contida nos resíduos, torna-se necessária uma equação que descreva a variação dessa porcentagem no tempo. Para isso, a Equação (4.11) foi integrada, obtendo-se a Equação (4.13).

$$MO = MO_{res} + (MO_0 - MO_{res}) \cdot \left[ \frac{1}{1 + (\alpha_{MO} \cdot t)^{n_{MO}}} \right]^{m_{MO}} \quad (4.13)$$

Os parâmetros do processo de degradação podem ser estipulados ou obtidos a partir de análise realizada com os resíduos. Essa análise é feita com amostras coletadas em aterros: o teor de material pastoso é definido a partir da segregação dos constituintes dos resíduos e o tempo de degradação, se não for conhecido, pode ser estimado a partir de dados da quantidade diária de resíduo depositada no aterro e da



ordem de preenchimento das suas células (controle de entrada de RSU do aterro) (MACHADO ET AL, 2009, BABU ET AL, 2010, GABR E VALERO, 1995), ou a partir da análise de restos de jornais e outros documentos datados encontrados na amostra (CARVALHO, 1999, GABR E VALERO, 1995). Esse último é utilizado como método auxiliar porque é menos preciso, visto que a data dos documentos pode não corresponder com a data de deposição do resíduo, e porque possui uma limitação com a idade do aterro, uma vez que o papel datado sofre decomposição e sua leitura fica comprometida com o tempo.

Os parâmetros  $MO_0$ ,  $MO_{res}$ ,  $\alpha_{MO}$ ,  $m_{MO}$  e  $n_{MO}$  são estimados a partir do ajuste da Equação (4.13) aos pontos experimentais plotados no gráfico de teor de material pastoso x tempo.

Com isso, a Equação (4.13) permite estimar o teor de material pastoso de determinado resíduo, sabendo sua idade aproximada, assim como o contrário. Com essas informações é possível saber a quantidade aproximada de matéria orgânica restante no resíduo e estimar, a partir da taxa de variação da fração pastosa no tempo, o potencial de geração futura de gases e líquidos dos resíduos estudados.

## 4.2 IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO PROPOSTO

Para a implementação do modelo foram usadas as três equações gerais propostas para descrever o comportamento da curva tensão x deformação de um ensaio edométrico: a forma integral (Equação (4.1)), a forma incremental (Equação (4.3)) e a forma diferencial (Equação (4.4)), que foram reproduzidas abaixo, junto com a Equação (4.5), para facilitar o entendimento da implementação do modelo. Os dados experimentais utilizados para ajuste das curvas foram os obtidos dos ensaios edométricos realizados com solo-coloide.

$$\varepsilon = \frac{p_a^{-a}}{m} \cdot \frac{\sigma^a}{a} \quad (4.1)$$

$$\varepsilon_i = \frac{\Delta\sigma_i}{M_i} + \sum_{j=0}^{i-1} \varepsilon_j \quad (4.3)$$

$$\varepsilon(t + \Delta t_c) = \varepsilon(t) + \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \cdot \Delta t_c \quad (4.4)$$

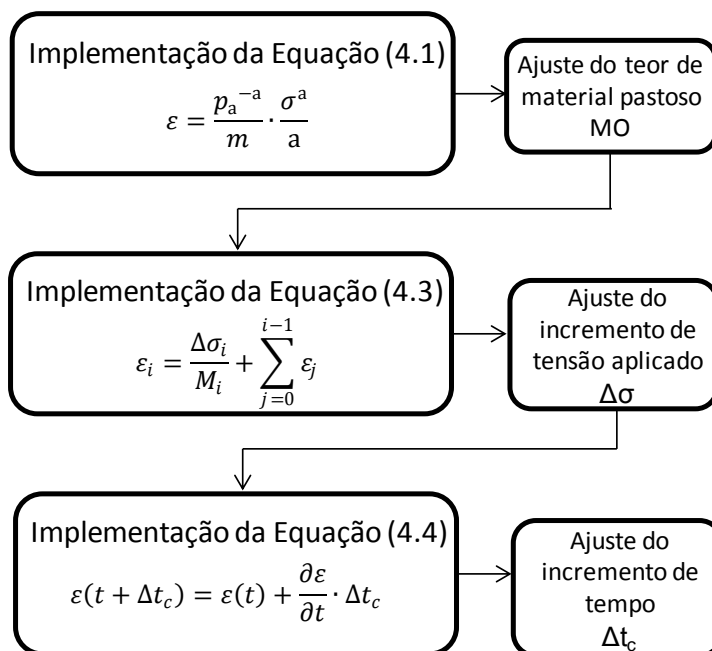
$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \frac{\partial \varepsilon}{\partial a} \cdot \frac{\partial a}{\partial MO} \cdot \frac{\partial MO}{\partial t} + \frac{\partial \varepsilon}{\partial m} \cdot \frac{\partial m}{\partial MO} \cdot \frac{\partial MO}{\partial t} + \frac{\partial \varepsilon}{\partial \sigma} \cdot \frac{\partial \sigma}{\partial t} \quad (4.5)$$

A primeira equação implementada foi a Equação (4.1). A única variável desconhecida dessa equação era o teor de material pastoso, visto que os parâmetros de  $a$  e  $m$  já foram definidos para o solo-coloide. Assim, substituindo os parâmetros  $a$  e  $m$  por suas equações constitutivas, a equação foi ajustada aos dados experimentais variando-se somente o valor da porcentagem de material pastoso.

A segunda equação implementada foi a Equação (4.3). Como a porcentagem de material pastoso já era conhecida do ajuste da Equação (4.1),  $M$  também era conhecido. Assim, a única variável desconhecida da equação era o valor do incremento de tensão ( $\Delta\sigma$ ). Na implementação do modelo, a tensão não é aplicada como no ensaio edométrico, onde o carregamento é todo aplicado de uma única vez, ela é aplicada em pequenos incrementos. Foi observado que há um valor ótimo de  $\Delta\sigma$  para que a curva gerada pela implementação da Equação (4.3) seja igual à gerada com a Equação (4.1).

A última equação implementada foi a Equação (4.4), que forneceu o incremento de tempo necessário para que a curva dessa equação coincidissem com as outras duas. Foi observado que esse incremento ótimo de tempo para os ensaios com o solo colóide foi tal que, ao final de uma hora, a tensão aplicada na implementação coincidiu com a tensão aplicada no carregamento do corpo de prova no ensaio, que também durou uma hora.

A Figura 4.5 apresenta um fluxograma de implementação do modelo proposto.



**FIGURA 4.5. FLUXOGRAMA DE IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO PROPOSTO.**

Todas as simulações realizadas com o modelo proposto foram feitas no programa Microsoft Office Excel 2007, devido à facilidade de implementação e de acesso ao programa.

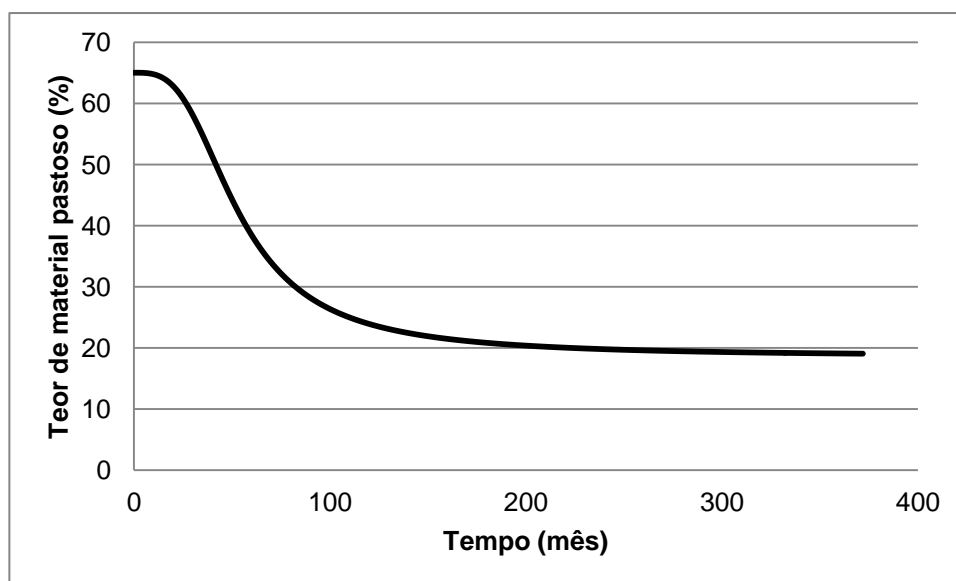
### 4.3 APLICAÇÃO DO MODELO AOS DADOS DE SOLO-COLOIDE

A aplicação do modelo foi feita para quatro curvas tensão x deformação obtidas nos ensaios edométricos com solo-coloide: 26%, 38%, 43% e 47% de coloide. Esses teores foram escolhidos por serem semelhantes a teores de material pastoso encontrados em RSU (CARVALHO, 1999; NASCIMENTO, 2007; FARIAS E JUCÁ, 2000).

A Equação (4.13) foi usada para simular a redução do teor de material pastoso devido ao processo de degradação da matéria orgânica. Os parâmetros  $\alpha_{MO}$ ,  $m_{MO}$  e  $n_{MO}$  foram ajustados para que o processo de degradação completo da matéria durasse aproximadamente 30 anos. A Tabela 4.1 apresenta os valores adotados para esses parâmetros e a Figura 4.6 mostra o decaimento do teor de material pastoso ao longo do tempo obtido com esses valores.

**TABELA 4.1. VALORES UTILIZADOS PARA OS PARÂMETROS DA EQUAÇÃO (4.13) PARA SIMULAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DO SOLO-COLOIDE.**

$MO_0$	65,0%
$MO_{res}$	18,6%
$\alpha_{MO}$	0,022
$n_{MO}$	3,2
$m_{MO}$	0,6875



**FIGURA 4.6. DECAIMENTO DO TEOR DE MATERIAL PASTOSO AO LONGO DO TEMPO COM VALORES DE PARÂMETROS UTILIZADOS PARA SIMULAR O COMPORTAMENTO MECÂNICO DO SOLO-COLOIDE.**

Nas Figuras 4.7 a 4.10 são apresentadas as curvas das três equações gerais implementadas, para todos os teores de material pastoso simulados. Observa-se que as curvas das equações incremental e diferencial são idênticas, mas diferem um pouco da curva da equação integral. Essa diferença ocorreu porque o incremento de carga utilizado para implementar as equações incremental e diferencial não foi suficientemente pequeno, devido ao limite de células disponibilizado para uso pela planilha do Excel. Apesar da diferença gráfica final, foi observado que, quanto menor o incremento de carga aplicado, mais essas curvas se aproximavam da curva da equação integral, sugerindo que um incremento de carga suficientemente pequeno igualaria as três curvas.

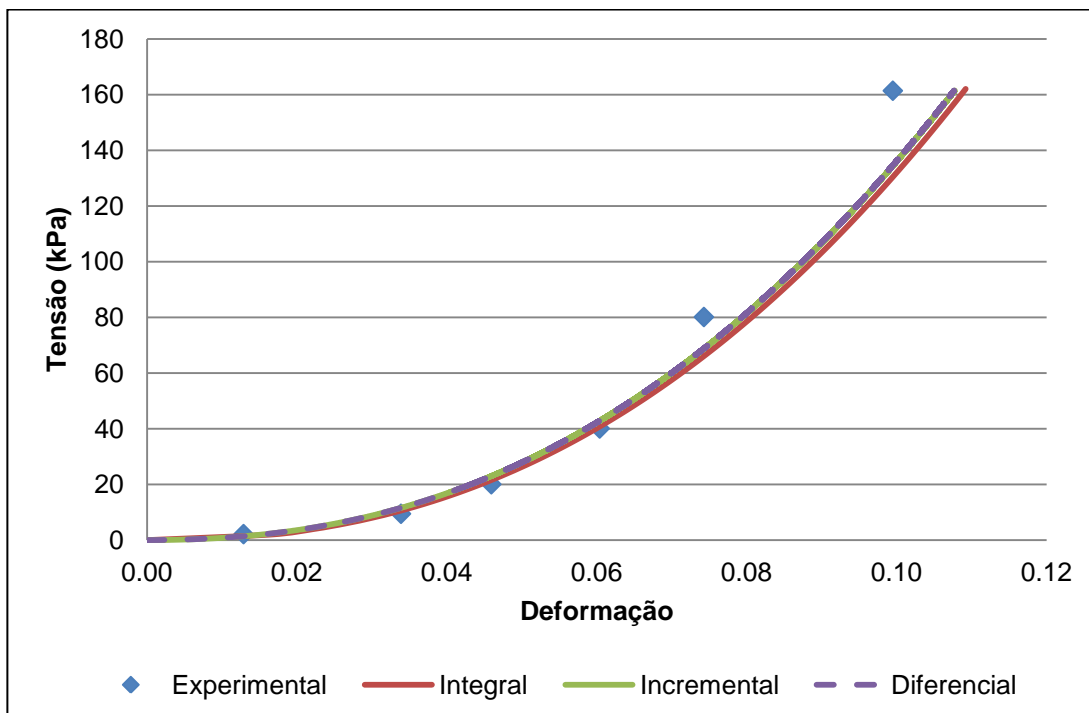


FIGURA 4.7. COMPARAÇÃO DAS TRÊS EQUAÇÕES IMPLEMENTADAS PARA CORPO DE PROVA COM 26% DE COLOIDE.

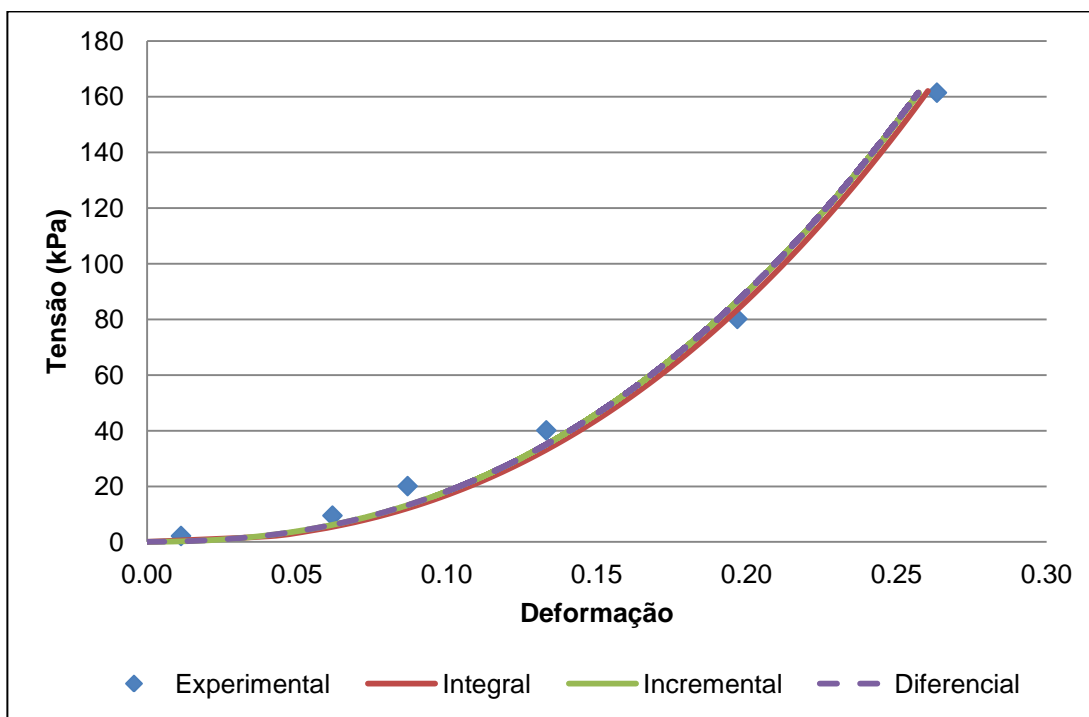


FIGURA 4.8. COMPARAÇÃO DAS TRÊS EQUAÇÕES IMPLEMENTADAS PARA CORPO DE PROVA COM 38% DE COLOIDE.

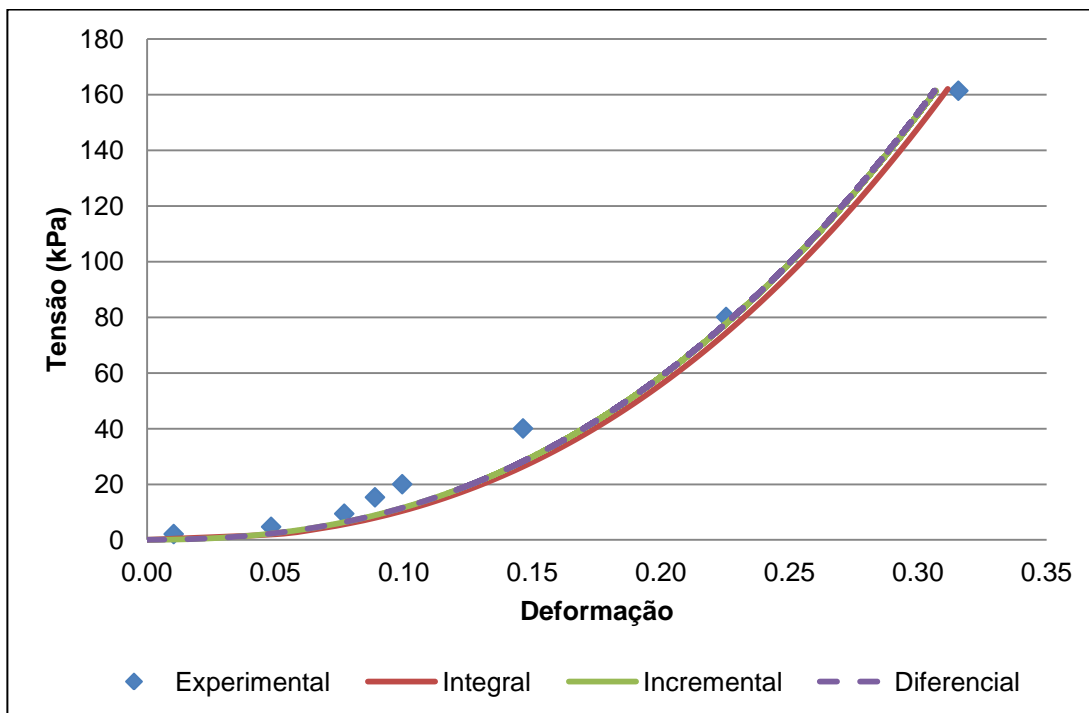


FIGURA 4.9. COMPARAÇÃO DAS TRÊS EQUAÇÕES IMPLEMENTADAS PARA CORPO DE PROVA COM 43% DE COLOIDE.

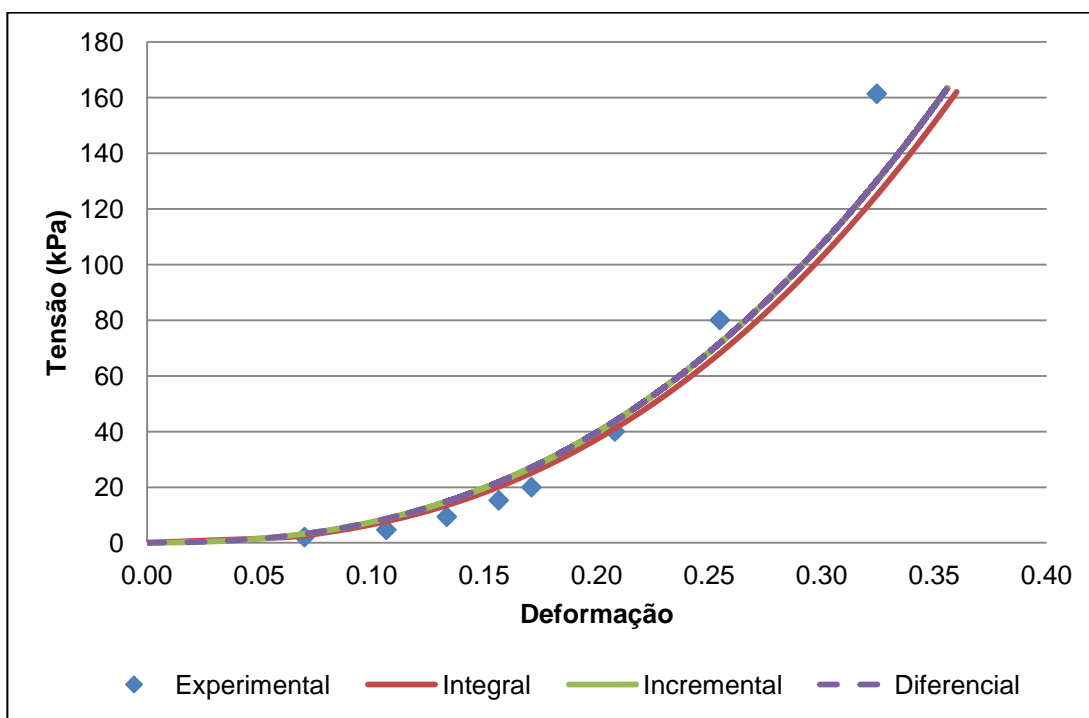


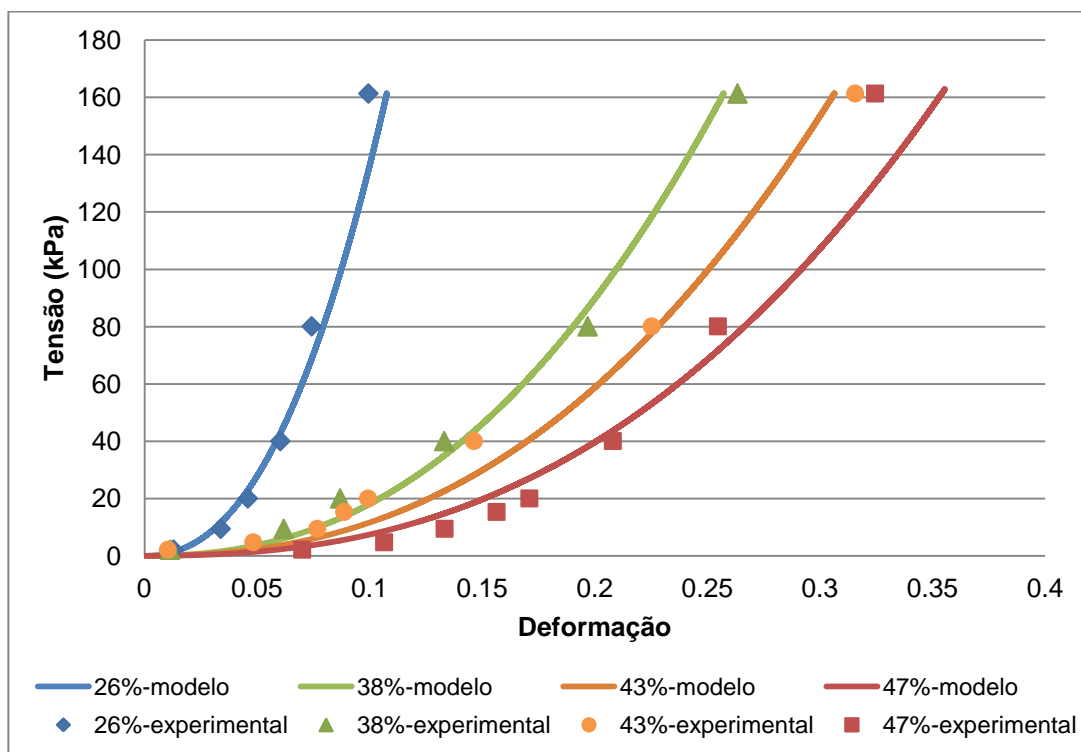
FIGURA 4.10. COMPARAÇÃO DAS TRÊS EQUAÇÕES IMPLEMENTADAS PARA CORPO DE PROVA COM 47% DE COLOIDE.

A Tabela 4.2 apresenta os teores de coloide reais dos corpos de prova ensaiados e os teores de coloide obtidos com o ajuste das equações do modelo. Essa pequena variação nas porcentagens é aceitável, visto que os valores dos parâmetros utilizados no modelo são obtidos a partir do ajuste das equações constitutivas aos dados experimentais, e esse ajuste aproxima muitos valores, não fornecendo o valor exato obtido no experimento.

**TABELA 4.2. COMPARAÇÃO ENTRE OS TEORES DE COLOIDE REAIS E OBTIDOS NO AJUSTE DO MODELO PARA OS ENSAIOS COM SOLO-COLOIDE.**

<b>Teor de coloide real (%)</b>	<b>Teor de coloide obtido na aplicação do modelo (%)</b>
26	26,4
38	36,5
43	40,7
47	45,7

A Figura 4.11 apresenta o resultado final da implementação, com os pontos experimentais obtidos nos ensaios edométricos e as curvas geradas pela implementação da equação diferencial do modelo proposto. A equação diferencial é considerada o resultado final do modelo por ser, dentre as três equações gerais propostas, a equação que leva em conta mais variáveis, caracterizando melhor a simulação.



**FIGURA 4.11. RESULTADO DA IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO PROPOSTO PARA OS DADOS DE SOLO-COLOIDE.**

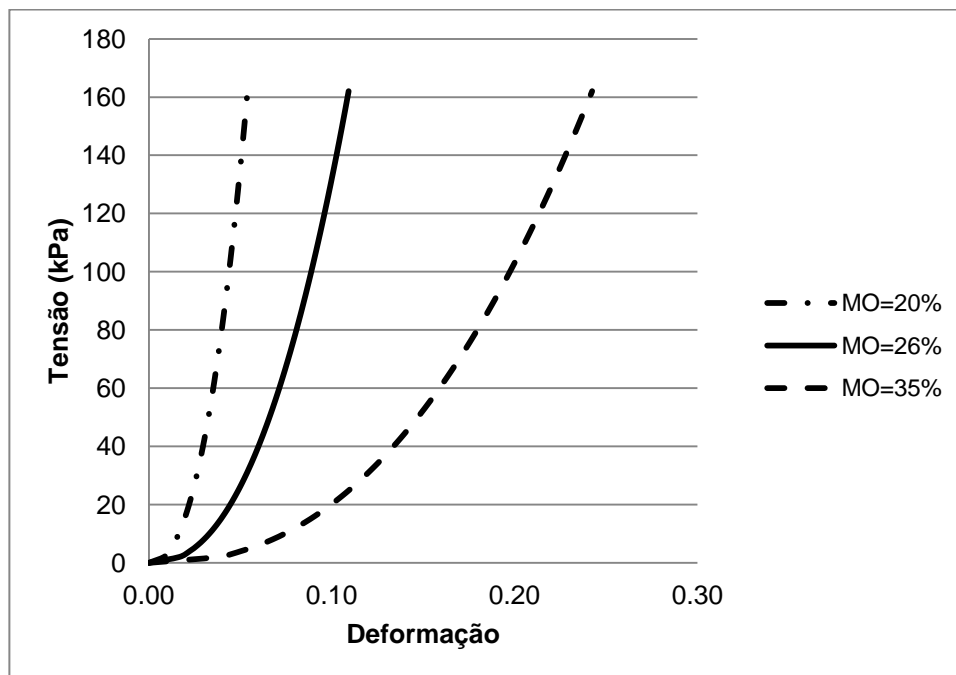
Observando a Figura 4.11, pode-se afirmar que o modelo apresentou um bom ajuste aos dados obtidos com solo-coloide. A proximidade da curva gerada com os dados experimentais mostra que o modelo consegue simular o comportamento mecânico de um corpo de prova de solo-coloide submetido a um ensaio edométrico.

#### 4.4 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO MODELO PROPOSTO

A análise de sensibilidade de um modelo busca entender como e quanto cada parâmetro influencia no seu resultado final. No modelo proposto, essa análise foi feita para seis parâmetros:  $MO$ ,  $a$ ,  $m$ ,  $\Delta\sigma$ ,  $\Delta t_c$  e  $\frac{\partial MO}{\partial t}$ .

A análise da influência do teor de material pastoso,  $MO$ , foi feita a partir da implementação da equação integral do modelo (Equação (4.1)). Foram geradas curvas para três valores diferentes de porcentagem de material pastoso contida no material: 20%, 26% e 35%. A Figura 4.12 apresenta os resultados obtidos nessa simulação.





**FIGURA 4.12. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO MODELO PROPOSTO EM RELAÇÃO AO TEOR DE MATERIAL PASTOSO.**

A Figura 4.12 mostra que o modelo é sensível à variação de MO, apresentando respostas diferentes para diferentes teores de material pastoso contidos nas amostras. As três curvas apresentadas na Figura 4.12 apresentam mudanças na sua concavidade ao longo da aplicação de tensões, tendo todas uma porção inicial quase horizontal, que tende a aumentar sua inclinação ao longo do ensaio até um valor aproximadamente constante. Observou-se que a redução da porcentagem de material pastoso implica em um acentuamento da curva, revelando uma amostra que sofre deformações menores com o aumento da tensão aplicada. Já o aumento de MO resulta em uma curva mais suave, que apresenta maiores deformações em comparação às amostras com menores teores de material pastoso.

A influência dos parâmetros  $a$  e  $m$  foi analisada através da curva gerada pela equação integral do modelo (Equação (4.1)), visto que, junto com o teor de material pastoso, esses são os únicos parâmetros de ajuste dessa equação. Para a análise do parâmetro  $a$  (Figura 4.13), o valor do parâmetro  $m$  foi fixado em 26,2 e os valores de  $a$  foram alterados para 0,43, 0,35 e 0,28. O mesmo foi feito para a análise do parâmetro  $m$  (Figura 4.14): o valor de  $a$  permaneceu fixo em 0,43, enquanto  $m$  variou (8,0; 26,2 e 65,0).

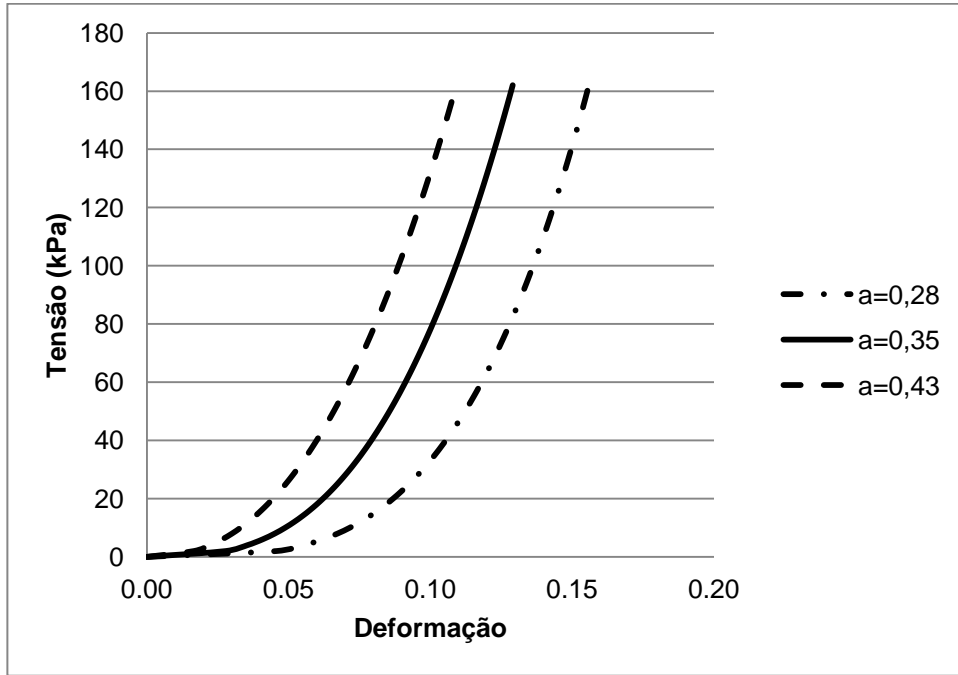


FIGURA 4.13. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO MODELO PROPOSTO EM RELAÇÃO AO PARÂMETRO  $a$ .

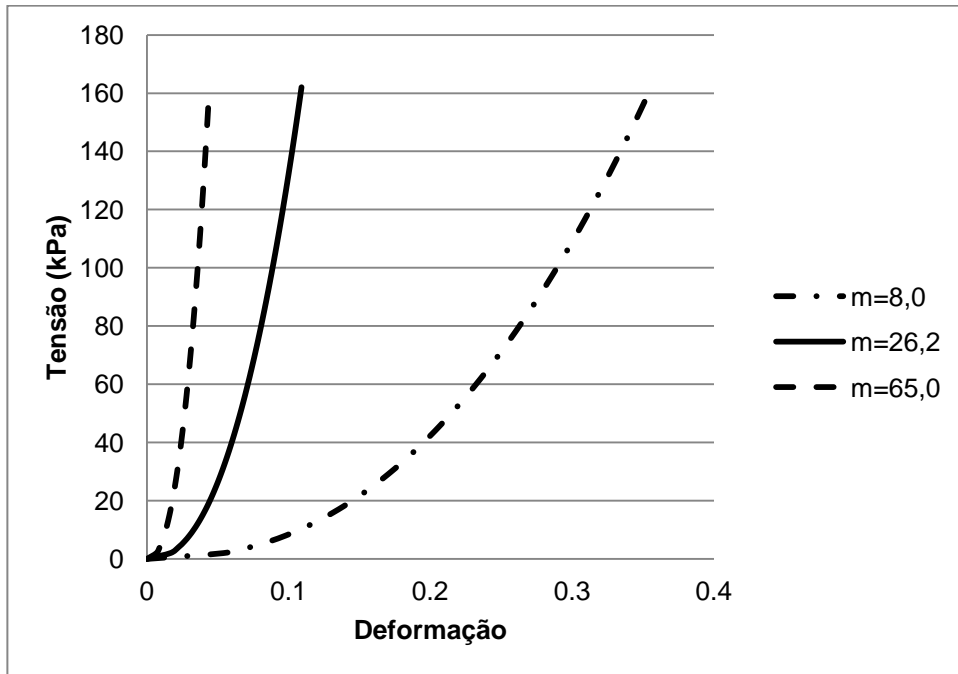


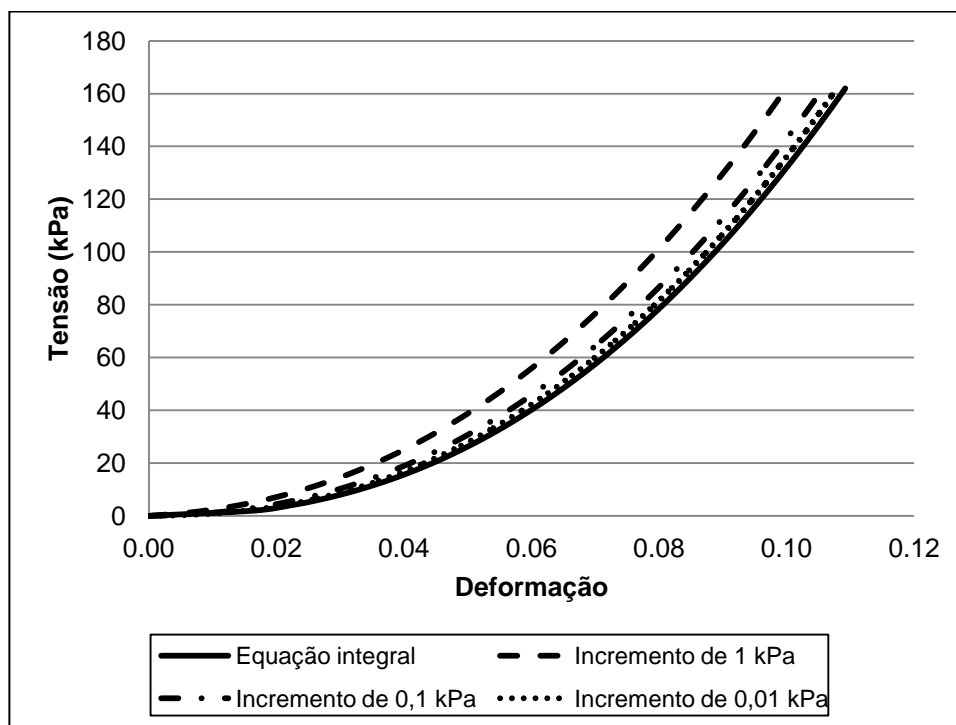
FIGURA 4.14. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO MODELO PROPOSTO EM RELAÇÃO AO PARÂMETRO  $m$ .

A Figura 4.13 mostra que a variação do parâmetro  $a$  desloca a curva gerada horizontalmente. As curvas obtidas mantiveram-se praticamente paralelas, sendo deslocadas para a direita com a diminuição de  $a$  e para a esquerda com o aumento do parâmetro. A observação dessas curvas sugere que materiais que apresentam um maior valor para o parâmetro  $a$  tendem a ser mais resistentes à compressão, sofrendo deformações menores quando comparados a materiais que apresentam menores valores de  $a$ .

Na Figura 4.14 observou-se um comportamento semelhante ao causado pela variação do teor de material pastoso: pôde-se notar que um menor valor de  $m$  faz com que a curva gerada seja mais suave, apresentando maiores deformações, enquanto um maior valor de  $m$  provoca um acentuamento na curva, diminuindo as deformações apresentadas.

Em ambas as figuras é confirmada a relação proposta entre os parâmetros e o teor de material pastoso apresentada pelos RSU: quanto menor o teor de material pastoso, maiores os parâmetros  $a$  e  $m$  e maior é a resistência à compressão apresentada pela amostra.

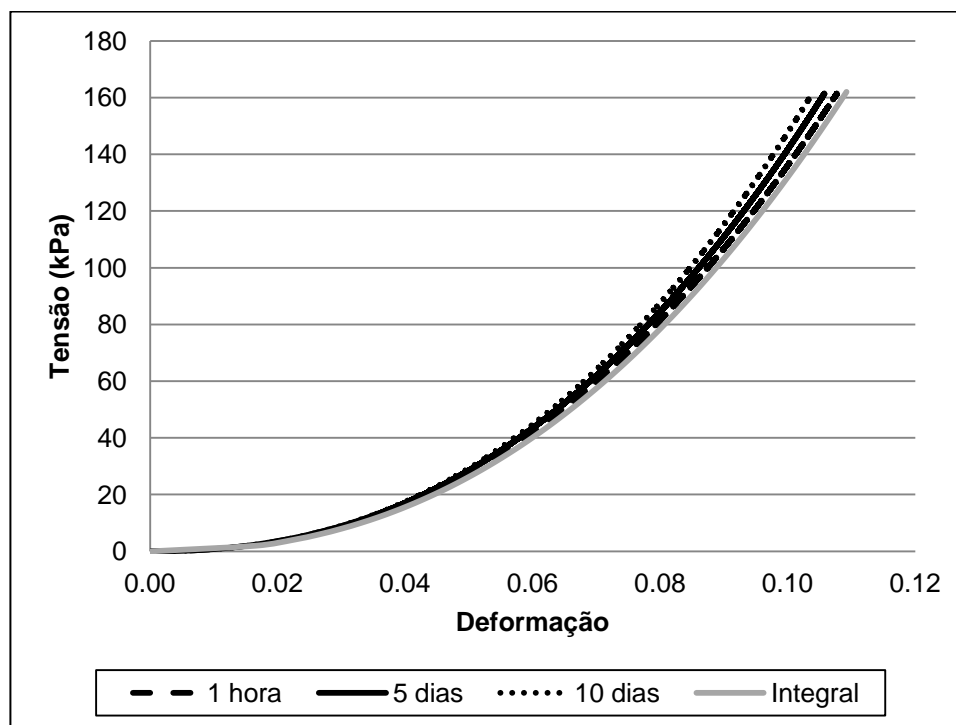
A influência da variação de  $\Delta\sigma$  foi analisada através da curva gerada pela equação incremental do modelo proposto (Equação (4.3)). Para valores fixos de  $a$  e  $m$  foi implementada a curva da equação integral do modelo (Equação (4.1)), e as curvas geradas a partir da equação incremental foram plotadas no mesmo gráfico (Figura 4.15), a fim de permitir a comparação dos resultados.



**FIGURA 4.15. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO MODELO PROPOSTO EM RELAÇÃO AO INCREMENTO DE TENSÃO  $\Delta\sigma$ .**

A partir da Figura 4.15, pôde-se observar que um incremento de tensão suficientemente pequeno é fundamental para que a curva da equação incremental coincida com a curva da equação integral. A figura mostra que, quanto menor o incremento de tensão aplicado, mais próximas as duas curvas ficam.

A análise de sensibilidade do modelo em relação ao incremento de tempo,  $\Delta t_c$ , foi feita a partir da curva gerada pela equação diferencial do modelo (Equação (4.4)), que é a única que considera o tempo na sua formulação. Os valores de  $a$ ,  $m$  e  $\Delta\sigma$  foram fixados e a Equação (4.4) foi implementada de forma que a tensão aplicada no carregamento real fosse alcançada em 1h (como no ensaio), em 5 dias e em 10 dias. A curva de 1h coincide com a curva da equação incremental do modelo e essas curvas não se aproximam mais da curva da equação integral devido ao valor do incremento de carga. A Figura 4.16 apresenta as curvas obtidas juntamente com a curva gerada pela equação integral do modelo.

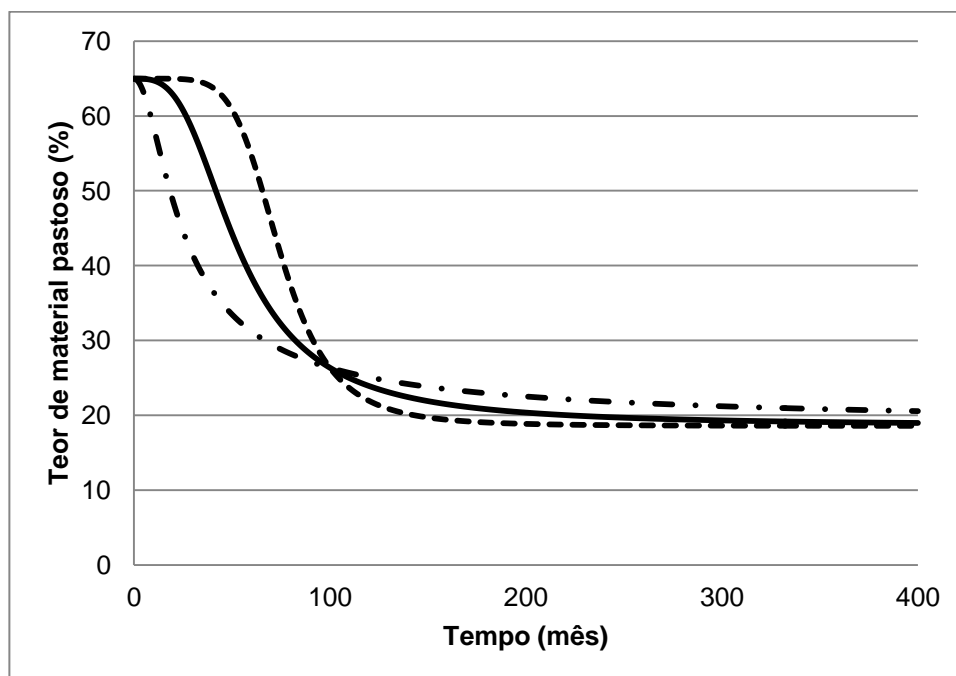


**FIGURA 4.16. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO MODELO PROPOSTO EM RELAÇÃO AO INCREMENTO DE TEMPO  $\Delta t_c$ .**

A partir da Figura 4.16 observa-se que o modelo é sensível à variação dos incrementos de tempo, mas não tanto quanto à variação do teor de material pastoso ou dos parâmetros  $a$  e  $m$ . Os resultados do modelo não se alteraram significativamente com variações de incremento de tempo que resultassem em carregamentos com duração menor que um dia, mas apresentaram variação quando a duração do carregamento foi maior que esse valor. Isso é aceitável quando o ensaio edométrico é realizado com RSU, visto que os incrementos de carga nesses casos são aplicados a intervalos de tempo maiores que os aplicados para o solo-coloide (24h para Babu et al (2010) e Reddy et al (2011), 15 dias para Carvalho (1999)). As implementações anteriores mostram que o melhor valor para o incremento de tempo é obtido quando o tempo levado para chegar à tensão aplicada no corpo de prova é o mesmo tempo de duração do carregamento no ensaio.

A análise da influência da variação da taxa de degradação dos RSU na resposta do modelo proposto foi feita através da curva gerada pela equação diferencial do modelo (Equação (4.4)). Foram propostas três combinações de parâmetros para a equação de decaimento de material pastoso no tempo (Equação (4.11)): uma curva

suave, outra mais acentuada e uma terceira com comportamento intermediário (Figura 4.17). Para as três curvas, o teor de material pastoso obtido no tempo  $t=100$  meses foi de 26,37%. Dessa forma, ficou garantido que os parâmetros  $a$  e  $m$  apresentariam os mesmos valores nas três implementações da equação diferencial. O valor do incremento de tensão também foi mantido igual para as três situações.



**FIGURA 4.17. TRÊS COMPORTAMENTOS DE CURVAS PARA A REDUÇÃO DO TEOR DE MATERIAL PASTOSO EM RSU PARA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO MODELO PROPOSTO EM RELAÇÃO À TAXA DE DEGRADAÇÃO.**

A implementação da equação diferencial do modelo com essas três taxas de degradação do material pastoso resultou em três curvas idênticas, sobrepostas uma à outra. Isso mostra que, apesar da taxa de degradação dos resíduos ser usada na formulação do modelo, sua contribuição no resultado numérico final é tão pequena que se considera que o modelo não é sensível a essa variável.

Essa falta de sensibilidade diferencia o modelo proposto do modelo hiperbólico proposto por Otsuka (2010) e Nocko (2010), que é sensível à taxa de degradação dos resíduos, permitindo estimar a quantidade de gases e líquidos que será gerada pelo aterro devido a esse processo quando acoplado ao modelo proposto por Pinto (2008).

## 4.5 VALIDAÇÃO DO MODELO

A validação de um modelo é essencial, uma vez que confirma a legitimidade da sua aplicação a diversas situações, desde que previstas na construção do modelo. A validação do modelo proposto foi feita com dados de curvas tensão x deformação encontradas na literatura. Essas curvas foram geradas a partir de ensaios edométricos realizados com RSU de diferentes origens. Os trabalhos com cujos dados o modelo foi calibrado foram escolhidos por apresentarem não só as curvas tensão x deformação, mas também algumas características dos resíduos ensaiados, de forma a permitir uma melhor análise dos resultados obtidos.

### 4.5.1 Validação com dados de Reddy et al (2011)

Os dados de Reddy et al (2011) foram obtidos a partir de ensaios edométricos realizados com RSU sintéticos, produzidos para serem representativos dos RSU gerados nos Estados Unidos. Os resíduos foram colocados em quatro bioreatores idênticos (R1, R2, R3 e R4) com recirculação de chorume para sofrerem degradação. Cada reator operou durante um intervalo de tempo diferente, fornecendo amostras de resíduos em diferentes estágios de degradação.

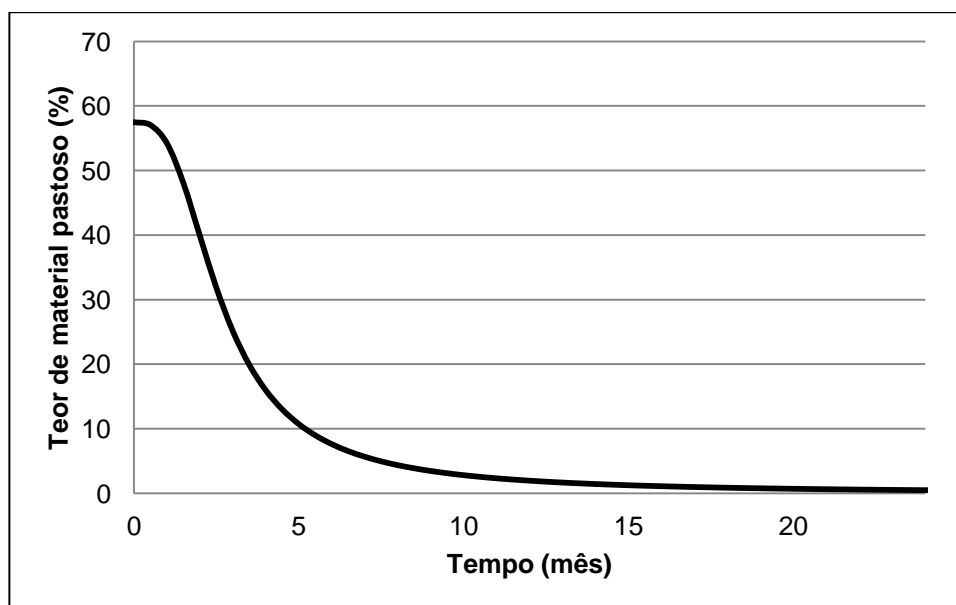
Cada amostra retirada dos bioreatores foi submetida a uma análise para quantificar a matéria orgânica presente. O teor de matéria orgânica do resíduo fresco é de 57,7% e toda essa matéria foi considerada biodegradável. Como o resíduo foi produzido, componentes como solo de cobertura e outros de difícil identificação não são encontrados. Assim, o teor de material pastoso foi considerado igual ao teor de matéria orgânica.

Os ensaios edométricos foram realizados com resíduos frescos e com resíduos oriundos de três bioreatores (R2, R3, e R4). Os dados da amostra retirada do bioreator R1 foram desconsiderados por apresentarem um teor de material pastoso muito próximo ao teor da amostra retirada de R2, e um comportamento quase idêntico ao da amostra composta por resíduos frescos, sugerindo algum erro nos dados ou na realização do ensaio.

Como não foi informado o tempo de cada amostra no bioreator, somente o teor de material pastoso (matéria orgânica), o tempo para completa degradação do resíduo foi estipulado como sendo de aproximadamente 1,5 anos. Assim, a equação de redução do teor de material pastoso (Equação (4.13)) foi ajustada com os parâmetros apresentados na Tabela 4.3. Seu comportamento é mostrado na Figura 4.18.

**TABELA 4.3. VALORES UTILIZADOS PARA OS PARÂMETROS DA EQUAÇÃO (4.13) NA SIMULAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DOS RSU ENSAIADOS POR REDDY ET AL (2011).**

$MO_0$	57,5%
$MO_{res}$	0,00%
$\alpha_{MO}$	0,45
$n_{MO}$	3,0
$m_{MO}$	0,667



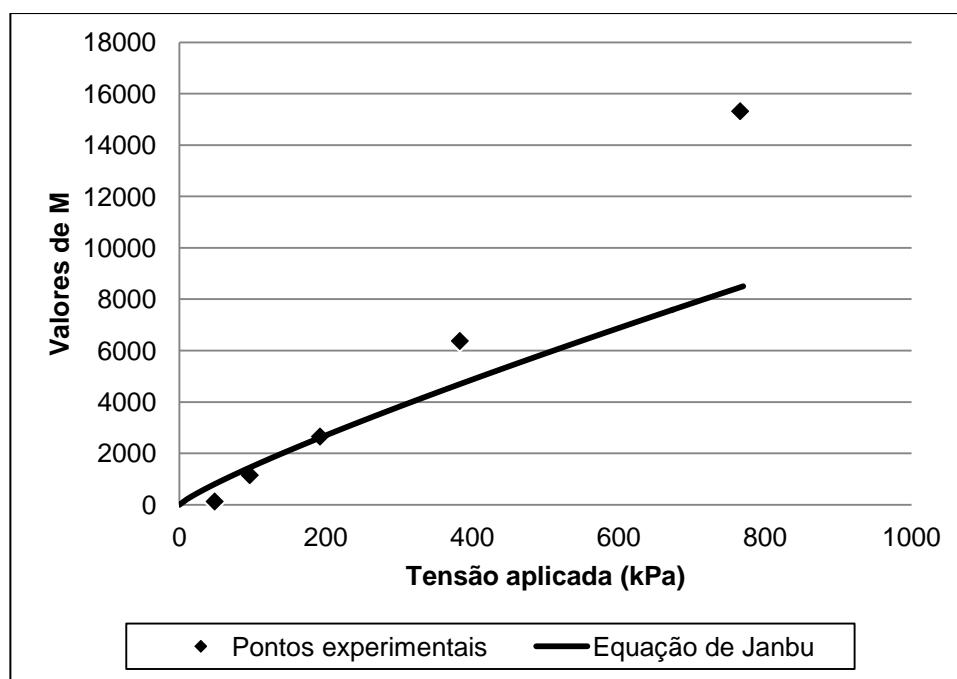
**FIGURA 4.18. DECAIMENTO DO TEOR DE MATERIAL PASTOSO AO LONGO DO TEMPO UTILIZADO PARA SIMULAR O COMPORTAMENTO MECÂNICO DOS RSU ENSAIADOS POR REDDY ET AL (2011).**

Sabendo que a resistência do coloide utilizado na componente experimental poderia não ser a mesma do material pastoso contido nos RSU, as equações constitutivas dos parâmetros  $a$  e  $m$  foram recalibradas com os dados de Reddy et al (2011). Para isso, o decaimento das Equações (3.4) e (3.6) foi mantido e as únicas



variáveis de ajuste reavaliadas foram os valores inicial e residual de  $a$  e  $m$ . Como foram selecionadas quatro curvas tensão x deformação (resíduo fresco, R2, R3 e R4) de Reddy et al (2011), as duas curvas com maior e menor teor de material pastoso apresentadas (respectivamente resíduo fresco e R4) foram utilizadas para recalibração dos valores de  $a$  e  $m$  e as outras duas foram utilizadas para validação do modelo.

Os valores de  $a_0$ ,  $a_{res}$ ,  $m_0$  e  $m_{res}$  foram obtidos da mesma forma que os valores de  $a$  e  $m$  nos ensaios com solo-coloide: ajustando-se a equação de  $M$  aos pontos obtidos para  $M$  x tensão aplicada (Figuras 4.19 e 4.20 e Tabela 4.4). No ajuste da equação de  $M$  aos pontos experimentais do resíduo fresco (Figura 4.19) foi preferível ajustar a curva aos pontos iniciais da curva, uma vez que, como visto anteriormente para os dados do solo-coloide, esse é o trecho da curva de maior coincidência entre os valores dos pontos experimentais e da equação de  $M$ .



**FIGURA 4.19. VALORES DO MÓDULO TANGENTE  $M$  OBTIDOS PARA O RESÍDUO FRESCO A PARTIR DOS DADOS DE REDDY ET AL (2011).**

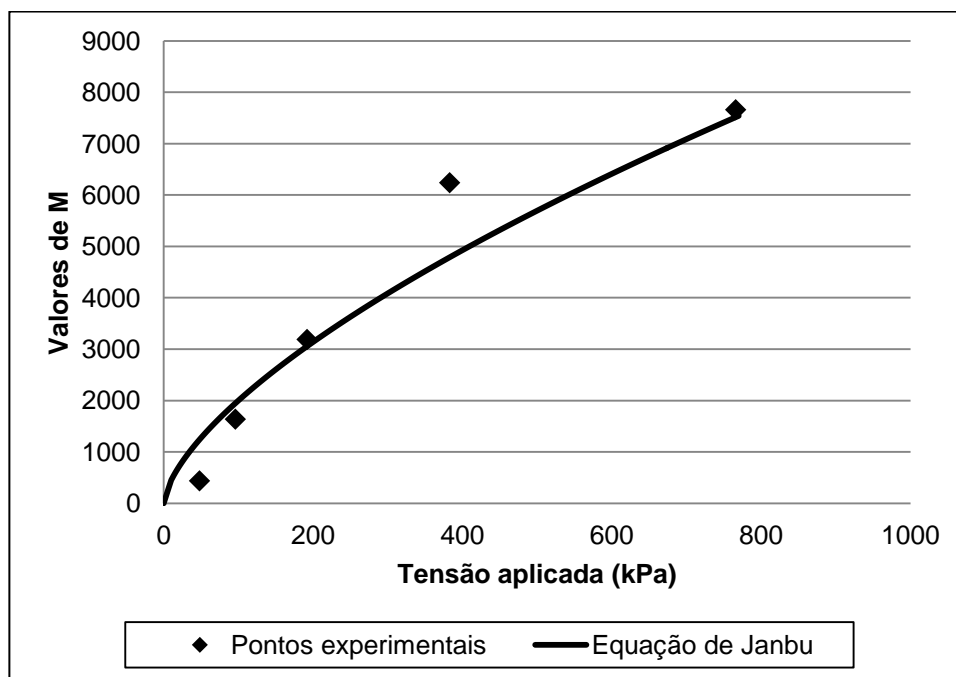


FIGURA 4.20. VALORES DO MÓDULO TANGENTE  $M$  OBTIDOS PARA O RESÍDUO DO BIOREATOR R4 A PARTIR DOS DADOS DE REDDY ET AL (2011).

TABELA 4.4. VALORES DOS PARÂMETROS  $a$  E  $m$  OBTIDOS NO AJUSTE DA EQUAÇÃO DE  $M$  AOS DADOS DE REDDY ET AL (2011).

Amostra	Teor de material pastoso (%)	Parâmetro $m$	Parâmetro $a$
Resíduo fresco	57,5	11,78	0,195
R4	15,5	21,96	0,269

Mantendo os valores obtidos inicialmente para os outros parâmetros das Equações (3.4) e (3.6) e substituindo os valores de  $a_0$ ,  $a_{res}$ ,  $m_0$  e  $m_{res}$ , as curvas das equações que descrevem  $a$  e  $m$  passaram a comportar-se como apresentado nas Figuras 4.21 e 4.22, respectivamente. Os valores de todos os parâmetros utilizados, inclusive dos que não foram alterados, estão apresentados na Tabela 4.5.

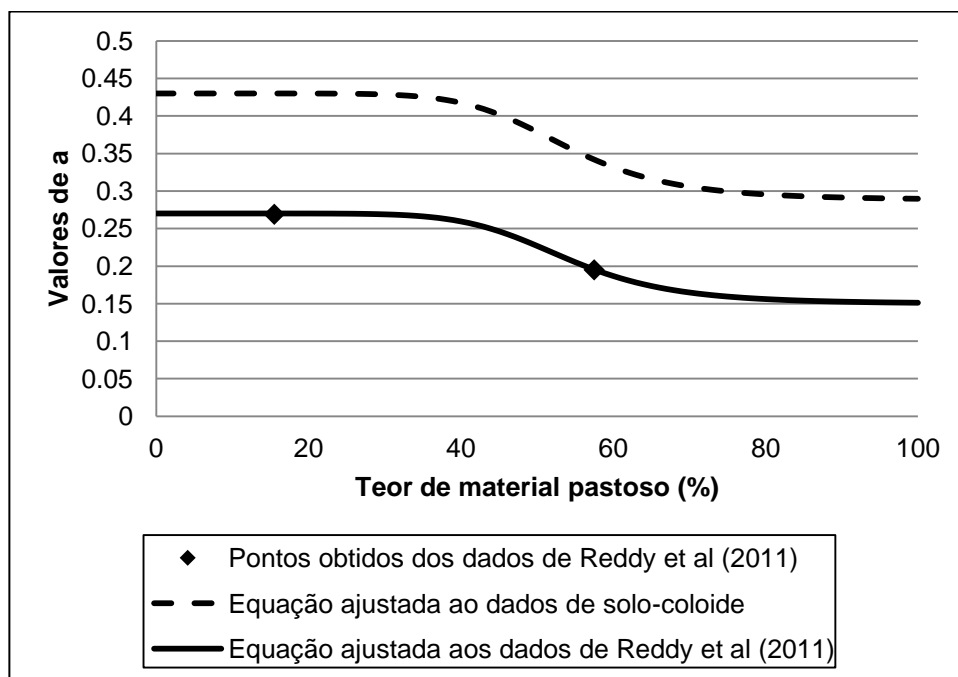


FIGURA 4.21. COMPORTAMENTO DA EQUAÇÃO CONSTITUTIVA DE  $a$  (EQUAÇÃO (3.4)) COM OS PARÂMETROS  $a_0$  E  $a_{RES}$  AJUSTADOS AOS DADOS DE REDDY ET AL (2011).

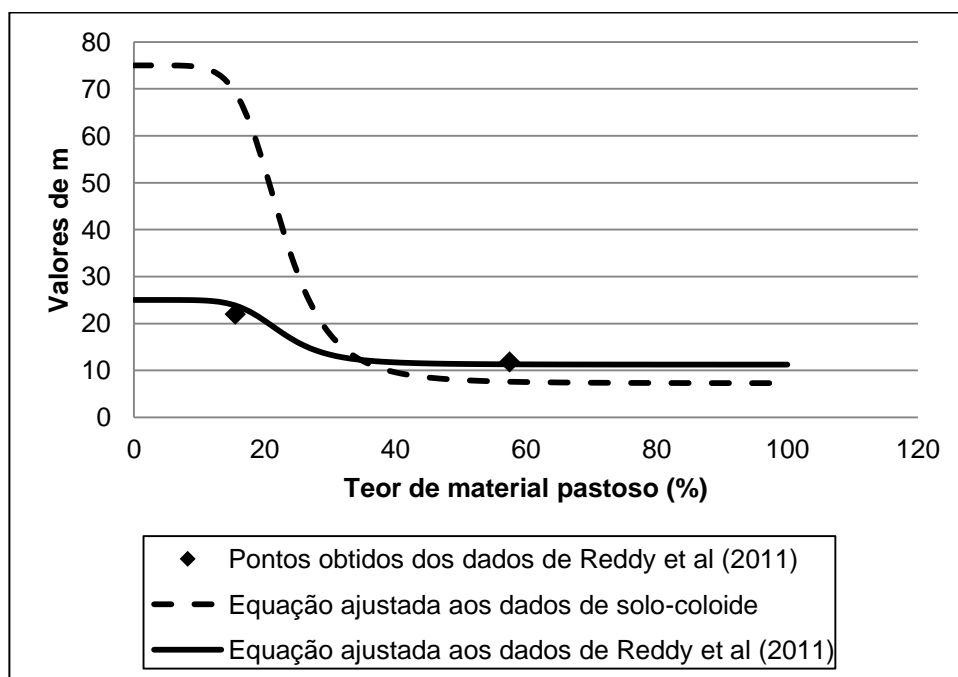


FIGURA 4.22. COMPORTAMENTO DA EQUAÇÃO CONSTITUTIVA DE  $m$  (EQUAÇÃO (3.6)) COM OS PARÂMETROS  $m_0$  E  $m_{RES}$  AJUSTADOS AOS DADOS DE REDDY ET AL (2011).

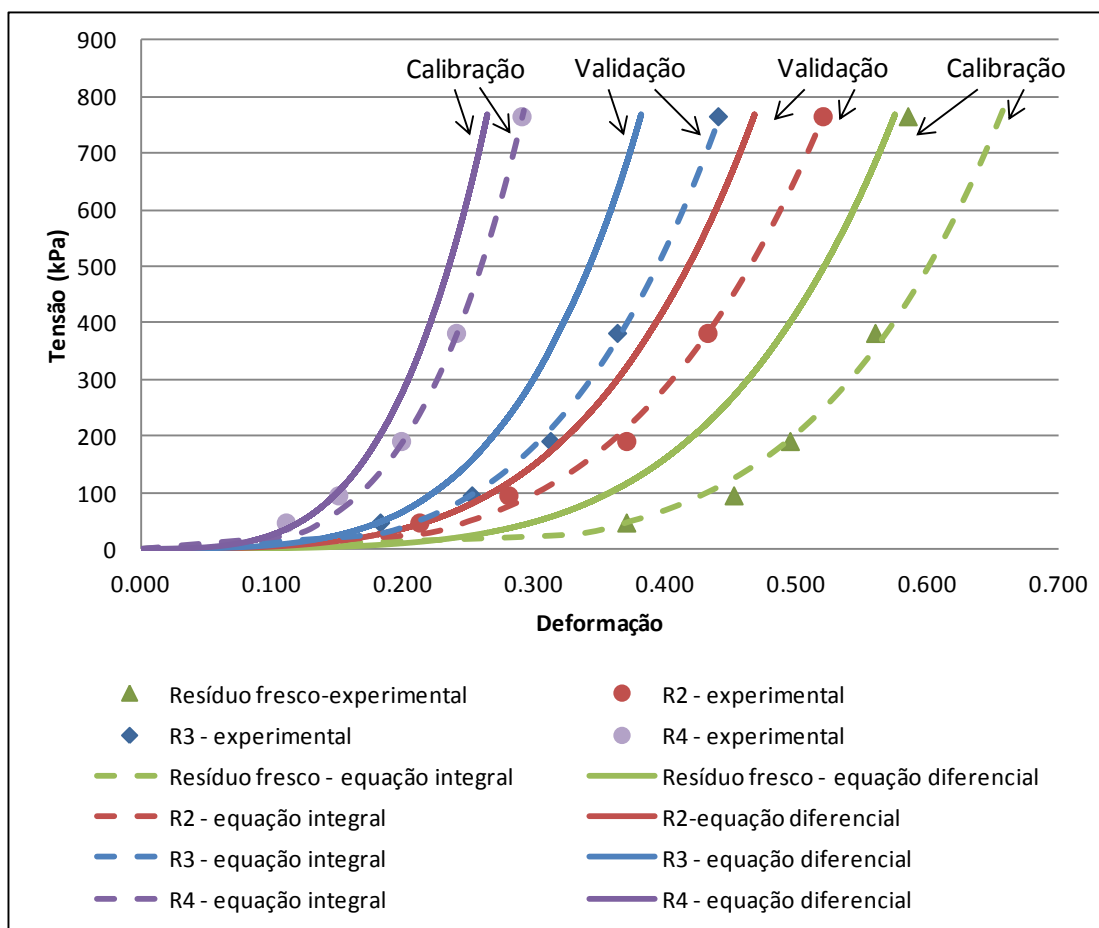
**TABELA 4.5. VALORES OBTIDOS PARA OS PARÂMETROS DAS EQUAÇÕES (3.4) E (3.6) APÓS AJUSTE AOS DADOS DE REDDY ET AL (2011).**

$a_0$	0,27	$m_0$	25
$a_{res}$	0,15	$m_{res}$	11,2
$L_a$	0,019	$L_m$	0,046
$u_a$	8,0	$u_m$	6,5
$v_a$	0,875	$v_m$	0,846

A recalibração dos parâmetros das Equações (3.4) e (3.6) revelou um deslocamento para baixo da curva que descreve o parâmetro  $a$  e uma diminuição da amplitude da equação que descreve o parâmetro  $m$ , com a diminuição de  $m_0$  e ligeiro aumento de  $m_{res}$ .

Após redefinir os parâmetros das equações constitutivas de  $a$  e  $m$ , o modelo proposto foi implementado para as quatro curvas de Reddy et al (2011) da mesma forma que foi implementado para os dados de solo-coloide. A Figura 4.23 apresenta o resultado final da implementação, com os pontos experimentais e as curvas geradas pela implementação das equações integral e diferencial do modelo proposto. A Figura 4.23 também mostra quais curvas foram utilizadas para a recalibração dos parâmetros  $a$  e  $m$  e quais foram utilizadas somente para a validação do modelo.

Assim como na implementação do modelo com os dados de solo-coloide, na validação com os dados de Reddy et al (2011) as células disponibilizadas pelo Excel também foram insuficientes para aplicar um incremento de tensão suficientemente pequeno para que as curvas das três equações gerais coincidissem. Comparando as curvas das equações integral e diferencial apresentadas na Figura 4.23, observa-se que, se o incremento de tensão aplicado fosse suficientemente pequeno, a curva gerada pela equação diferencial se aproximaria da curva integral, melhorando o resultado final da implementação.



**FIGURA 4.23. RESULTADO DA IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO PROPOSTO PARA OS DADOS DE REDDY ET AL (2011).**

A Tabela 4.6 apresenta os teores de material pastoso fornecidos por Reddy et al (2011) e os teores obtidos na implementação do modelo. Observa-se que os teores obtidos não são idênticos aos fornecidos pelos autores. No entanto, a maior diferença obtida, no resíduo do bioreator R2, é de 5,2%, o que é um erro aceitável, consideradas a dificuldade de caracterização de alguns materiais e a heterogeneidade dos resíduos.

**TABELA 4.6. COMPARAÇÃO ENTRE OS TEORES DE MATERIAL PASTOSO FORNECIDOS POR REDDY ET AL (2011) E OS OBTIDOS NA IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO PROPOSTO.**

Amostra	Teor de material pastoso fornecido por Reddy et al (2011) (%)	Teor de material pastoso obtido na implementação do modelo (%)
RSU fresco	57,5	55,1
R2	38,9	33,7
R3	28,6	27,3
R4	15,5	18,4

Assim, apesar da falta de uma ferramenta apropriada para implementação, o modelo mostrou-se satisfatório na previsão do comportamento mecânico dos RSU apresentados por Reddy et al (2011), abrangendo resíduos de diversos teores de material pastoso e apresentando boa adequação aos pontos experimentais.

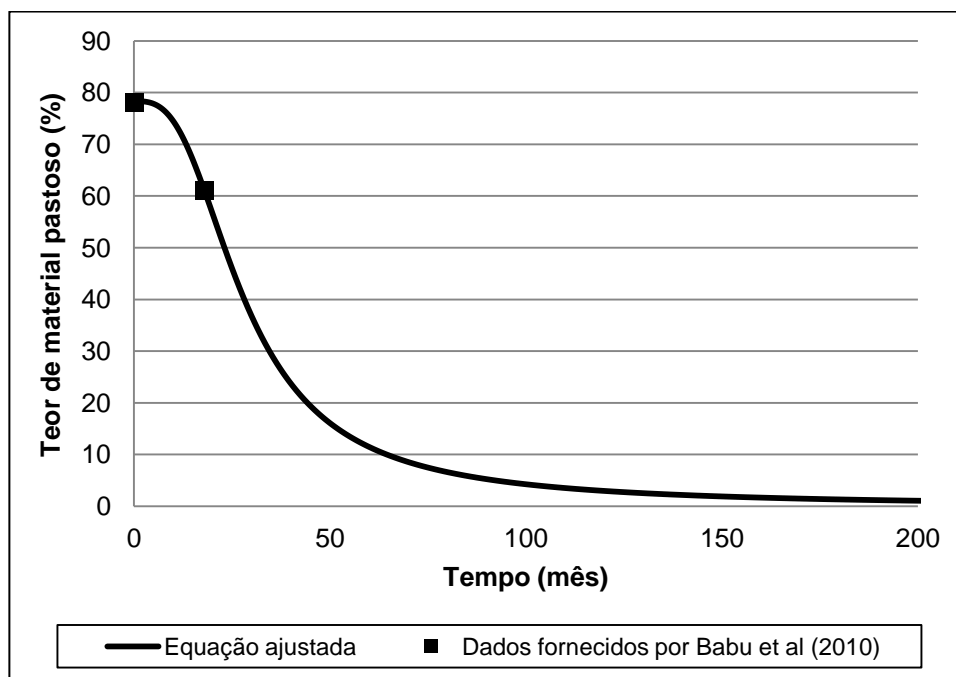
#### 4.5.2 Validação com dados de Babu et al (2010)

Os dados de Babu et al (2010) foram obtidos a partir de ensaios edométricos realizados com RSU coletados no aterro de Orchard Hills (Estados Unidos). Duas amostras de resíduos foram submetidas a ensaios: uma de resíduos frescos, coletados no momento da sua deposição no aterro, e outra de resíduos aterrados, coletados através de uma perfuração a uma profundidade de 20m. Baseados nos registros de preenchimento do aterro, os resíduos aterrados tinham sido depositados no aterro há aproximadamente 1,5 anos. Ambas as amostras ensaiadas eram compostas por RSU triturados, para permitir a realização do ensaio em pequenas dimensões (anel de adensamento com 63mm de diâmetro interno e 27mm de altura). Foi considerado que a fração pastosa dos resíduos ensaiados por Babu et al (2010) era composta somente por matéria orgânica, devido à composição dos resíduos apresentada.

Como os autores forneceram os teores de matéria orgânica (material pastoso) e a idade dos resíduos ensaiados (Tabela 4.7), foi possível estimar a curva de degradação desse material de forma mais acurada. Assim, a Equação (4.13) (redução do teor de material pastoso no tempo) foi ajustada aos dados da Tabela 4.7, resultando na curva apresentada na Figura 4.24. A Tabela 4.8 apresenta os valores obtidos para os parâmetros da Equação (4.13). O tempo para degradação completa da matéria orgânica foi estimado como sendo de aproximadamente 15 anos.

**TABELA 4.7. TEMPO DE ATERRAMENTO E TEOR DE MATERIAL PASTOSO DAS AMOSTRAS DE RSU ENSAIADAS POR BABU ET AL (2010).**

<b>Amostra</b>	<b>Tempo de aterramento (ano)</b>	<b>Teor de material pastoso (%)</b>
RSU fresco	0	78
RSU aterrado	1,5	61



**FIGURA 4.24. DECAIMENTO DO TEOR DE MATERIAL PASTOSO AO LONGO DO TEMPO COM BASE NOS DADOS FORNACIDOS POR BABU ET AL (2010).**

**TABELA 4.8. VALORES UTILIZADOS PARA OS PARÂMETROS DA EQUAÇÃO (4.13) NA SIMULAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DOS RSU ENSAIADOS POR BABU ET AL (2010).**

$MO_0$	78,33%
$MO_{res}$	0%
$\alpha_{MO}$	0,0427
$n_{MO}$	3,00
$m_{MO}$	0,6667

Uma vez que o solo-coloide e o RSU sintético apresentaram diferenças nas magnitudes dos seus resultados, fornecendo diferentes valores para os parâmetros de ajuste das equações constitutivas de  $a$  e  $m$ , o RSU real também poderia apresentar resultados com magnitudes características. Assim, o ideal seria fazer uma calibração dos valores de  $a_0$ ,  $a_{res}$ ,  $m_0$  e  $m_{res}$ , como foi feito com os dados de Reddy et al (2011). Como Babu et al (2010) só apresentaram duas curvas tensão x deformação para os RSU do aterro de Orchard Hills, uma curva foi utilizada para calibração (RSU fresco) e outra para validação do modelo (RSU aterrado). A calibração foi feita através do ajuste da equação de  $M$  aos dados de  $M$  x tensão aplicada obtidos (Figura 4.25), assim como

foi feito com o solo-coloide e o resíduo sintético de Reddy et al (2011). As Figuras 4.26 e 4.27 apresentam as curvas geradas a partir do ajuste das equações constitutivas de  $a$  e  $m$ , respectivamente, aos dados de Babu et al (2010) e a Tabela 4.9 apresenta os valores dos parâmetros obtidos.

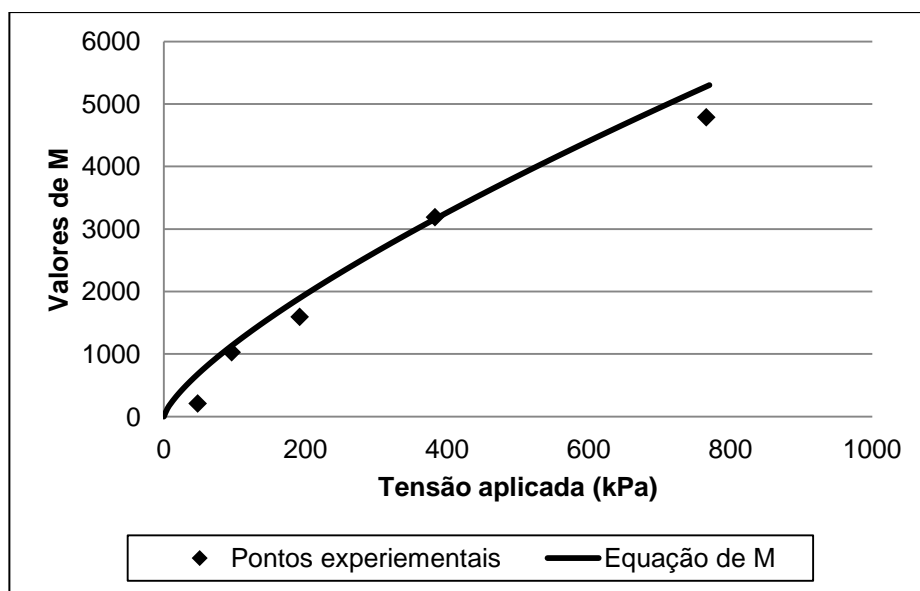


FIGURA 4.25. VALORES DO MÓDULO TANGENTE  $M$  OBTIDOS PARA O RESÍDUO FRESCO A PARTIR DOS DADOS DE BABU ET AL (2010).

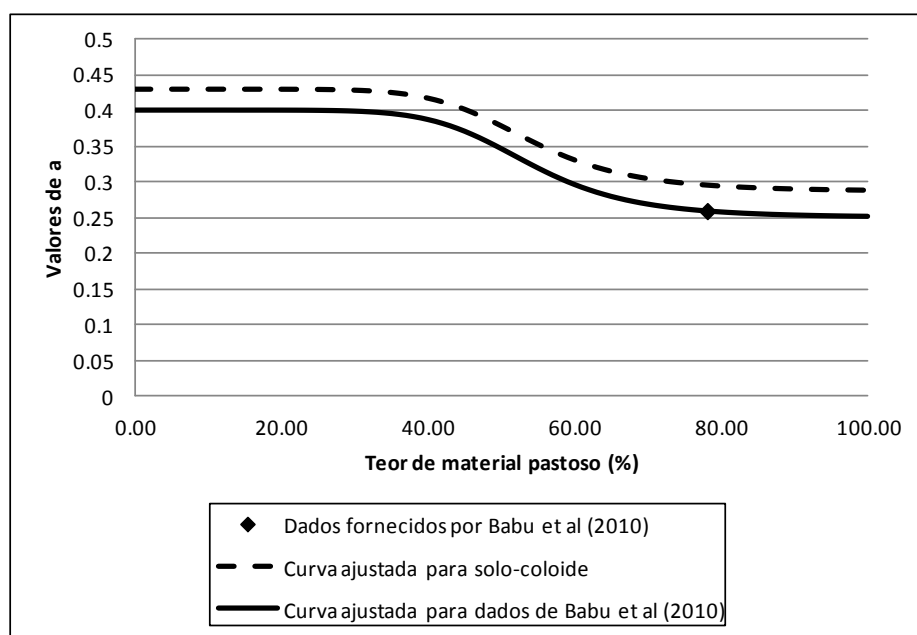


FIGURA 4.26. AJUSTE DA EQUAÇÃO CONSTITUTIVA DE  $a$  (EQUAÇÃO (3.4)) AOS DADOS OBTIDOS DE BABU ET AL (2010).



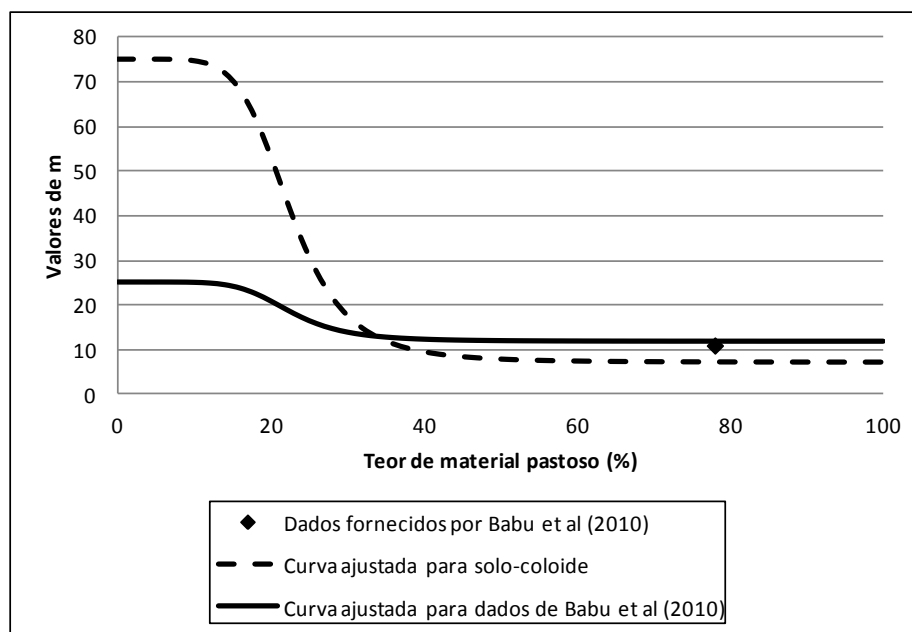


FIGURA 4.27. AJUSTE DA EQUAÇÃO CONSTITUTIVA DE  $m$  (EQUAÇÃO (3.6)) AOS DADOS OBTIDOS DE BABU ET AL (2010).

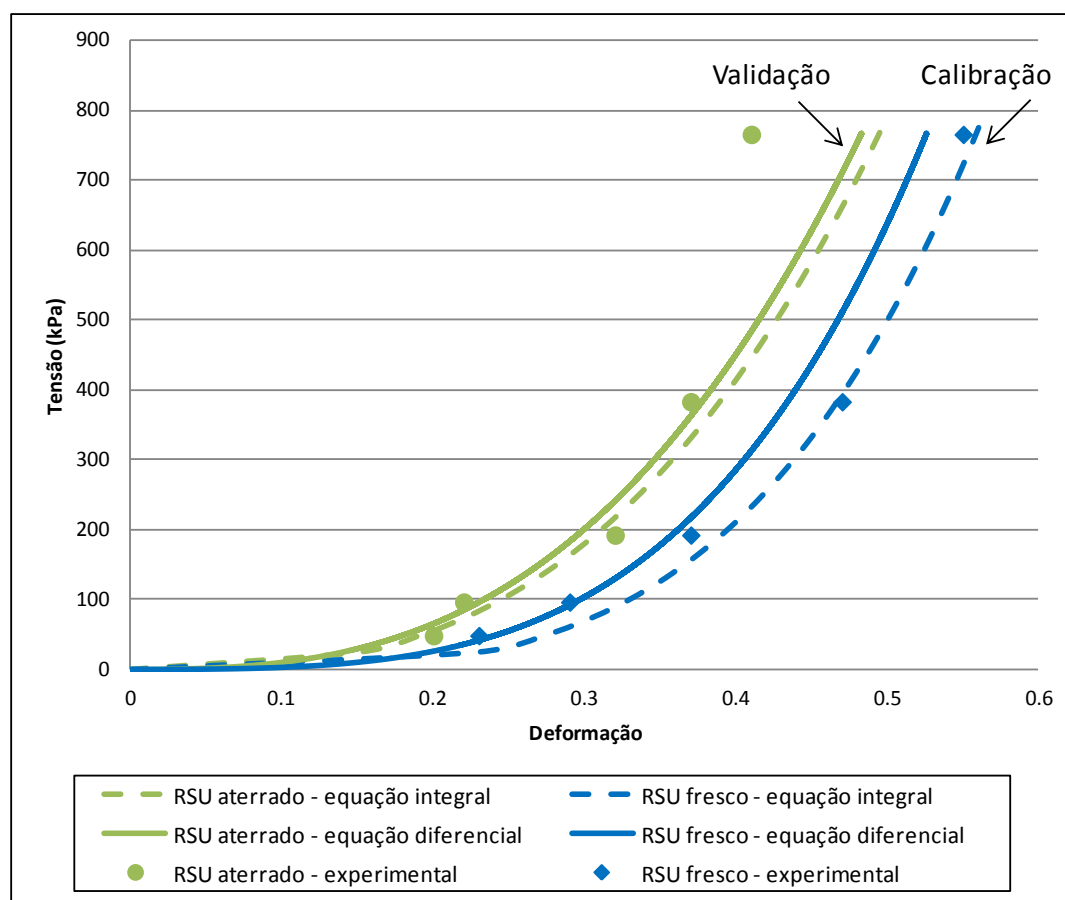
TABELA 4.9. VALORES OBTIDOS PARA OS PARÂMETROS DAS EQUAÇÕES (3.4) E (3.6) APÓS AJUSTE AOS DADOS DE BABU ET AL (2010).

$a_0$	0,40	$m_0$	25
$a_{res}$	0,25	$m_{res}$	11,7
$L_a$	0,019	$L_m$	0,046
$u_a$	8,0	$u_m$	6,5
$v_a$	0,875	$v_m$	0,846

Por falta de mais dados para calibração, o valor de  $m_0$  para os dados de Babu et al (2010) foi mantido igual ao obtido na calibração dos dados de Reddy et al (2011). Isso porque o valor de  $m_{res}$  obtido para os dois casos foi muito próximo, sugerindo um comportamento semelhante das duas curvas. Assim, a curva obtida para a variação de  $m$  com os dados de Babu et al (2010) ficou muito parecida com a curva obtida com os dados de Reddy et al (2011), sendo ambas variações de menor amplitude da equação proposta para a variação do  $m$  para o solo-coloide.

O valor de  $a_0$  foi arbitrado de forma a manter a curva obtida para os dados de Babu et al (2010) paralela à curva obtida para o solo-coloide, seguindo a tendência observada com a curva obtida para os dados de Reddy et al (2011).

Após a definição dos valores dos parâmetros necessários, o modelo proposto foi implementado com os dados de Babu et al (2010). A Figura 4.28 apresenta o resultado da implementação do modelo. No gráfico são mostrados os dados experimentais e as curvas geradas a partir da implementação das equações integral e diferencial do modelo. Assim como nas implementações anteriores, as células disponibilizadas pelo Excel foram insuficientes para aplicar um incremento de tensão suficientemente pequeno, resultando na não coincidência das curvas geradas. Da mesma forma que nas outras implementações, se o incremento de tensão fosse suficientemente pequeno a curva da equação diferencial se aproximaria da curva da equação integral, melhorando o resultado final da implementação.



**FIGURA 4.28. RESULTADO DA IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO PROPOSTO PARA OS DADOS DE BABU ET AL (2010).**

Na Tabela 4.10 são apresentados os valores de teor de material pastoso apresentados pelos autores e obtidos na implementação do modelo proposto.

**TABELA 4.10. COMPARAÇÃO ENTRE OS TEORES DE MATERIAL PASTOSO FORNECIDOS POR BABU ET AL (2010) E OS OBTIDOS NA IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO PROPOSTO.**

<b>Amostra</b>	<b>Teor de material pastoso fornecido por Babu et al (2010) (%)</b>	<b>Teor de material pastoso obtido na implementação do modelo (%)</b>
RSU fresco	78	78,3
RSU aterrado	61	50,2

A diferença entre os teores do RSU aterrado ocorreu, provavelmente, devido à falta de mais dados para calibração das equações de  $a$  e  $m$ , visto que para os dados de Babu et al (2010) somente uma curva foi usada para recalibração desses parâmetros. Isso mostra que o modelo é capaz de prever o comportamento mecânico dos RSU, mas que para maior precisão dos dados finais torna-se necessária uma calibração de  $a$  e  $m$  com ao menos duas curvas tensão x deformação com diferentes teores de material pastoso.

No entanto, apesar da diferença observada entre os teores ser próxima de 10%, essa diferença ainda é aceitável. Isso porque os RSU são um material heterogêneo e de difícil caracterização, principalmente em estágios mais avançados de degradação. Além disso, é difícil garantir que o corpo de prova montado apresente o mesmo teor de material pastoso que a amostra coletada e caracterizada, devido ao processo de trituração e moldagem do material, além do seu manuseio.

Assim, o modelo proposto mostrou-se satisfatório para prever o comportamento mecânico dos RSU apresentados por Babu et al (2010), sendo capaz de abranger amostras com diferentes características.

#### 4.6 DISCUSSÃO SOBRE OS VALORES DOS PARÂMETROS $a$ E $m$

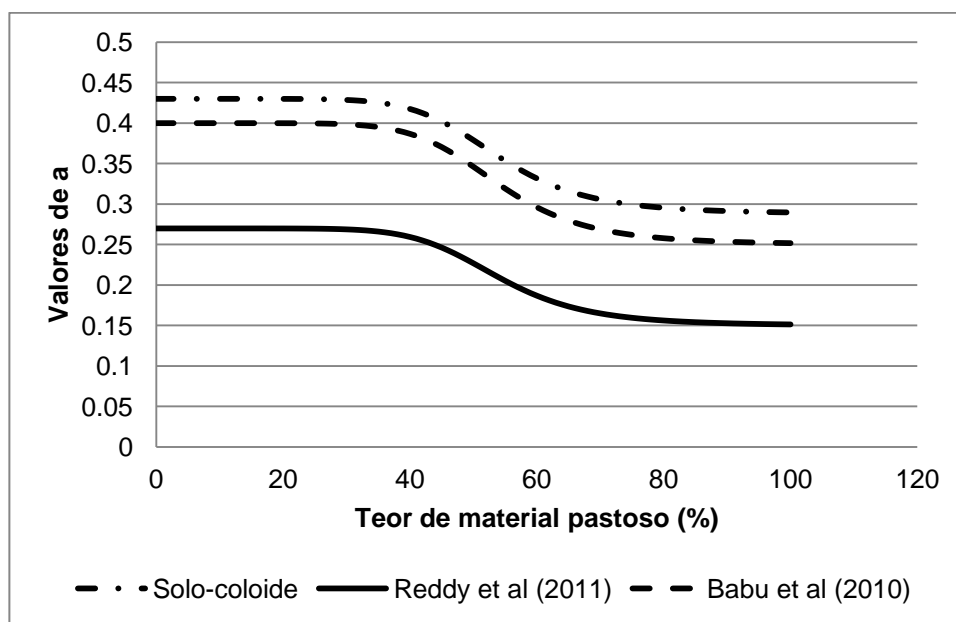
Como observado na implementação e validação do modelo proposto, para cada material simulado foi feita uma calibração dos parâmetros  $a$  e  $m$ . Esses parâmetros descrevem a variação do módulo tangente conforme uma tensão é aplicada no corpo de prova, influenciando diretamente o comportamento da curva tensão x deformação

implementada. Assim, a fim de se obter uma implementação condizente com os dados experimentais, esses parâmetros devem ser capazes de representar materiais com diferentes características.

Mesmo para os solos, que têm propriedades mais bem definidas que os RSU, esses parâmetros encontram-se em faixas de valores pré-estabelecidas a partir de inúmeros dados experimentais (Figuras 4.3 e 4.4) (JANBU, 1967). O que se buscou fazer com a recalibração das equações de  $a$  e  $m$  foi sugerir, a partir dos dados experimentais utilizados, faixas de valores aceitáveis para esses parâmetros quando o material em questão são os RSU.

A Figura 4.29 mostra as três curvas de variação do parâmetro  $a$  obtidas neste trabalho. Todas as curvas apresentam um decaimento do valor de  $a$  com o aumento do teor de material pastoso, sendo paralelas entre si. Observa-se que esse decaimento ocorre principalmente entre os teores de 40% e 70% de material pastoso, sugerindo que nessa faixa ocorre uma transição das propriedades do resíduo, deixando de ter as características do solo e passando a ter as características do coloide.

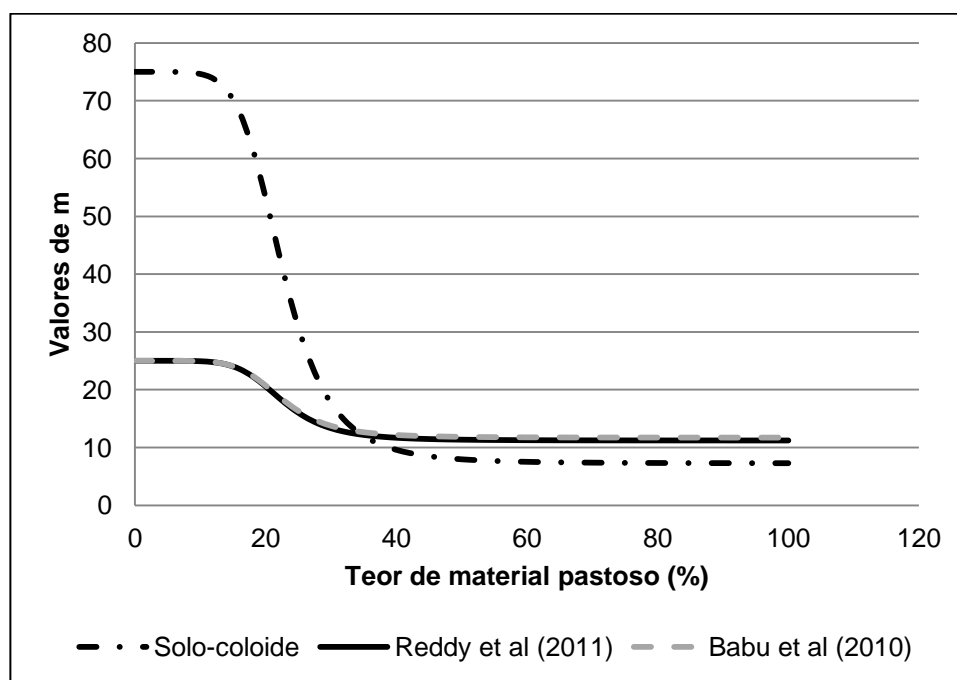
Segundo Janbu (1967), solos que apresentam valores de  $a$  entre 0 e 0,5 possuem comportamento entre plástico e elasto-plástico, o que pode-se verificar no comportamento mecânico dos RSU.



**FIGURA 4.29. CURVAS DE VARIAÇÃO DO PARÂMETRO  $a$  OBTIDAS COM SOLO-COLOIDE, DADOS DE REDDY ET AL (2011) E DADOS DE BABU ET AL (2010).**

A Figura 4.30 mostra as três curvas de variação do parâmetro  $m$  obtidas neste trabalho. Da mesma forma que as curvas de  $a$ , todas as curvas obtidas para  $m$  apresentam um decaimento no valor do parâmetro com o aumento do teor de material pastoso, que ocorre principalmente entre os teores de 15% e 30%. Entretanto, diferentemente das curvas de  $a$ , as curvas de  $m$  não são paralelas entre si: elas apresentam um valor residual muito próximo e diferem no seu valor inicial.

Janbu (1967), analisando o comportamento do módulo  $M$  para solos, sugeriu valores de  $m$  que iam de 5 a mais de 1000, mas observou que, para areias e siltes, um aumento na quantidade de matéria orgânica presente no solo resultava em uma redução dos valores de  $m$ .



**FIGURA 4.30. CURVAS DE VARIAÇÃO DO PARÂMETRO  $m$  OBTIDAS COM SOLO-COLOIDE, DADOS DE REDDY ET AL (2011) E DADOS DE BABU ET AL (2010).**

Assim, com base nas curvas das Figuras 4.29 e 4.30 e objetivando sugerir faixas de valores para  $a$  e  $m$  quando o material estudado for os RSU, foram propostas as Figuras 4.31 e 4.32.

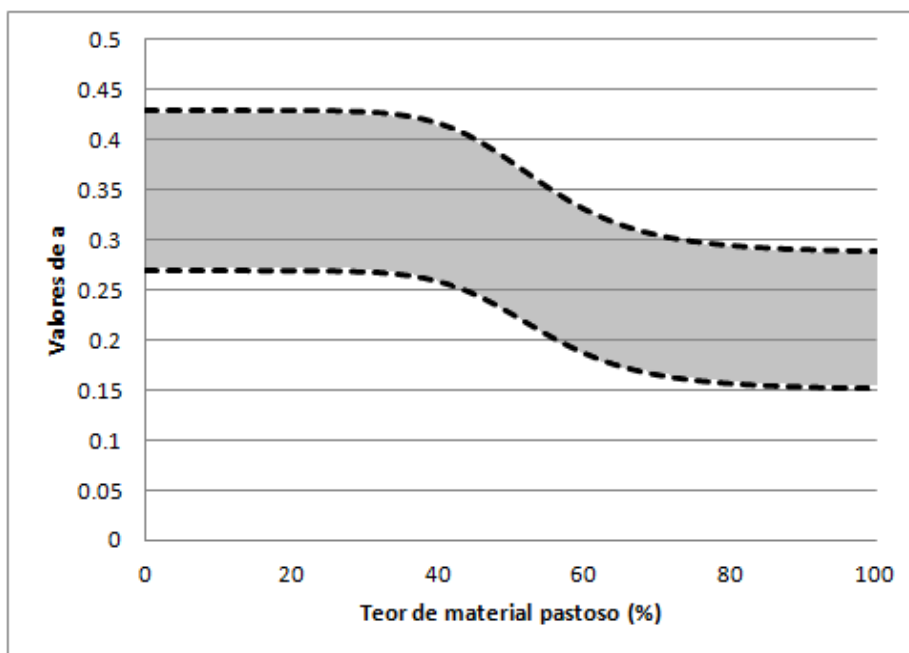


FIGURA 4.31. FAIXA DE VALORES SUGERIDA PARA O PARÂMETRO  $a$  NO ESTUDO DE RSU.

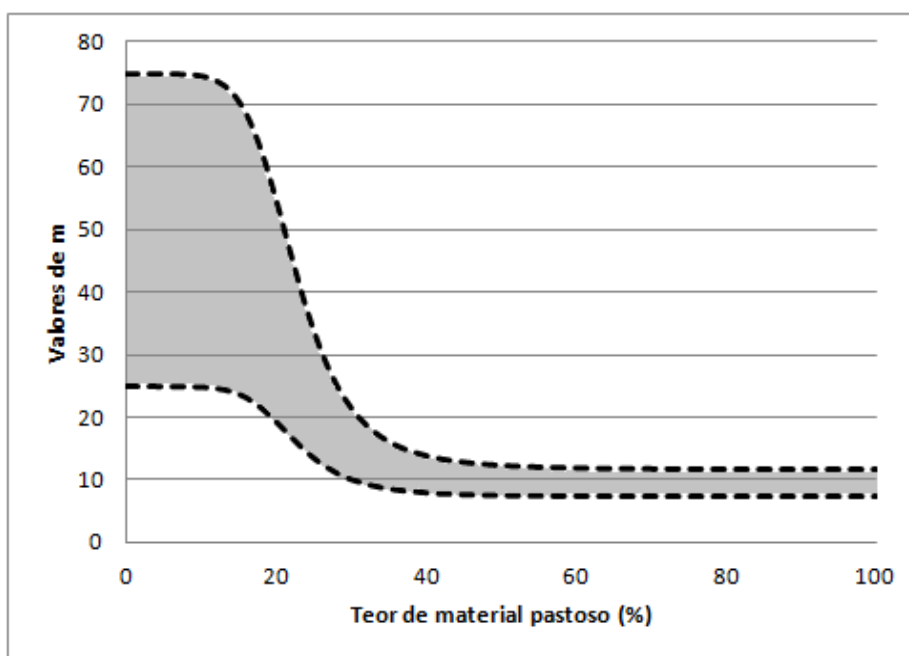


FIGURA 4.32. FAIXA DE VALORES SUGERIDA PARA O PARÂMETRO  $m$  NO ESTUDO DE RSU.

Essas figuras servem de ponto de partida para a determinação da faixa de valores que  $a$  e  $m$  podem assumir no estudo dos RSU. Apesar dos dados englobarem diversos tipos de material (solo-coloide, RSU sintéticos e RSU reais), ensaios adicionais com RSU com características diversas seriam fundamentais para complementar essas faixas.

## 5 CONCLUSÕES

Este trabalho propôs um modelo de previsão do comportamento mecânico de RSU com base na curva tensão x deformação obtida em um ensaio edométrico. Também foi realizada uma bateria de ensaios edométricos com uma mistura solo-coloide, a fim de propor e calibrar as equações constitutivas dos parâmetros do modelo. A validação da formulação proposta foi feita com dados da literatura de dois diferentes autores, e foram propostas faixas de valores aceitáveis para os parâmetros do modelo. Com base nos resultados obtidos pode-se concluir que:

- Os ensaios realizados com solo-coloide confirmaram a possibilidade de utilização desse material na simulação do comportamento dos RSU. Os resultados fornecidos pelos ensaios edométricos mostraram que ensaios com solo-coloide fornecem curvas tensão x deformação com comportamentos muito semelhantes aos das curvas fornecidas por ensaios com RSU.
- A metodologia definida para o preparo das misturas de solo-coloide mostrou-se satisfatória, visto que produziu amostras homogêneas e cujas propriedades se assemelharam às propriedades dos RSU.
- O modelo edométrico proposto mostrou-se adequado para a previsão do comportamento mecânico dos RSU: a aplicação do modelo a diferentes dados da literatura revelou que os resultados são condizentes com a realidade e que essa formulação pode ser aplicada a diversos tipos de resíduos.
- Diferentemente do modelo hiperbólico, o modelo proposto não se mostrou sensível à variação na taxa de degradação dos resíduos, apresentando resultados idênticos para resíduos com o mesmo teor de matéria orgânica, independentemente de suas idades e estágios de degradação. Assim, o modelo hiperbólico continua sendo melhor para estimar a geração de gases e líquidos dentro de um aterro, uma vez que permite saber quanto o material ainda vai degradar. No entanto, o modelo proposto apresentou sensibilidade à variação do teor de material pastoso e, conhecendo-se a curva de degradação desse material, é possível determinar a idade dos resíduos ensaiados a partir do teor de material pastoso obtido no ajuste do modelo. Com esses

dados é possível estimar, ainda que de forma menos precisa, a quantidade de resíduos que ainda será degradada.

- O Microsoft Office Excel, da maneira que foi utilizado, mostrou não ser o programa ideal para a implementação do modelo proposto, visto que apresenta limitações quanto ao número de células, restringindo o tamanho dos incrementos de carga aplicados nas equações incremental e diferencial do modelo.

- As equações constitutivas propostas para  $a$  e  $m$  mostraram-se satisfatórias na descrição do comportamento desses parâmetros, tanto para o solo-coloide quanto para os RSU. Apesar de o ideal ser fazer mais análises com outros tipos de RSU, as faixas de valores propostas para os parâmetros  $a$  e  $m$  já são um bom ponto de partida para o estudo do comportamento mecânico dos RSU com base na formulação desse modelo.



## 6 PESQUISAS FUTURAS

Foi verificada a necessidade de implementação do modelo proposto em outro programa que não o Microsoft Office Excel a fim de eliminar dos resultados do modelo a parcela de erro causada pelas limitações do programa. A modelagem computacional do modelo em duas dimensões também é interessante, visto que permite uma melhor visualização dos recalques sofridos no aterro.

É sugerida a realização de ensaios edométricos de grandes dimensões com RSU. Assim, uma vez que não é necessária a trituração do lixo para montagem dos corpos de prova, será possível reproduzir, nos ensaios, comportamento semelhantes aos observados para os resíduos no aterro.

Recomenda-se também o estudo dos valores dos parâmetros  $a$  e  $m$  para RSU com características diversas das apresentadas neste trabalho. Isso permitirá uma melhor definição das faixas de valores aceitas para esses parâmetros, tornando o modelo mais abrangente e possibilitando a sua aplicação a RSU com as mais diversas propriedades.

## REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6502: Rochas e solos**. Rio de Janeiro, 1995.
- \_\_\_\_\_. **NBR 7181: Solo – Análise granulométrica**. Rio de Janeiro, 1984.
- \_\_\_\_\_. **NBR 8419: Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos**. Rio de Janeiro, 1992.
- \_\_\_\_\_. **NBR 10004: Resíduos Sólidos – Classificação**. Rio de Janeiro, 2004.
- \_\_\_\_\_. **NBR 12007: Solo – Ensaio de adensamento unidimensional**. Rio de Janeiro, 1990.
- \_\_\_\_\_. **NBR 13292: Solo – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante**. Rio de Janeiro, 1995.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM International). **Standard D4254: Minimum Index Density and Unit Weight of Soils and Calculation of Relative Density**. West Conshohocken, 2006.
- BABU, G. L. S., REDDY, K. R., CHOUKSEY, S. K. Constitutive model for municipal solid waste incorporating mechanical creep and biodegradation-induced compression. **Waste Management**, v. 30, p. 11-22, 2010.
- BARDET, J. P. **Experimental Soil Mechanics**. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1997.
- BOSCOV, M. E. G. **Geotecnia Ambiental**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008.
- BRASIL. Lei n. 12.305, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei n. 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 03 ago. 2010. Disponível em <<http://www.in.gov.br/visualiza/index.jsp?data=03/08/2010&jornal=1&pagina=1&totalArquivos=84>>. Acesso em 17/08/2012.
- BRAY, J. D., ZEKOS, D., KAVAZANJIAN JR, E., ATHANASOPOULOS, G. A., RIEMER, M. F. Shear Strength of Municipal Solid Waste. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 135, n. 6, p. 709-722, 2009.
- CARVALHO, M. F. **Comportamento Mecânico de Resíduos Sólidos Urbanos**. 300 p. Tese de doutorado - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.

- CHEN, R. H., CHEN, K. S., LIU, C. N. Study of the mechanical compression behavior of municipal solid waste by temperature-controlled compression tests. **Environmental Earth Sciences**, v. 61, n. 8, p. 1677-1690, 2010.
- CHEN, Y. M., ZHAN, T. L. T., WEI, H. Y., KE, H. Aging and compressibility of municipal solid waste. **Waste Management**, v. 29, n. 1, p. 86-95, 2009.
- CORTÁZAR, A. L. G., MONZÓN, I. T. MODUELO 2: A new version of an integrated simulation model for municipal solid waste landfills. **Environmental Modelling & Software**, v. 22, n. 1, p. 59-72, 2007.
- DAS, B. M. **Fundamento de engenharia geotécnica**. Tradução da 6. ed. norte-americana. São Paulo: Thomson Learning, 2007.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM (DNER). **DNER – ME 093/94: Solos – determinação da densidade real**. 1994.
- DUNCAN, J. M., CHANG, C. Y. Non Linear Analysis of Stress and Strain in Soils. **Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division**, v. 96, n. 5, p.1629-1653, 1970.
- EL-FADEL, M., FINDIKAKIS, A. N., LECKIE, J. O. Numerical modelling of generation and transport of gas and heat in landfills. I. Model formulation. **Waste Management & Research**, v. 14, n. 5, p. 483-504, 1996a.
- EL-FADEL, M., FINDIKAKIS, A. N., LECKIE, J. O. Numerical modelling of generation and transport of gas and heat in sanitary landfills. II. Model application. **Waste Management & Research**, v. 14, n. 6, p. 537-551, 1996b.
- EL-FADEL, M., KHOURY, R. Modeling Settlement in MSW Landfills: a Critical Review. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, v. 30 (3), p. 327-361, 2000.
- FARIAS, A. B., JUCÁ, J. F. T. **Propriedades físicas dos resíduos sólidos do Aterro da Muribeca**. In: XXVII CONGRESSO INTERAMERICANO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 2000, Porto Alegre.
- GABR, M. A., VALERO, S. N. Geotechnical Properties of Municipal Solid Waste. **Geotechnical Testing Journal**, v. 18, n. 2, p. 241-251, 1995.
- HABITZREUTER, M. T. **Modelo unificado de geração de biogás em aterros sanitários**. 51 p. Trabalho de conclusão de curso - Engenharia Ambiental, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.
- HASHEMI, M., KAVAK, H. I., TSOTSIS, T. T., SAHIMI, M. Computer simulation of gas generation and transport in landfills – I: quasi-steady-state condition. **Chemical Engineering Science**, v. 57, n. 13, p. 2475-2501, 2002.

- IMHOFF, P. T., REINHART, D. R., ENGLUND, M., GUÉRIN, R., GAWANDE, N., HAN, B., JONNALAGADDA, S., TOWNSEND, T. G., YAZDANI, R. Review of state of the art methods for measuring water in landfills. **Waste Management**, v. 27, p. 729-745, 2007.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico - 2008**. Rio de Janeiro: IBGE, 2010.
- JANBU, N. **Settlements calculations based on the tangent modulus concept**. Three guest lectures at Moscow State University, Bulletin n. 2, Geotechnical Division, Norwegian Institute of Technology, University of Trondheim, Trondheim, 1967.
- JOHANNESSEN, L. M. Guidance Note on Recuperation of Landfill Gas from Municipal Solid Waste Landfills. **Urban and Local Government Working Paper**, World Bank, Washington, Series 4, 1999.
- KONDNER, R. L. Hyperbolic Stress-Strain Response: Cohesive Soils. **Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division**, v. 89, n. SM1, p. 115-143, 1963.
- LAMBE, T. W., WHITMAN, R. V. **Soil Mechanics**. John Wiley & Sons, 1969.
- LING, H. I., LESHCHINSKY, D., MOHRI, Y., KAWABATA, T. Estimation of Municipal Solid Waste Landfill Settlement. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 124, n. 1, p. 21-28, 1998.
- LOBO, A., LÓPEZ, A., COBO, N., TEJERO, I. Simulation of municipal solid waste reactors using Moduelo. **Waste and Resource Management**, v. 161, n. 3, p.99-104, 2008.
- MACHADO, S. L., CARVALHO, M. F., GOURC, J. P., VILAR, O. M., NASCIMENTO, J. C. F. Methane generation in tropical landfills: Simplified methods and field results. **Waste Management**, v. 29, n. 1, p. 153-161, 2009.
- MACHADO, S. L., CARVALHO, M. F., NASCIMENTO, J. C. F., DOURADO, K. A. **Estudo do comportamento mecânico de resíduos sólidos urbanos sob a influência da biodegradabilidade**. In: 23<sup>o</sup> CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 2005, Campo Grande.
- MACHADO, S. L., CARVALHO, M. F., VILAR, O. M. Constitutive Model for Municipal Solid Waste. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 128, n. 11, p. 940-951, 2002.
- MAHLER, C. F., NETO, A. L. **Análise da estabilidade do vazadouro da Rua Duarte da Silveira (Petrópolis), considerando o efeito das fibras**. In: XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2000, Porto Alegre.

- MATASOVIC, N., KAVAZANJIAN JR., E. Cyclic Characterization of Oil Landfill Solid Waste. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 124, n. 3, p. 197-210, 1998.
- MARQUES, A. C. M., FILZ, G. M., VILAR, O. M. Landfill settlement calculations using a composite rheological model. In: 4<sup>TH</sup> INTERNATIONAL CONGRESS ON ENVIRONMENTAL GEOTECHNICS, 2002, Rio de Janeiro. **Proceedings of the Fourth International Congress on Environmental Geotechnics**. p. 21-26.
- MELLO, G. Notas sobre o gerenciamento de resíduos sólidos urbanos no Brasil. **BNDES Setorial**. Rio de Janeiro, n. 27, p. 101-120, 2008.
- MERAZ, R. L., VIDALES, A. M., DOMINGUEZ, A. A fractal-like kinetics equation to calculate landfill methane production. **Fuel**, v. 83, n. 1, p. 73-80, 2004.
- MIURA, S., TOKI, S. A Sample Preparation Method and Its Effect on Static and Cyclic Deformation – Strength Properties of Sand. **Soils and Foundations**, v. 22, n. 1, p. 61-77, 1982.
- NAS, S. S., BAYRAM, A. Municipal solid waste characteristics and management in Gümüşhane, Turkey. **Waste Management**, v. 28, n. 12, p. 2435-2442, 2008.
- NASCIMENTO, J. C. F. **Comportamento mecânico de resíduos sólidos urbanos**. 160 p. Dissertação de mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.
- NASTEV, M., THERRIEN, R., LEFEBVRE, R., GÉLINAS, P. Gas production and migration in landfills and geological materials. **Journal of Contaminant Hydrology**, v. 52, n. 1-4, p. 187-211, 2001.
- NOCKO, L. M. **Modelagem acoplada tensão x deformação x biodegradação de resíduos sólidos urbanos**. 56 p. Trabalho de conclusão de curso - Engenharia Ambiental, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.
- OTSUKA, B. T. **Desenvolvimento de modelo hiperbólico com processo de biodegradação acoplado para previsão do comportamento mecânico de resíduos sólidos urbanos**. 162 p. Dissertação de mestrado – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.
- OTSUKA, B. T. **Estudo do padrão de geração de biogás em aterros sanitários**. 62 p. Trabalho de conclusão de curso - Engenharia Ambiental, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.
- OTSUKA, B. T., AVANZI, E. D., CAMPOS, T. M. P. **Estudo do comportamento mecânico de misturas solo-coloide visando o entendimento do processo**

**reológico de ganho de resistência.** In: XV CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, Gramado, 2010.

- PINTO, C. S. **Curso básico de Mecânica dos Solos.** 3. Ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.
- PINTO, I. C. de P. **Estimativa da geração de biogás e de líquidos em aterros sanitários devidos exclusivamente ao processo de biodegradação.** 51 p. Trabalho de conclusão de curso - Engenharia Ambiental, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.
- PRESTI, D. C. F., PEDRONI, S., CRIPPA, V. Maximum Dry Density of Cohesionless Soils by Pluviation and by ASTM D 4253-83: A Comparative Study. **Geotechnical Testing Journal**, v. 15, n. 2, p. 180-189, 1992.
- QIAN, X., KOERNER, R. M., GRAY, D. H. **Geotechnical Aspects of Landfill Design and Construction.** New Jersey: Prentice Hall, 2001.
- REDDY, K. R., HETTIARACHCHI, H., GANGATHULASI, J., BOGNER, J. E. Geotechnical properties of municipal solid waste at different phases of biodegradation. **Waste Management**, v. 31, p. 2275-2286, 2011.
- REDDY, K. R., HETTIARACHCHI, H., PARAKALLA, N. S., GANGATHULASI, J., BOGNER, J. E. Geotechnical properties of fresh municipal solid waste at Orchard Hills Landfill, USA. **Waste Management**, v. 29, n. 2, p. 952-959, 2009.
- RENOU, S., GIVAUDAN, J. G., POULAIN, S., DIRASSOUYAN, F., MOULIN, P. Landfill leachate treatment: Review and opportunity. **Journal of Hazardous Materials**, v. 150, p.468-493, 2008.
- RIBEIRO, A. G. C. **Determinação de parâmetros de resistência de resíduos sólidos urbanos por meio de retroanálises de testes em laboratório.** 100 p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2007.
- ROCHA, E. F. **Determinação da condutividade hidráulica e da capacidade de campo de resíduos sólidos urbanos.** 73 p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2008.
- SALES, C. V. Q. **Avaliação do comportamento mecânico de misturas solo-gelatina visando a modelagem de recalques de aterros sanitários.** 65 p. Trabalho de conclusão de curso – Engenharia Ambiental, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.
- SIMÕES, G. F. **Modelo para avaliação de recalques em aterros de disposição de resíduos sólidos urbanos.** 125 p. Tese de doutorado – Departamento de

Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2000.

SINGH, S., MURPHY, B. J. Evaluation of the Stability of Sanitary Landfills. In: LANDVA, A., KNOWLES, G. D. (Eds.). **Geotechnics of Waste Fills – Theory and Practice**, p. 240-258, Philadelphia: American Society for Testing and Materials, 1990.

STOLTZ, G., GOURC, J. P., OXARANGO, L. Characterisation of the physico-mechanical parameters of MSW. **Waste Management**, v. 30, n. 8-9, p. 1439-1449, 2010.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). Municipal Solid Waste Landfill. In: \_\_\_\_\_. **Compilation of Air Pollutant Emission Factors**, v. 1: Stationary Point and Area Sources, 1995.

USTOHALOVA, V., RICKEN, T., WIDMANN, R. Estimation of landfill emission lifespan using process oriented modeling. **Waste Management**, v. 26, n. 4, p. 442-450, 2006.

VILHENA, A. (Coord.). **Lixo municipal: manual de gerenciamento integrado**. 3. Ed. São Paulo: CEMPRE, 2010.

ZEKKOS, D., BRAY, J. D., ATHANASOPOULOS, G. A., RIEMER, M. F., KAVAZANJIAN JR, E., FOUNTA, P. A., GRIZI, A. F. **Compositional and Loading Rate Effects on the Shear Strength of Municipal Solid Waste**. In: 4<sup>TH</sup> INTERNATIONAL CONFERENCE ON EARTHQUAKE GEOTECHNICAL ENGINEERING, Thessaloniki, Grécia, 2007.

ZEKKOS, D., BRAY, J. D., KAVAZANJIAN JR, E., MATASOVIC, N., RATHJE, E. M., RIEMER, M. F., STOKOE II, K. H. Unit Weight of Municipal Solid Waste. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v.132, n.10, p. 1250 – 1261, 2006.

ZEKKOS, D., KAVAZANJIAN JR, E., BRAY, J. D., MATASOVIC, N., RIEMER, M. F. Physical Characterization of Municipal Solid Waste for Geotechnical Purposes. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v.136, n.9, p. 1231 – 1241, 2010.

ZORNBERG, J. G., JERNIGAN, B. L., SANGLERAT, T. R., COOLEY, B. H. Retention of Free Liquids in Landfills Undergoing Vertical Expansion. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v.125, n.7, p. 583 – 594, 1999.

## APÊNDICES

### APÊNDICE A

SIGNIFICADO DOS SÍMBOLOS UTILIZADOS NA TABELA 2.9 (RESUMO DOS MODELOS PARA PREVISÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DOS RSU.)

Ling et al (1998)	$t$	Diferença entre o tempo de interesse e o tempo do início da medição ( $t = t_i - t_0$ )
	$S$	Diferença entre o recalque no tempo $t_i$ e o medido no tempo $t_0$ ( $S = S_i - S_0$ )
	$\rho_0$	Taxa inicial de recalque (em $t = t_0$ )
	$S_{ult}$	Recalque final (em $t \rightarrow \infty$ )
Simões (2000)	$\Delta H_1$	Recalque da camada de resíduos de espessura inicial $H_0$ devido ao carregamento
	$H_0$	Espessura inicial da camada de resíduos analisada
	$C_R$	Coeficiente de compressão
	$P_0$	Tensão total vertical inicial
	$\Delta P$	Acréscimo de tensão total vertical
	$\Delta H_2$	Recalque da camada de resíduos de espessura inicial $H_0$ devido ao comportamento viscoso do material
	$C_\alpha$	Coeficiente de compressão viscoso
	$t$	Tempo
	$t_i$	Instante inicial
	$\Delta M_{ij}(t)$	Perda de massa em cada fração constituinte $i$ na camada $j$ no tempo $t$
	$M_{ij0}$	Massa inicial potencialmente biodegradável da fração constituinte $i$ na camada $j$
	$k_{ij}$	Taxa de biodegradação da fração constituinte $i$ na camada $j$
Machado et al (2002)	$d\varepsilon_v$	Incremento de deformação volumétrica total
	$V_e$	Razão entre o índice de vazios dos RSU e o índice de vazios da fração pastosa
	$e_p$	Índice de vazios da fração pastosa
	$d\varepsilon_{vp}$	Incremento de deformação volumétrica da fração pastosa
	$d\varepsilon_s$	Incremento de deformação cisalhante elástica total
	$d\varepsilon_{sp}$	Incremento de deformação cisalhante elástica da fração pastosa
	$V_p$	Razão entre o volume da fração pastosa e o volume total
	$d\varepsilon_{sf}$	Incremento de deformação cisalhante elástica das fibras
	$V_f$	Razão entre o volume das fibras e o volume total



Marques et al (2002)	$\varepsilon$	Deformação vertical
	$\Delta H$	Recalque
	H	Altura da coluna de resíduos
	$C_c$	Coeficiente de compressão mecânica primária
	$\sigma_0$	Tensão vertical
	$\Delta\sigma_v$	Incremento de tensão vertical
	b	Coeficiente de compressão mecânica secundária
	c	Taxa de compressão mecânica secundária
	$E_{DG}$	Compressão total devido à degradação dos resíduos sólidos
	d	Taxa de compressão biológica secundária
	t'	Tempo desde a aplicação do incremento de carga $\Delta\sigma_v$
	t''	Tempo desde a disposição do resíduo sólido no aterro sanitário
Babu et al (2010)	$\varepsilon_v$	Deformação volumétrica total para os RSU
	$\kappa$	Índice de recompressão
	e	Variação total no índice de vazios
	p'	Tensão efetiva média
	$\lambda$	Índice de compressão
	M	Constante de atrito
	c	Taxa constante de <i>creep</i> mecânico
	b	Coeficiente de <i>creep</i> mecânico
	$\sigma$	Tensão
	t	Tempo desde a deposição do lixo no aterro e o início do incremento de carga
Otsuka (2010) e Nocko (2010)	$E_{tg}$	Módulo tangente
	$E_i$	Módulo tangente inicial
	t	Tempo
	$R_f$	Razão de ruptura – relação entre as curvas experimental e teórica
	$\sigma_d$	Tensão desviadora
	S	Tensão última de resistência do ensaio de compressão triaxial

**APÊNDICE B**  
DEDUÇÃO DA EQUAÇÃO (3.1)

As Equações (B.1) e (B.2) definem, respectivamente, os pesos específicos do corpo de prova de solo colóide a ser ensaiado,  $\gamma_{sc}$ , e da gelatina,  $\gamma_g$ . Nessas equações,  $W_s$  é o peso de solo contido no corpo de prova,  $W_{g1}$  é o peso de gelatina contida no corpo de prova,  $W_{g2}$  é o peso de gelatina utilizado para moldar um corpo de prova somente com colóide (100% gelatina) e  $V_t$  é o volume do anel de adensamento utilizado para moldar o corpo de prova.

$$\gamma_{sc} = \frac{W_s + W_{g1}}{V_t} \quad (\text{B.1})$$

$$\gamma_g = \frac{W_{g2}}{V_t} \quad (\text{B.2})$$

Subtraindo a Equação (B.2) da Equação (B.1) e dividindo ambas por  $\gamma_g$  tem-se:

$$\frac{\gamma_{sc}}{\gamma_g} - \frac{\gamma_g}{\gamma_g} = \frac{W_s + W_{g1}}{V_t} \cdot \frac{V_t}{W_{g2}} - \frac{W_{g2}}{V_t} \cdot \frac{V_t}{W_{g2}} \quad (\text{B.3})$$

Simplificando tem-se:

$$\frac{\gamma_{sc}}{\gamma_g} - 1 = R = \frac{W_s + W_{g1} - W_{g2}}{W_{g2}} \quad (\text{B.4})$$

Resultando que R é uma variável que pode ser definida tanto pela Equação (B.5) quanto pela Equação (B.6).

$$R = \frac{\gamma_{sc}}{\gamma_g} - 1 \quad (\text{B.5})$$

$$R = \frac{1}{W_{g2}} (W_s + W_{g1} - W_{g2}) \quad (\text{B.6})$$

O volume ocupado pelos sólidos do solo no corpo de prova,  $V_s$ , pode ser definido por:

$$V_s = V_t - V_{g1} \quad (\text{B.7})$$

Em que  $V_{g1}$  é o volume de coloide contido no corpo de prova. Trabalhando essa equação e sabendo que  $\gamma_s$  é o peso específico dos sólidos do solo tem-se:

$$\frac{W_s}{\gamma_s} = V_t - V_{g1} \quad (\text{B.8})$$

$$W_s = \gamma_s (V_t - V_{g1}) \quad (\text{B.9})$$

O volume ocupado pela gelatina no corpo de prova,  $V_{g1}$ , pode ser definido por:

$$V_{g1} = \frac{W_{g1}}{\gamma_g} \quad (\text{B.10})$$

Substituindo a Equação (B.10) na Equação (B.9) tem-se:

$$W_s = \gamma_s \left( V_t - \frac{W_{g1}}{\gamma_g} \right) \quad (\text{B.11})$$

Substituindo o  $W_s$  da Equação (B.6) pela Equação (B.11) tem-se:

$$R = \frac{1}{W_{g2}} \left[ \gamma_s \left( V_t - \frac{W_{g1}}{\gamma_g} \right) + W_{g1} - W_{g2} \right] \quad (\text{B.12})$$

Trabalhando essa equação tem-se:

$$R = \gamma_s \left( \frac{V_t}{W_{g2}} - \frac{W_{g1}}{W_{g2} \cdot \gamma_g} \right) + \frac{W_{g1}}{W_{g2}} - 1 \quad (\text{B.13})$$

Substituindo  $\frac{V_t}{W_{g2}}$  por  $\frac{1}{\gamma_g}$  e simplificando a equação obtém-se a Equação (B.14).

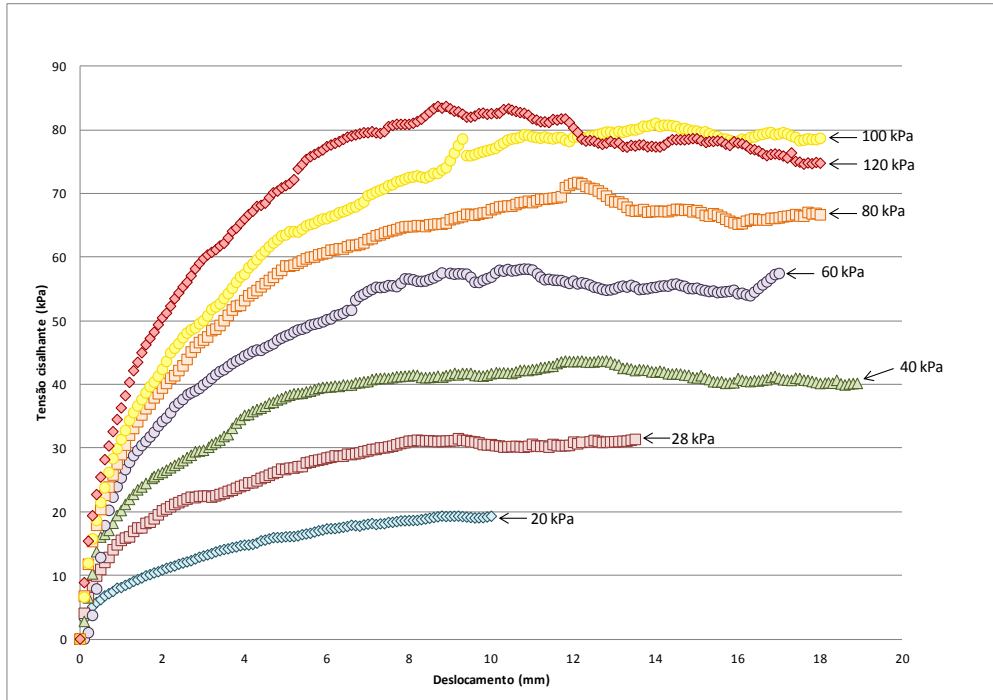
$$R + 1 - \frac{\gamma_s}{\gamma_g} = \frac{W_{g1}}{W_{g2}} \left( 1 - \frac{\gamma_s}{\gamma_g} \right) \quad (\text{B.14})$$

Isolando  $W_{g1}$  e substituindo R pela Equação (B.5) obtém-se a Equação (B.15), que é a equação desejada.

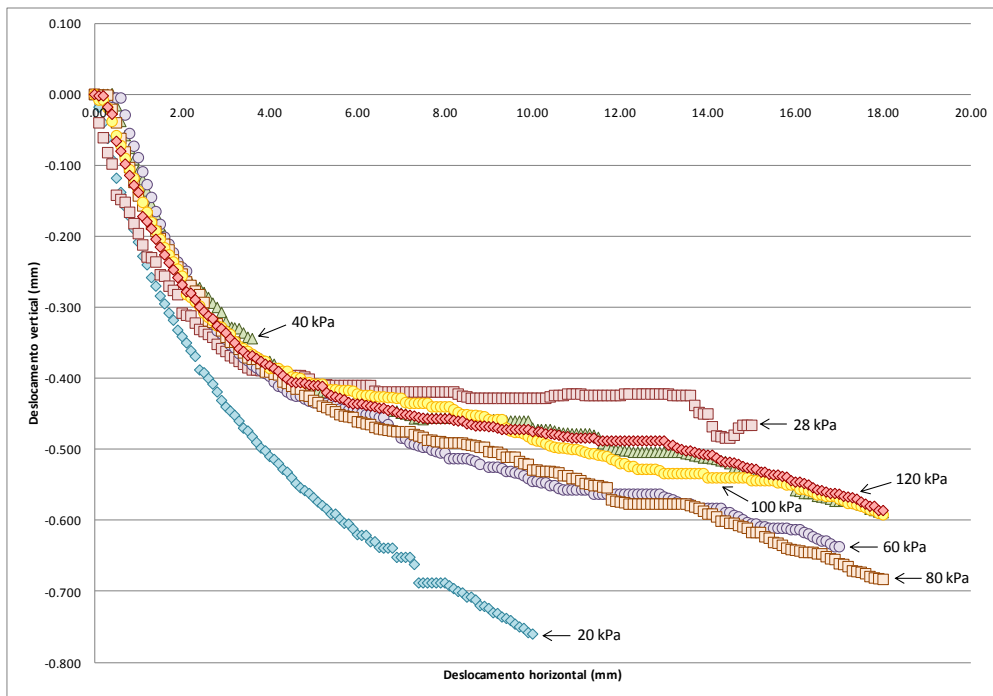
$$W_{g1} = \frac{(\gamma_{sc} - \gamma_s) W_{g2}}{\gamma_g - \gamma_s} \quad (\text{B.15})$$

**APÊNDICE C**

**FIGURAS OBTIDAS NA CARACTERIZAÇÃO DO SOLO**



**FIGURA C.1. CURVAS TENSÃO CISALHANTE X DESLOCAMENTO HORIZONTAL OBTIDAS ATRAVÉS DE ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO REALIZADOS COM A AREIA.**



**FIGURA C.2. CURVAS DESLOCAMENTO VERTICAL X DESLOCAMENTO HORIZONTAL OBTIDAS ATRAVÉS DE ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO REALIZADOS COM A AREIA.**

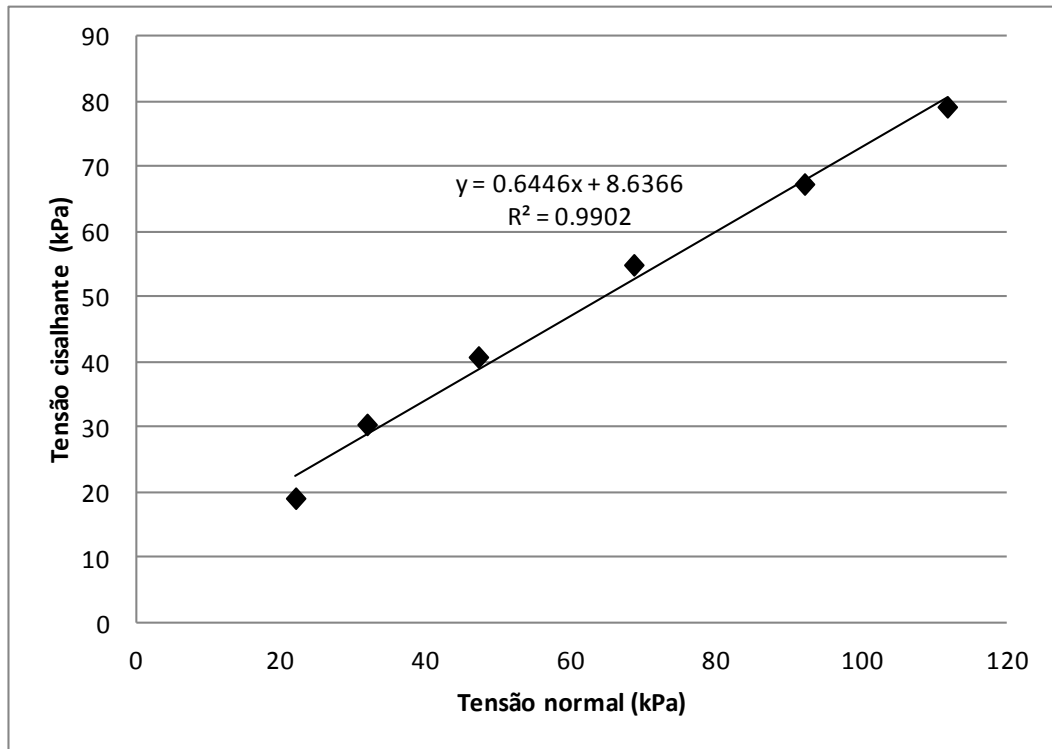


FIGURA C.3. ENVOLTÓRIA DE RUPTURA OBTIDA PARA A AREIA ENSAIADA.

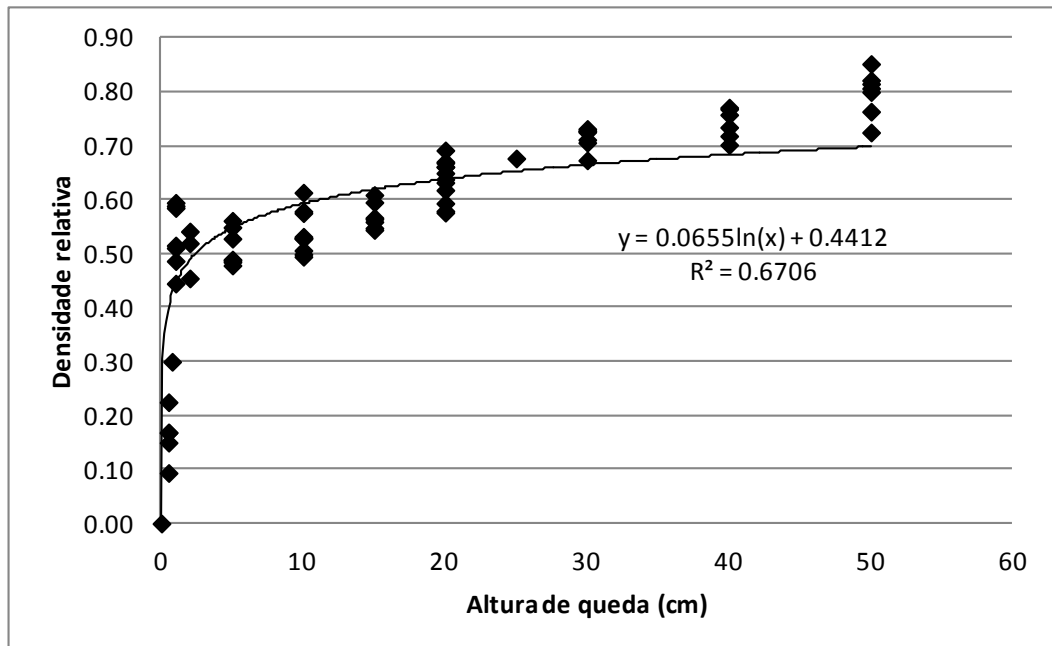


FIGURA C.4. GRÁFICO DE CALIBRAÇÃO DA CHUVA DE AREIA OBTIDO PARA O SOLO UTILIZADO NA MISTURA SOLO-COLOIDE.