

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**CARACTERIZAÇÃO DE RESÍDUO DE INDÚSTRIA DE
PAPEL PARA UTILIZAÇÃO COMO MATERIAL
GEOTÉCNICO**

Lidiane da Silva Ibeiro

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL
MEIO AMBIENTE

Porto Alegre
Junho de 2007

Lidiane da Silva Ibeiro

**CARACTERIZAÇÃO DE RESÍDUO DE INDÚSTRIA DE PAPEL PARA
UTILIZAÇÃO COMO MATERIAL GEOTÉCNICO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao corpo docente do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para a obtenção do grau de **MESTRE EM ENGENHARIA**.

Porto Alegre

Junho de 2007

Lidiane da Silva Ibeiro

**CARACTERIZAÇÃO DE RESÍDUO DA INDÚSTRIA DE PAPEL PARA
UTILIZAÇÃO COMO MATERIAL GEOTÉCNICO**

Esta Dissertação de Mestrado foi julgada adequada pelos professores orientadores e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 15 de Junho de 2007.

Prof. Nilo Cesar Consoli
Ph.D. Concordia University - Canadá
Orientador

Prof. Karla Salvagni Heineck
D.Sc. PPGEC - UFRGS
Orientadora

Prof. Fernando Schnaid
D.Phil, Coordenador do PPGEC/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Prof. Fernando Schnaid (UFRGS)
D.Phil. University of Oxford- UK

Prof. Juan Antônio Altamirano Flores (UFRGS)
D.Sc. Université de Poitiers - França

Prof. Pedro Miguel Vaz Ferreira (University College London)
D.Sc. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – PPGEC/UFRGS

I12c

Ibeiro, Lidiane da Silva

Caracterização de resíduo de indústria de papel para utilização como material geotécnico / Lidiane da Silva Ibeiro. – 2007.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre, BR-RS, 2007.

Orientação: Prof. Dr. Nilo César Consoli
Profª. Dra. Karla Salvagni Heineck

1. Condutividade hidráulica. 2. Geotécnica – Ensaios. 3. Resíduos de papel. I. Consoli, Nilo César, orient. II. Heineck, Karla Salvagni, orient. III. Título.

CDU-624.1(043)

*Dedico esta dissertação aos meus amados pais
Ornelio Parente Ibeiro e Rosa Tereza da Silva Ibeiro*

*“Sou Eu que estou mandando que você seja firme e corajoso,
portanto não tenha medo e não se acovarde, porque
Eu sou seu Deus e estou com você onde quer que você vá”*

Josué 1: 9

AGRADECIMENTOS

Acima de tudo agradeço a Deus, que me guiou, me protegeu e tornou possível a realização deste trabalho.

Agradeço aos meus queridos pais, que nunca mediram esforços para a minha felicidade, que sempre preencheram a minha vida com muito amor, e me ensinaram valores indelévels: respeito ao próximo e honestidade. Pai, Mãe vocês são a razão de minhas conquistas, obrigada pelo amor incondicional que me faz sentir muito perto de Deus.

Desejo agradecer ao meu padrinho, compadre, e colega de profissão “dindo José”, à Denise, comadre e colega de profissão, e ao Tales, meu afilhado colorado, acima de tudo meus amigos queridos, companheiros inseparáveis que estão sempre dispostos a me ajudar, pessoas insubstituíveis, que preenchem minha vida e de meus pais com muitas alegrias. Dindo, Denise e Tatá, obrigada pelo carinho especial.

Agradeço a minha amiga e irmã do coração Eliana Klering, com a qual sempre foi possível dividir minhas angústias e minhas alegrias, uma amiga dedicada e companheira para todas as horas. Amiga, ter convivido contigo durante este importante período da minha vida, com certeza foi prazeroso e gratificante. Agradeço também aos teus pais, tio Silvestre e tia Tânia, pessoas que me têm como filha e estão sempre torcendo pela minha felicidade.

Agradeço à Professora Karla Heineck e ao Professor Nilo Consoli com sua contagiante motivação, em primeiro lugar pela orientação e apoio, mas principalmente por terem confiado em mim, pelo incansável incentivo, pela paciência e amizade que foram essenciais para que eu pudesse atingir meu objetivo. Ao professor Juan Flores, o qual muito admiro, pela constante colaboração e amizade. Ao professor Fernando Schnaid, pelos ensinamentos e pelo apoio nas horas precisas. Professores, obrigada por tudo sempre.

Agradeço aos queridos colegas Francisco Dalla Rosa e Lucas Festugato que estiveram sempre dispostos a colaborar e ajudar a enfrentar dificuldades. Aos bolsistas de iniciação científica Carlos Emmanuel Lautenschläger e Guilherme Righetto (“Paulista”) pela constante dedicação e amizade. Agradeço aos colegas do grupo LEGG/ENVIRONGEO (Emanuele Gauer, Jucélia Bedin, José Rojas, Rodrigo Caberlon e Ênio Alves Júnior), e ao laboratorista João Diniz, pela amizade, pelas conversas, pelas inúmeras contribuições e, especialmente, pelos incontáveis momentos de alegria.

À estimada amiga e colega Bianca Reis Pagani, pelas alegrias e confidências, minha constante companheira que sempre dividiu comigo todos os aprendizados, que esteve sempre pronta a me apoiar e compreender com palavras confortantes e animadoras.

Agradeço às minhas amigas fiéis, Carolina Bento de Oliveira e Adriana Godoi, pelo constante carinho, pelo apoio e torcida.

Ao meu querido Alexandre Knop, pelo importante apoio na elaboração deste trabalho, pelos cuidados, companheirismo e incentivo especial.

À grande amiga Ariela Torres, pela amizade de sempre e pelo incansável incentivo em todos os momentos. Às amigas Joaquina Vargas e Adriane Vargas, que sempre cuidaram de mim como se eu ainda fosse aquela menininha que elas pegavam no colo há um tempo atrás. À tia Mina Ferreira, pelo carinho tão especial. Ao amigo Klaus Theisen, pelas sábias palavras e valiosa amizade.

Às minhas queridas “vó” Arani, tia Solange, tia Cibele, tia Valda, dinda Lídia, dinda Nida, e aos demais familiares, pelo carinho, orações, torcida e por compreenderem a minha ausência de muitos momentos. À tia Neusa e tio Wanderley, pelo carinho e amizade de sempre.

Agradeço aos funcionários e professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

À Capes, órgão financiador de parte desta pesquisa.

SUMÁRIO

SUMÁRIO	iii
LISTA DE FIGURAS	vi
LISTA DE TABELAS	vii
LISTA DE SÍMBOLOS	viii
RESUMO	ix
ABSTRACT	x
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	1
1.1 RELEVÂNCIA E JUSTIFICATIVA DO TRABALHO	1
1.2 OBJETIVOS	3
1.3 LIMITAÇÕES DA PESQUISA	4
1.4 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	5
CAPÍTULO 2 – REVISÃO DA LITERATURA	6
2.1 RESÍDUOS PROVENIENTES DA INDÚSTRIA DE PAPEL	6
2.1.1 Considerações Iniciais	6
2.1.2 Características Gerais dos Resíduos de Papel	7
2.1.3 Características de Compactação	8
2.1.4 Características de Permeabilidade	8
2.1.5 Características de Adensamento	9
2.1.6 Características de Resistência	10
2.2 SISTEMAS DE COBERTURA – <i>COVER LINERS</i>	11
CAPÍTULO 3 – PROGRAMA EXPERIMENTAL	14
3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	14
3.2 DESCRIÇÃO DO PROGRAMA EXPERIMENTAL	15
3.2.1 Ensaios de Caracterização Física	15
3.2.2 Ensaio de Compactação	15

3.2.3	Análise por Microscopia Eletrônica de Varredura	16
3.2.4	Estudo do Comportamento Mecânico e Hidráulico do Resíduo	16
3.2.4.1	Ensaio de Compressão Edométrica	16
3.2.4.2	Ensaio Triaxiais com Medição da Condutividade Hidráulica	17
3.2.5	Análise da Composição Química do Resíduo	17
3.2.5.1	Determinação do Teor de Matéria Orgânica	17
3.2.5.2	Análise por Fluorescência de Raios-X	18
CAPÍTULO 4 – MATERIAIS E MÉTODOS.....		19
4.1	MATERIAIS UTILIZADOS	19
4.1.1	Resíduo da reciclagem de papel	19
4.1.2	Água.....	22
4.2	MÉTODOS UTILIZADOS	22
4.2.1	Coleta e Preparação do Material.....	22
4.2.2	Preparação dos Corpos de Prova	24
4.2.3	Ensaio de Caracterização Física.....	27
4.2.4	Ensaio de Compactação	27
4.2.5	Análise por Microscopia Eletrônica de Varredura	28
4.2.6	Ensaio de Compressão Edométrica.....	29
4.2.7	Ensaio Triaxiais e Medição da Condutividade Hidráulica.....	32
4.2.8	Determinação do Teor de Matéria Orgânica	37
4.2.9	Análise por Fluorescência de Raios-X	38
CAPÍTULO 5 – RESULTADOS E ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DO MATERIAL .		39
5.1	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICA	39
5.2	ENSAIO DE COMPACTAÇÃO	40
5.3	ANÁLISE POR MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA	43
5.4	COMPORTAMENTO MECÂNICO E HIDRÁULICO DO RESÍDUO	45
5.4.1	Ensaio de Compressão Edométrica.....	45
5.4.2	Ensaio Triaxiais com Medição da Condutividade Hidráulica	49
5.4.2.1	Ensaio Triaxiais – Dados Gerais.....	49

5.4.2.2 Comportamento Tensão Desvio e Variação da Poro-pressão <i>versus</i> deformação axial	52
5.4.2.3 Envoltória de Ruptura e Parâmetros de Resistência.....	53
5.4.2.4 Comportamento Hidráulico do Resíduo.....	55
5.4.3 Determinação do Teor de Matéria Orgânica	58
5.4.4 Análise por Fluorescência de Raios-X	58
CAPÍTULO 6 – CONSIDERAÇÕES FINAIS	60
6.1 CONCLUSÕES	60
6.1.1 Características Gerais do Resíduo Estudado	61
6.1.2 Comportamento Mecânico do Resíduo	61
6.1.2.1 Compressão Edométrica.....	61
6.1.2.2 Compressão Triaxial	62
6.1.3 Comportamento Hidráulico do Resíduo	62
6.1.4 Consideração Sobre os Ensaio Empregados	62
6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	63
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	64

LISTA DE FIGURAS

Figura 4.1: (a) Preparação da massa (b) Recuperação de fibras (c) Armazenamento do resíduo	20
Figura 4.2: (a) Resíduo no estado natural (b) Resíduo úmido peneirado na abertura 4,75 mm	23
Figura 4.3: (a) Destorroamento do resíduo (b) Resíduo seco antes e após o destorroamento .	24
Figura 4.4: (a) Moldagem de corpo de prova (b) Expansão da altura do corpo de prova.....	26
Figura 4.5: Prensa de adensamento	30
Figura 4.6: Detalhe da célula de adensamento	31
Figura 4.7: Visão geral dos equipamentos para ensaio triaxial.....	33
Figura 4.8: Câmara triaxial e corpo de prova.....	34
Figura 4.9: Cadinhos em mufla	38
Figura 5.1: Curva de compactação Energia Proctor Normal	41
Figura 5.2: (a) Corpo de prova com umidade de aproximadamente 150 % (b) Corpo de prova com umidade de aproximadamente 125 %.....	42
Figura 5.3: Imagem (1) do resíduo em MEV e espectros correspondentes	43
Figura 5.4: Imagem (2) do resíduo em MEV	44
Figura 5.5: Imagem (3) do resíduo em MEV	44
Figura 5.6: Índice de vazios <i>versus</i> logaritmo da tensão vertical.....	47
Figura 5.7: C_v <i>versus</i> σ'_v para diferentes umidades iniciais de moldagem	49
Figura 5.8: (a) Corpo de prova $\omega_i = 133\%$ (b) Corpo de prova $\omega_i = 192\%$	51
Figura 5.9: Comportamento Tensão desvio <i>versus</i> deformação axial e variação da poro- pressão <i>versus</i> deformação axial para o resíduo a diferentes umidades de moldagem	52
Figura 5.10: Envoltória de resistência ao cisalhamento do resíduo de papel.....	54
Figura 5.11: Condutividade hidráulica antes do cisalhamento para amostras a diferentes umidades iniciais e tensões efetivas médias	56
Figura 5.12: Condutividade hidráulica para amostras com umidades de moldagem próximas a 130 % e diferentes tensões efetivas médias.....	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Composições dos resíduos estudados por Cabral et al. (2002)	7
Tabela 2.2: Características do resíduo estudado por Teixeira (2002) nos ensaios de adensamento	9
Tabela 5.1: Índices físicos e de consistência do resíduo	39
Tabela 5.2: Parâmetros almejados para a moldagem dos corpos de prova	42
Tabela 5.3: Concentração dos componentes (%)	43
Tabela 5.4: Concentração dos componentes (%)	44
Tabela 5.5: Concentração dos componentes (%)	45
Tabela 5.6: Parâmetros iniciais e finais dos corpos de prova ensaiados	46
Tabela 5.7: Coeficientes de compressibilidade de amostras ensaiadas sob diferentes ω_i	48
Tabela 5.8: Variáveis dos ensaios e variação dos índices físicos antes e após adensamento	50
Tabela 5.9: Composição química (%) para amostras do resíduo	58

LISTA DE SÍMBOLOS

ϕ'	Ângulo de atrito interno do material;
c'	Coesão;
C_r	Coefficiente de recompressão;
C_c	Coefficiente de compressão;
C_d	Coefficiente de descarregamento;
C_v	Coefficiente de adensamento;
k	Coefficiente de condutividade hidráulica;
G	Peso específico real dos grãos;
LL	Limite de Liquidez;
LP	Limite de Plasticidade;
S	Saturação;
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura;
EDS	<i>Energy Dispersive Spectroscopy</i> ;
σ'_c	Tensão efetiva;
ε_a	Deformação axial;
e	Índice de vazios;
e_i, e_f	Índice de vazios inicial; Índice de vazios final;
Oc	Conteúdo orgânico do material;
σ'_v, m	Tensão de pré-adensamento;
σ_v	Tensão vertical;
σ'_v	Tensão vertical – efetiva;
ΔV	Variação de volume;
ω, ω_i	Umidade, umidade inicial;
u	Poro-pressão;
γ_d	Peso específico aparente seco.
t	$(\sigma'_a - \sigma'_r)/2$
s'	$(\sigma'_a + \sigma'_r)/2$
σ'_a, σ'_r	Tensões principais axial e radial

RESUMO

IBEIRO, L. S. **Caracterização de Resíduo de Indústria de Papel para Utilização como Material Geotécnico**. 2007. 66p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, PPGEC/UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.

Seguindo a linha de pesquisa de novos materiais geotécnicos, na busca por soluções técnicas a partir do uso de materiais alternativos, o presente estudo avaliou sob enfoque geotécnico o comportamento do resíduo de uma fábrica recicladora de papel localizada no estado do Rio Grande do Sul, Brasil. O objetivo do trabalho consistiu em caracterizar o resíduo e identificar suas propriedades no que se refere ao seu desempenho mecânico e hidráulico, a partir de um programa de ensaios de laboratório. O resíduo *in natura* possui uma umidade de 256 %, sendo composto de matéria orgânica (de 40 a 45 %), cargas minerais (principalmente caulinita e calcita) e água. As análises para a determinação dos parâmetros de deformabilidade, resistência e condutividade hidráulica foram feitas utilizando-se como variável os valores de umidade de aproximadamente 190, 160 e 130 %. Os parâmetros de compressibilidade unidimensional das amostras do resíduo não apresentaram variabilidade significativa com a variação da umidade de moldagem, obtendo-se valores médios elevados para os índices de compressão (C_c) e descarregamento (C_d) e para os coeficientes de adensamento (C_v), indicativos da alta compressibilidade característica do material. Para a determinação dos parâmetros de resistência do material foram realizados ensaios triaxiais não-drenados. O ângulo de atrito interno obtido foi de $\phi' = 53,5^\circ$. Durante os ensaios triaxiais foram realizadas medições da condutividade hidráulica antes da fase de cisalhamento das amostras. Os coeficientes de condutividade hidráulica, medidos na fase pré-cisalhamento, atingiram valores da ordem de 10^{-9} m/s. A capacidade de atingir baixos valores de condutividade hidráulica é uma característica relevante do comportamento deste material e indica a possibilidade de ser utilizado como um material geotécnico alternativo em substituição aos materiais convencionais utilizados em coberturas impermeáveis de aterros (*cover liners*).

Palavras-chave: resíduos de papel; caracterização de resíduos; condutividade hidráulica; liners.

ABSTRACT

IBEIRO, L. S. **Characterization of Paper Mill Sludge for Utilization as Geotechnical Material**. 2007. 66p. M.Sc. Thesis in Civil Engineering – Graduate Program in Civil Engineering, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brazil.

Following the line of research of new geotechnical materials, aiming new technical solutions using alternative materials, the present research evaluated, under geotechnical understanding, the behavior of the waste sludge from a paper recycling plant in Rio Grande do Sul, Brazil. The objective of this research aimed the characterization and the identification of the waste properties – mechanical and hydraulic performance, through laboratory tests. The natural waste has 256% of water content, and is composed by organic matter (ranging from 40 to 45 %), mineral charges (mainly Kaolinite and Calcite) and water. The tests for the determination of deformability, strength and hydraulic conductivity parameters were carried out under 190%, 160% and 130 % of water content. The one-dimensional compressibility parameters of the waste sludge did not show a significant variability with the variation of the molding water content, where the average values were high for the compression (C_c) and swelling (C_d) coefficients as well as for the consolidation coefficient (C_v), which can be considered as an indicative of high compressibility (characteristic of the material). For the determination of the strength parameters of the material, it was carried out undrained triaxial tests. The internal friction angle was $\phi' = 53,5^\circ$. During the triaxial tests, measurements of hydraulic conductivity were performed, previously shearing. The hydraulic conductivity coefficients measured during the pre-shearing phase, reached values around 10^{-9} m/s. The capacity for reaching low values of hydraulic conductivity is a considerable characteristic of the behavior of this material, what shows the possibility of its use as an alternative geotechnical material substituting the conventional materials used as cover liners.

Keywords: Paper Mill Sludge, characterization of wastes, hydraulic conductivity, liners.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 RELEVÂNCIA E JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

A utilização de resíduos industriais como materiais alternativos no campo da engenharia civil vem ganhando expressão nos últimos anos e isso se deve, especialmente, a aspectos econômicos e ambientais.

Todo processo industrial é caracterizado pela utilização de insumos que, submetidos a transformações, dão lugar a produtos e resíduos. A geração destes últimos se constitui numa questão relevante, pois sua adequada destinação final é necessária, mas encontra várias dificuldades: os volumes de resíduos gerados são significativos, os espaços para disposição dos mesmos tornam-se cada vez mais escassos e os custos com as instalações necessárias, que atendam às exigências técnicas para um armazenamento apropriado, são elevados.

Encontrar aplicabilidades para os resíduos industriais é uma solução eficaz no sentido de buscar minimizar os problemas relacionados à geração dos mesmos. Muitos podem ser transformados em matérias-primas para outras linhas de produção, ou utilizados como materiais alternativos na substituição de recursos naturais.

A indústria recicladora de papel é responsável pela geração de elevados volumes diários de resíduos e, assim como outras indústrias, tem elevadas despesas com a necessidade de uma adequada destinação final para seus rejeitos. Estudos já demonstraram o potencial técnico do resíduo desta indústria como uma alternativa econômica na substituição de camadas de argilas compactadas em sistemas convencionais de coberturas de aterros de resíduos sólidos urbanos, (Moo-Young, 1995; Moo-Young e Zimmie, 1996; Kraus *et al*, 1997; Cabral *et al*, 2002). Por estes motivos, o resíduo em questão merece particular atenção por parte de pesquisadores que visam desenvolver tecnologias para o aproveitamento do mesmo na construção civil.

De acordo com os estudos já existentes, o resíduo da indústria de papel, constituído principalmente por fibras celulósicas, cargas minerais e água, apresenta um desempenho satisfatório quando solicitado para atender parâmetros geotécnicos exigidos às barreiras impermeáveis de cobertura de aterros de resíduos sólidos urbanos. Uma das principais características do comportamento deste material, que se apresenta como um lodo, portanto altamente compressível, é a possibilidade de ser compactado, e sob esta condição, atingir baixos valores de condutividade hidráulica.

Embora os resíduos de papel apresentem composições e características gerais semelhantes, encontram-se na literatura variações nos resultados obtidos para suas propriedades, e isso se deve, principalmente, aos diferentes processos de tratamentos adotados que dão origem ao resíduo, bem como à matéria-prima que entra para os processos. Deste modo, para cada resíduo estudado, podem-se obter propriedades distintas.

Seguindo a linha de pesquisa mundial, que busca por soluções técnicas a partir do uso de materiais alternativos, o presente estudo tem por finalidade avaliar o comportamento do resíduo de uma fábrica recicladora de papel localizada na cidade de Gravataí, próxima a cidade de Porto Alegre, no estado do Rio Grande do Sul, Brasil.

O material de estudo classifica-se, segundo a norma brasileira NBR 10004 (ABNT, 2004), como um Resíduo Classe II B – Não perigoso e não inerte.

O estudo é um trabalho pioneiro desenvolvido no Laboratório de Resíduos e Geotecnia Ambiental (ENVIRONGEO) da UFRGS e enquadra-se na linha de pesquisa de desenvolvimento de novos materiais geotécnicos. Voltou-se para uma abordagem geotécnica, mas também tem caráter exploratório, pois não há experiência anterior entre o grupo com tal tipo de pesquisa. Por este motivo, e devido aos relatos encontrados na literatura, o trabalho teve como enfoque, a análise do comportamento do material visando o uso como barreira impermeável em sistemas de coberturas de aterros (*cover liners*).

Utilizam-se normalmente como barreiras impermeáveis em sistemas convencionais de coberturas de aterros, camadas compactadas de solos argilosos, os quais devem apresentar características tais que cumpram com a finalidade de limitar a percolação de líquidos para o interior da massa do aterro.

Existem parâmetros exigidos aos materiais constituintes das barreiras impermeáveis, para que se tenha a garantia de um bom desempenho das mesmas. Estes parâmetros são estabelecidos por órgãos ambientais regulamentadores, e podem variar em função do tipo de resíduo que a barreira tem o propósito de proteger. Usualmente, para barreiras impermeáveis de sistemas de coberturas de aterros de resíduos sólidos urbanos, valores de condutividade hidráulica máximos de 1×10^{-7} m/s são exigidos. Em projetos e construções executados com critério técnico, este valor é normalmente o mais baixo a ser facilmente alcançado dentro de um custo aceitável (La Grega *et al*, 2001).

Além de baixos valores de condutividade hidráulica, espera-se que materiais a serem empregados como barreiras impermeáveis apresentem características tais como: boa trabalhabilidade, estabilidade climática e capacidade de absorver recalques diferenciais produzidos pela massa de aterro.

O estudo aqui apresentado buscou conhecer o comportamento e desempenho do resíduo para o eventual uso como substituto de camadas de argilas compactadas.

Neste contexto, é intenção do trabalho contribuir para o desenvolvimento de novos materiais a serem empregados em obras geotécnicas, as quais se caracterizam pelo elevado consumo de recursos naturais e, portanto, apresentam potencial em absorver os grandes volumes de resíduos gerados pela atividade industrial aqui abordada.

1.2 OBJETIVOS

É objetivo geral deste trabalho caracterizar e identificar as propriedades do resíduo em estudo, sob o enfoque geotécnico, a partir da realização de ensaios de laboratório, bem como conhecer seu comportamento quando submetido à compactação, principalmente no que se refere ao seu desempenho hidráulico e mecânico.

Para tal, os seguintes objetivos específicos foram estabelecidos:

1. Caracterizar fisicamente o resíduo a partir de ensaios e conceitos padronizados para solos;

2. Realizar uma identificação preliminar da composição química do resíduo;
3. Avaliar o comportamento do resíduo no que diz respeito à deformabilidade, quando submetido a carregamento axial, a partir de ensaios de compressão edométrica;
4. Avaliar o comportamento tensão-deformação do resíduo e seus parâmetros de resistência a partir da realização de ensaios triaxiais convencionais não-drenados;
5. Determinar e analisar a condutividade hidráulica do resíduo medida durante ensaios triaxiais, antes e após a fase de cisalhamento.

1.3 LIMITAÇÕES DA PESQUISA

Cabe-se ressaltar neste espaço o fato de existirem algumas limitações impostas ao trabalho, que se devem ao motivo de se estar pesquisando um assunto relativamente pouco estudado, mesmo no contexto internacional. Estas limitações consistem, em primeiro lugar, no fato de se encontrar alguma dificuldade ao acesso de informações que efetivamente forneçam subsídios para a realização dos experimentos. Por existir esta deficiência de informações, dificuldades tiveram de ser enfrentadas, até mesmo no que diz respeito ao fato de como tratar o material, pois se desconhecia as minúcias do seu comportamento, o que comprometeu muitas vezes a execução do programa experimental estabelecido, tornando-se necessário tomar novos rumos no direcionamento do estudo ao longo do desenvolvimento do trabalho.

Outra questão relevante, que se deseja ressaltar neste momento, é a carência de uma bibliografia ampla e consistente sobre o assunto, o que refletiu em uma revisão da literatura bastante breve nesta dissertação. Os estudos encontrados não diferem muito em sua abordagem, reduzindo neste aspecto, o que se tem a relatar sobre os mesmos.

Por outro lado, por se tratar de uma pesquisa em torno de um assunto ainda recente dentro da comunidade geotécnica, destaca-se a relevância desta dissertação.

1.4 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação divide-se em seis capítulos, estruturados do seguinte modo:

Capítulo 1 – Introdução: apresenta o assunto estudado neste trabalho e a justificativa de sua realização, bem como os objetivos traçados para o estudo e algumas limitações enfrentadas no desenvolvimento do mesmo;

Capítulo 2 – Revisão da Literatura: compreende um breve relato dos principais tópicos encontrados na bibliografia, relacionados ao assunto abordado nesta dissertação;

Capítulo 3 – Programa Experimental: apresenta a seqüência de ensaios realizados e as variáveis estabelecidas para executá-los, detalhando a intenção da aplicação de cada um;

Capítulo 4 – Materiais e Métodos: apresenta o material estudado neste trabalho e descreve os métodos e equipamentos utilizados na realização dos ensaios do programa experimental;

Capítulo 5 – Resultados e Análise do Comportamento do Material: assim como sugere o nome, trata dos resultados obtidos a partir dos ensaios e das referentes análises;

Capítulo 6 – Considerações Finais: apresenta as principais conclusões deste trabalho, que representam a síntese do conhecimento adquirido com seu desenvolvimento, e também algumas sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

REVISÃO DA LITERATURA

2.1 RESÍDUOS PROVENIENTES DA INDÚSTRIA DE PAPEL

2.1.1 Considerações Iniciais

Também denominados de *deinking residues* ou *fiber-clays*, os resíduos de papel, constituídos principalmente por fibras celulósicas, cargas minerais e água, consistem no rejeito (normalmente um lodo) gerado durante a fabricação do papel.

Nos últimos anos, os resíduos da indústria de papel começaram a ser reconhecidos como um material geotécnico não convencional. Pesquisas sobre as características destes resíduos e seu emprego como material alternativo na área geotécnica já foram conduzidas principalmente nos Estados Unidos e Canadá, e resultados são relatados em termos de umidade do material, conteúdo orgânico, condutividade hidráulica, resistência ao cisalhamento, adensamento e biodegradabilidade (Moo-Young, 1995; Moo-Young e Zimmie, 1996, Kraus *et al*, 1997; Cabral *et al*, 2002, Simpson e Zimmie, 2004).

A principal aplicação dos resíduos de papel relatada trata-se da utilização como material impermeável em sistemas de coberturas de aterros sanitários.

2.1.2 Características Gerais dos Resíduos de Papel

Conforme Simpson e Zimmie (2004), os resíduos de papel comportam-se mais propriamente como argilas com elevado teor de matéria orgânica do que típicas argilas compactadas utilizadas para aplicações em *liners*, caracterizado-se por elevados teores de umidade (100 a 200 %), elevada compressibilidade (valores de C_C de 1,5 a 3,0) e baixos valores de resistência ao cisalhamento *in-situ* (5 a 50 kPa).

Cabral *et al* (2002) apresentam as propriedades geotécnicas de quatro amostras de resíduos, provenientes de três plantas de reciclagem de papel de Québec, no Canadá. O estudo compreendeu a caracterização físico-química dos materiais para definição de suas composições. Na Tabela 2.1 é possível visualizar os valores encontrados para as diferentes amostras que foram denominadas de DR1, DR2, DR3 e DR4. Observa-se que as maiores porcentagens se constituem de materiais voláteis, por conseqüência é possível esperar um comportamento similar ao encontrado para os resíduos estudados por Moo-Young e Zimmie (1996).

Tabela 2.1: Composições dos resíduos estudados por Cabral et al (2002)

Resíduo	Voláteis (%)	Calcita (%)	Metacaolim (%)	Talco (%)	Outros (%)
DR1	62,9	21,1	8,4	2,0	5,7
DR2	48,8	21,4	16,9	2,4	10,6
DR3	57,7	21,2	12,1	1,7	7,2
DR4	55,6	20,0	2,7	14,6	7,1

O teor de umidade é um importante índice a ser analisado, pois ele afeta direta ou indiretamente a compactação, o adensamento, a resistência e a condutividade hidráulica do material (Moo-Young e Zimmie, 1996). Estes autores apresentam em seu trabalho uma relação linear entre o conteúdo orgânico de resíduos de papel e seus parâmetros de adensamento, a partir do estudo de amostras de sete lodos diferentes, representando diferentes idades do material. De acordo com os autores, à medida que diminui o conteúdo de matéria orgânica presente no material, sua densidade aumenta, e sua compressibilidade e permeabilidade diminuem. Os conteúdos orgânicos para os lodos estudados apresentaram

valores variando de 30 a 70%. Tendo a amostra representativa do lodo mais antigo (10-14 anos) apresentado os menores valores (de 30 a 40%).

2.1.3 Características de Compactação

Moo-Young e Zimmie (1996) realizaram ensaios de compactação Proctor Normal, executando os mesmos do ramo úmido da curva de compactação para o ramo seco, devido ao elevado teor de umidade inicial do material e da dificuldade em remoldar o mesmo quando seco, pois nessa situação formam torrões rígidos.

Nos ensaios de compactação realizados por Cabral et al. (2002) os valores encontrados para densidade seca máxima variaram de 510 a 680 Kg/m³, e a umidade ótima de 55 a 100%. Segundo os autores, ficam evidentes os macroporos contidos na amostra compactada do lado seco da curva de compactação, confirmando a dificuldade citada por Moo-Young e Zimmie (1996) em uniformizar o material quando na condição mais seca.

2.1.4 Características de Permeabilidade

De acordo com Moo-Young e Zimmie (1996) os resultados de permeabilidade executados nos resíduos de papel são altamente dependentes do teor de umidade na moldagem e são similares aos resultados obtidos em argilas compactadas.

Cabral et al. (2002) determinaram em laboratório os valores de condutividade hidráulica para os resíduos estudados, variando as cargas aplicadas e as umidades das amostras. Concluíram que o teor de umidade é responsável pelas mudanças na condutividade hidráulica dos resíduos. Para os corpos de provas ensaiados a umidades menores do que a ótima, a condutividade hidráulica foi várias ordens de magnitude maior do que a dos demais. Conforme Kraus et al. (1997), os resíduos devem ser compactados a teores de umidade de 50 a 60% maiores do que a ótima para atingir a mínima condutividade hidráulica.

Moo-Young e Zimmie (1996) realizaram ensaios em permeâmetro de parede flexível para determinar a permeabilidade unidimensional dos resíduos estudados sob uma tensão efetiva de 34,5 kPa e determinaram uma correlação entre o conteúdo orgânico, O_c (%) e a permeabilidade, k (cm/s) dada por: $O_c = -5,5 \log k$. Os lodos foram moldados a um mesmo teor de umidade, implicando na diminuição da permeabilidade com a diminuição do conteúdo orgânico. Valores médios de permeabilidade variaram de 2×10^{-8} a 2×10^{-7} cm/s.

2.1.5 Características de Adensamento

Com o objetivo de estudar a influência do teor de umidade na compressibilidade dos resíduos, Moo-Young e Zimmie (1996) realizaram ensaios de compressão edométrica com valores de umidade inicial variando entre 106 e 190%. Com os ensaios obtiveram a variação dos índices de vazios para diferentes tensões aplicadas e observaram que o índice de compressão (C_c) aumentou com o acréscimo do teor de umidade inicial.

Teixeira (2002) também empregou o ensaio para a determinação dos parâmetros de compressibilidade do resíduo estudado. A Tabela 2.2 apresenta os dados das amostras submetidas ao ensaio de adensamento, com índices de compressão determinados para intervalos de carregamento de 100 kPa a 1000 kPa.

Tabela 2.2: Características do resíduo estudado por Teixeira (2002) nos ensaios de adensamento

Amostra	Teor de umidade (%)	Peso específico seco (kN/m ³)	Índice de vazios	Índice de compressão
1	51	6,62	2,710	0,79
2	126	4,36	2,727	1,36
3	130	4,25	2,824	1,20
4	131	3,370	3,822	1,45
5	131	3,330	3,880	1,87
6	131	3,660	3,440	1,88

2.1.6 Características de Resistência

Moo-Young e Zimmie (1996) analisaram a resistência ao cisalhamento dos resíduos a partir de ensaios de compressão triaxial, adensados não-drenados. Os resultados obtidos apresentaram uma variação da coesão efetiva (c') de 2,8 a 9,0 kPa e uma variação no ângulo de atrito (ϕ') de 25° a 40°. Os autores sugerem que os resíduos ensaiados comportam-se como argilas normalmente adensadas. Entretanto, os valores de ângulo de atrito obtidos não são indicativos de um material com características de solos normalmente adensados. Os valores de ângulo de atrito obtidos são muito altos, próximos aos valores típicos de solos granulares compactados. Durante o adensamento, nos ensaios triaxiais, grandes variações de volume ocorreram nas amostras. Com relação à curva tensão deformação, o ponto de ruptura foi de difícil determinação. Os resíduos não apresentaram um ponto definido de ruptura. As variações de resistência observadas por Moo-Young e Zimmie (1996) foram atribuídas às variações no teor de umidade, às diferentes características de produção dos resíduos e ao teor de matéria orgânica. Os autores consideraram que o teor de fibras afeta a coesão medida.

Moo-Young e Zimmie (1996) também estão acumulando um considerável número de dados de campo a partir de ensaios *Vane Test*, que relacionam conteúdo orgânico, teor de umidade e tempo. Os autores relatam o emprego do resíduo de papel aplicado no sistema de cobertura de um aterro municipal em Massachusetts. O resíduo foi colocado em 1993 com um teor de umidade de 160% e a resistência medida em campo era de 15 kPa. Em 1997, no mesmo lugar da cobertura, o teor de umidade havia diminuído para 120% e a resistência, aumentado para 35kPa. O conteúdo orgânico havia diminuído muito pouco. Os autores consideram conservativo ignorar a decomposição orgânica do ponto de vista de projeto, pois, embora os resíduos de papel contenham nutrientes para microorganismos, a completa decomposição orgânica pode levar várias décadas ou até mesmo séculos para ocorrer.

Deste modo, pode-se compreender que enquanto a decomposição da matéria orgânica ocorre lentamente em *liners* de resíduo de papel, o índice de vazios diminui devido ao adensamento, e o que ocorre é a diminuição da condutividade hidráulica e o aumento da resistência com o tempo.

2.2 SISTEMAS DE COBERTURA – *COVER LINERS*

Neste item, pretende-se uma sucinta revisão em torno das principais informações e considerações sobre barreiras de contenção de cobertura de aterros de resíduos, ou *cover liners*, visto que pesquisas anteriores à esta dissertação destacam a aplicabilidade do resíduo em estudo como potencial impermeabilizante de cobertura de aterros de resíduos, vindo a substituir as camadas de argila compactadas comumente empregadas.

Um *liner* pode ser definido como sendo uma camada de um determinado material ou materiais que servem como barreira impermeável, utilizado com o objetivo de minimizar a infiltração de água para o interior de massas de resíduos (*liners* de cobertura ou *cover liners*) ou para controlar a liberação de efluente líquido do resíduo (*liners* de fundo ou *bottom liners*), evitando desta forma a contaminação de camadas subjacentes (Kalteziotis *et al*, 1994).

Segundo Daniel (1993), existem três tipos básicos de *liners*: *liners* naturais de argila, *liners* de argila compactada e *liners* de argila com geossintéticos, os GCL (*Geosynthetic clay liners*).

Os *liners* naturais de argila são formações naturais de baixa condutividade hidráulica, basicamente solos com grande parcela de argila. O maior problema deste tipo de *liner* é a condutividade hidráulica, que deve ser, na maioria dos casos, entre 1×10^{-8} e 1×10^{-9} m/s. A condutividade hidráulica destas camadas deve ser estudada através da combinação de testes de campo e de laboratório em amostras indeformadas (Daniel *et al*, 1984). Normalmente, recomenda-se a utilização de outros tipos de *liners* em função da dificuldade de avaliação da uniformidade da condutividade hidráulica em toda a camada de solo argiloso, como a combinação destas camadas de solo com outras formadas por materiais geossintéticos, por exemplo.

Segundo Daniel e Koerner (1993), com ênfase aos *cover liners*, destacam que seus princípios básicos devem ser corretamente entendidos pelos seus projetistas, visto que os mesmos não podem ser generalizados para todos os tipos de resíduos e aterros. Estes sistemas de cobertura deverão cumprir pelo menos uma das funções a seguir:

- separar os resíduos de plantas e animais;

- limitar a infiltração da precipitação para o interior do aterro;
- controlar a emissão de gases do aterro.

O projeto do sistema de cobertura é fortemente influenciado por fatores ambientais, que segundo Daniel e Koerner (1993), incluem:

- exposição a temperaturas extremas, inclusive a grandes profundidades;
- ciclos de molhagem e secagem;
- penetração de raízes de plantas, vermes, insetos e animais;
- recalques diferenciais causados pelo adensamento da massa do aterro ou do solo de fundação do aterro;
- carregamentos temporários ou permanentes (ex: armazenamento de materiais ou de solo);
- escorregamento dos taludes do sistema de cobertura;
- movimento de veículos;
- erosão causada pela chuva e pelo vento;
- permanentes mudanças de umidade causadas pela movimentação da água para dentro ou para fora da massa do aterro;
- alterações causadas pela volatilização do gás emitido pela massa de resíduos.

A maioria dos sistemas de cobertura é composta por múltiplos componentes, que podem ser agrupados em cinco categorias: camada superficial, camada de proteção, camada de drenagem, barreira impermeável e camada coletora de gases, sendo que um sistema de cobertura poderá não utilizar todos os componentes listados anteriormente, dependendo do tipo de resíduo.

O projeto de *liners* de cobertura, bem como a utilização ou não de todos os componentes de um sistema de cobertura depende do tipo de resíduo a ser isolado. Para resíduos perigosos, a EPA (1992) preconiza a utilização de um *liner* composto com geossintéticos, onde a camada compactada deve ter uma condutividade hidráulica de no máximo 10^{-9} m/s. Para materiais não perigosos, como os resíduos sólidos municipais, as normas especificam somente uma barreira à infiltração, não especificando o uso obrigatório de geossintéticos associados à camada de argila. Além disso, neste caso a camada de argila poderá apresentar uma condutividade hidráulica de até 10^{-7} m/s (Austin, 1992; Daniel e Koerner, 1995; Heineck, 2002).

Segundo Landreth (1990), o resíduo e o local em que o mesmo será depositado devem ser estudados e analisados, visto que diferentes condições climáticas podem influenciar na eficácia do *liner* de cobertura.

CAPÍTULO 3

PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O programa de ensaios foi elaborado com a intenção de atingir os objetivos estabelecidos para este trabalho. Estes objetivos consistem na caracterização do resíduo, a partir de uma abordagem geotécnica, e na identificação e avaliação dos parâmetros representativos do comportamento hidráulico e mecânico deste material. A intenção é que, a partir da análise dos resultados obtidos nos ensaios, seja feita uma avaliação do potencial de uso do resíduo como um material geotécnico alternativo.

Devido ao fato de ter sido dado um tratamento geotécnico ao resíduo, os ensaios do programa experimental compreenderam ensaios propostos para o estudo de solos, exceto aqueles voltados para a análise química e da microestrutura do material.

O programa experimental foi dividido basicamente em duas etapas. Fizeram parte da primeira, os ensaios de caracterização física e o ensaio de compactação. A realização deste último permitiu a definição dos parâmetros de moldagem dos corpos de prova ensaiados na etapa subsequente. Ainda foi contemplada nesta fase, uma análise da microestrutura do material por microscopia eletrônica de varredura.

Salienta-se que a primeira etapa foi também uma fase de reconhecimento do material, pois o mesmo apresentou características próprias que fizeram com que fossem necessárias algumas adaptações nas rotinas usuais dos ensaios propostos.

A segunda etapa foi composta pelos ensaios estabelecidos para analisar neste estudo o comportamento mecânico e hidráulico do resíduo. Para tal foram realizados ensaios de compressão edométrica, ensaios triaxiais de compressão axial não-drenados, e a medição da condutividade hidráulica durante os ensaios triaxiais. Paralelamente, ao decorrer desta fase, amostras de resíduos eram coletas na planta industrial em diferentes datas, e ensaiadas para a determinação de sua composição química. Segue-se agora com uma descrição mais detalhada deste programa experimental.

3.2 DESCRIÇÃO DO PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.2.1 Ensaios de Caracterização Física

A caracterização física do material se deu através da realização dos seguintes ensaios: Massa específica real dos grãos, Limites de Atterberg (Limite de Liquidez e Limite de Plasticidade) e Determinação da umidade.

Estes ensaios seguiram os procedimentos descritos pelas respectivas normas: NBR 6508 (ABNT, 1984); NBR 6459 (ABNT, 1984); NBR 7180 (ABNT, 1984) e NBR 6457 (ABNT, 1986).

3.2.2 Ensaio de Compactação

O ensaio de compactação fez parte da primeira fase do programa experimental. Teve o objetivo de definir a relação entre diferentes teores de umidade e os respectivos valores de massa específica seca atingidos para o material quando compactado sob uma energia Proctor normal, segundo a norma NBR 7182 (ABNT, 1986).

A relação definida através do ensaio também serviu como base para a escolha dos parâmetros de moldagem dos corpos de prova ensaiados na segunda fase do programa.

3.2.3 Análise por Microscopia Eletrônica de Varredura

A análise através da utilização de Microscópio Eletrônico de Varredura foi feita num sentido exploratório, com o objetivo de verificar a microestrutura do material e o aspecto morfológico das partículas. Consistiu da análise das imagens do material visualizadas em microscópio, e da verificação quantitativa da composição química elementar de alguns elementos identificados nas amostras.

3.2.4 Estudo do Comportamento Mecânico e Hidráulico do Resíduo

3.2.4.1 Ensaio de Compressão Edométrica

Os ensaios de compressão edométrica tiveram como objetivo verificar os parâmetros de compressibilidade do resíduo, caracterizados pela velocidade e magnitude das deformações quando o mesmo é lateralmente confinado e axialmente carregado e drenado.

A variável estabelecida para os ensaios foi a umidade. Definiram-se três diferentes teores de umidade para moldagem dos corpos de prova, que são: 190 %, 160 % e 130 %. Estes valores são elevados, mas coerentes devido à elevada umidade inicial inerente ao material, que é de aproximadamente 256 %. Ressalta-se que essas umidades pretendidas nem sempre foram atingidas durante a moldagem, mas valores próximos aos estabelecidos. Destaca-se que a umidade dos corpos de prova está diretamente ligada aos valores de peso específico aparente seco e índice de vazios atingidos. No próximo capítulo é dado maior ênfase a este aspecto da moldagem dos corpos de prova.

3.2.4.2 Ensaio Triaxiais com Medição da Condutividade Hidráulica

Os ensaios triaxiais convencionais adensados isotropicamente com ruptura não-drenada (CIU) foram realizados para investigar os parâmetros relacionados à resistência do material de estudo. As variáveis estabelecidas para o programa de ensaios foram a umidade de moldagem dos corpos de prova e as tensões efetivas médias iniciais. Os valores de umidades definidos foram os mesmos que para os ensaios de compressão edométrica, ou seja: 130 %, 160 % e 190 %. Apenas valores próximos aos estabelecidos foram atingidos devido às peculiaridades da moldagem. As tensões efetivas médias iniciais atingidas encontram-se em um intervalo de 18 kPa a 95 kPa.

Foram escolhidos ensaios triaxiais do tipo CIU devido ao fato destes, quando monitorada a geração de poro-pressão, permitirem a determinação da envoltória de resistência em termos de tensão efetiva, num prazo muito menor do que os ensaios drenados.

Foram escolhidos baixos valores de tensões efetivas médias de ensaio por serem representativos das baixas tensões de confinamento que se fazem presentes nas condições de campo para o tipo de aplicação proposto.

Durante os ensaios triaxiais foram realizadas medições da condutividade hidráulica dos corpos de prova. Essas leituras realizaram-se antes da fase de cisalhamento das amostras. A análise da condutividade hidráulica, para diferentes umidades de moldagem, sob diferentes tensões efetivas, permitiu estabelecer algumas relações sobre o comportamento hidráulico do material.

3.2.5 Análise da Composição Química do Resíduo

3.2.5.1 Determinação do Teor de Matéria Orgânica

Foram feitas determinações dos teores de matéria orgânica do resíduo estudado para amostras coletadas em diferentes datas. Além de se obter a porcentagem de matéria orgânica presente no material, a análise foi realizada para verificar a variabilidade da composição do

resíduo gerado ao longo do período de estudo. Foram utilizadas amostras de quatro diferentes datas, coletadas com um intervalo de tempo de dois meses. As análises das amostras foram feitas em duplicatas.

3.2.5.2 Análise por Fluorescência de Raios-X

A análise por fluorescência de raios-x foi realizada com o objetivo de identificar as composições químicas para os elementos presentes no material, e suas concentrações. Esta análise teve um caráter exploratório.

CAPÍTULO 4

MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 MATERIAIS UTILIZADOS

4.1.1 Resíduo da reciclagem de papel

O resíduo estudado neste trabalho foi fornecido por uma fábrica recicladora de papel, situada na cidade de Gravataí, no estado do Rio Grande do Sul, Brasil. A produção média de resíduo nesta indústria é de 13 m³ diários. A geração é de 1 m³ para cada tonelada de papel produzido. O processo industrial de reciclagem de papéis (arquivo branco e apara mista) se dá sem a utilização de matéria-prima virgem.

O resíduo apresenta-se como um lodo e sua umidade bastante elevada é de 256 %.

O material a ser reciclado, inicialmente passa por uma etapa de desagregação e posteriormente por etapas classificatórias, que são fases de limpeza por decantação, onde são retirados grampos e possíveis plásticos existentes na massa. A partir deste momento, a massa remanescente passa por etapas de preparação e recuperação de fibras, da onde resultam uma pasta final e o efluente. A pasta final segue para laminação por prensagem para a produção do papel reciclado, e o efluente segue para um ponto de armazenamento diário na planta industrial. Na Figura 4.1 (a), (b) e (c) observam-se respectivamente imagens dos processos de preparação da massa, recuperação de fibras e o armazenamento do resíduo na planta industrial.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.1: (a) Preparação da massa (b) Recuperação de fibras (c) Armazenamento do resíduo

O rejeito do processo industrial é o material de estudo, composto por fibras (microfibras de celulose), água e cargas minerais.

Embora as fibras sejam recuperadas ao máximo ao longo do processo de reciclagem, retornando ao ciclo sempre que possível, ainda encontram-se em grande quantidade no lodo residual.

As cargas minerais são utilizadas como *filler* na fabricação do papel. Normalmente a combinação de diferentes cargas é adicionada à matéria prima principal, no caso a celulose, para incorporar suas propriedades físicas à mistura, tais como: densidade, resistência mecânica, textura, distribuição superficial, capacidade de adsorção de tintas e impermeabilidade.

Além das cargas minerais, colas sintéticas são utilizadas na fabricação de papel, e têm a função de preencher os vazios entre as fibras e aglomerados de celulose. As fibras de celulose são obtidas pela desagregação mecânica e termoquímica da madeira reduzida a cavacos. No Brasil utiliza-se principalmente a madeira de eucalipto para a extração das fibras (Moreira, 1994).

As cargas minerais presentes no lodo residual vão depender do tipo de papel que está sendo tratado para reciclagem. Entende-se que a grande parcela de cargas que entra no processo está presente no resíduo, pois não são consumidas na fabricação de papel absorvente, que é a qualidade de papel fabricado na indústria em questão.

As principais cargas utilizadas para papel são a caulinita e o carbonato de cálcio, além de talco e gesso em certos casos (tipos especiais de papéis). Na Europa e Estados Unidos o uso predominante é do carbonato de cálcio (CaCO_3), em torno de 60 % do total, enquanto no Brasil utiliza-se quase que exclusivamente a caulinita, mais de 90 % (Moreira, 1994).

Os componentes presentes no lodo são responsáveis pelas propriedades que o resíduo apresenta enquanto material de estudo, portanto, um breve entendimento do processo de geração do resíduo foi aqui relatado.

4.1.2 Água

A água de moldagem dos corpos de prova é a própria água contida no resíduo, cuja umidade é de 256 %.

Para os ensaios de caracterização física, compressão edométrica e ensaios triaxiais, quando da necessidade de utilização de água, empregou-se água destilada.

4.2 MÉTODOS UTILIZADOS

4.2.1 Coleta e Preparação do Material

O resíduo depois de coletado era levado ao Laboratório de Resíduos e Geotecnia Ambiental (ENVIRONGEO) da UFRGS, onde quase que totalidade dos experimentos foram desenvolvidos.

Em laboratório o resíduo era embalado em sacos plásticos, com capacidade de cinco litros, devidamente identificados com o número da coleta e data. Os sacos plásticos por sua vez eram acondicionados em um refrigerador à baixa temperatura para que fosse conservada a umidade inicial do material e fosse evitado o processo de decomposição da matéria orgânica, que acontecia espontaneamente se o material fosse mantido em condições anaeróbias e à temperatura ambiente. Muitas vezes, mesmo quando acondicionado da maneira descrita, o processo de decomposição ocorria, mas apenas nas porções de material que ficavam mais ao fundo dos sacos. Quando esse tipo de evolução ocorria, normalmente após algumas semanas de armazenamento, era visível o escurecimento do material bem como o surgimento de um cheiro forte característico. O processo de decomposição da matéria orgânica com o tempo ocorre devido à presença das fibras celulósicas que são fonte de carbono para os microorganismos.

O material era passado na peneira de abertura 4,75 mm, para se obter amostras homogêneas, e acondicionado sem secagem prévia, ou seja, com o teor de umidade inicial. Não se procedeu a secagem prévia do material porque o mesmo, depois de seco, forma grumos resistentes que mesmo com adição água, não se consegue mais homogeneizar. Além disso, caso o material fosse seco e destorroado, estaria-se alterando sua estrutura, pois as fibras seriam danificadas durante o destorroamento.

Para os ensaios de caracterização física e compactação utilizou-se o material peneirado à umidade inicial.

Para a moldagem dos corpos de prova, secou-se o material até atingir a umidade desejada. Isto foi feito expondo-se ao ar uma quantidade de material de massa e umidade conhecidas e controlando-se o peso.

Durante a exposição ao ar, utilizavam-se bandejas que permitissem uma boa área de exposição do material, sem acúmulo, e eram feitos vários revolvimentos do material, para que ele fosse secando de maneira homogênea.

Quando exposto ao ar, sem passar pelo processo de peneiramento, o material apresenta a tendência natural de formar grumos de tamanhos variados, que dependem da disposição aleatória das fibras. Observa-se claramente este comportamento na Figura 4.2 (a) que se segue. Na figura 4.2 (b) apresenta-se o resíduo depois de peneirado.



(a)



(b)

Figura 4.2: (a) Resíduo no estado natural (b) Resíduo úmido peneirado na abertura 4,75 mm

Para o ensaio de microscopia e a determinação do teor de matéria orgânica procedeu-se a preparação das amostras com a secagem e destorroamento do material, e ao final, com a passagem do mesmo na peneira de abertura 0,074 mm (n° 200).

A Figura 4.3 (a) apresenta o processo de destorroamento do material e a Figura 4.3 (b) a comparação do resíduo seco antes e após o peneiramento.

Ressalta-se neste momento mais uma característica do material, que é a resistência adquirida pelos grumos quando secos, percebida pelo significativo grau de dificuldade encontrado no processo de destorroamento.



(a)



(b)

Figura 4.3: (a) Destorroamento do resíduo (b) Resíduo seco antes e após o destorroamento

4.2.2 Preparação dos Corpos de Prova

O material para moldagem dos corpos de prova era pesado com precisão de 0,01 g. A moldagem dos corpos de provas para os ensaios triaxiais foi feita em moldes tri-partidos de 50 mm de diâmetro por 100 mm de altura. As amostras foram compactadas estaticamente em três camadas, controlando-se o peso de material adicionado, de forma a se obter os parâmetros de umidade e densidade desejados, os quais foram determinados pela construção da curva de compactação com energia Proctor Normal.

Devido ao elevado teor de umidade de moldagem, na compactação estática dos corpos de prova havia sempre perda de água pelas arestas e fundo do molde tri-partido, alterando desta forma a umidade que se pretendia manter.

Realizaram-se então alguns testes e verificou-se que o material utilizado para a moldagem deveria estar com uma umidade em torno de 5 % acima daquela que se pretendia atingir. Foi a forma encontrada de se obter aproximadamente os valores de umidades pretendidos, já que não se adicionava água na moldagem devido à dificuldade em se homogeneizar a mistura.

Por este motivo, as umidades nem sempre foram exatamente as pretendidas, mas giraram em torno destes valores. Conseqüentemente, o mesmo ocorreu com os valores das densidades atingidas, que acabavam alterados em função da variação da umidade. De todo modo, a discrepância destes valores em relação aos estabelecidos, não foi maior do que 4 %.

Durante as moldagens dos corpos de prova, observou-se mais uma peculiaridade do material, que é a capacidade de retornar uma parcela da deformação imposta sobre ele.

Assim que era compactada a última camada de material, aliviava-se o peso do cilindro compactador, ou seja, a amostra estava contida no molde, e aliviava-se em uma direção o peso que confinava o material, e o que acontecia é que o corpo de prova expandia nesta direção liberada, mostrando que as fibras impõem ao material uma tendência de retornar ao arranjo original, comportando-se como um material elástico.

A deformação de expansão chegou muitas vezes a um valor de até 2 % da altura inicial do corpo de prova.

Observa-se na Figura 4.4 os aspectos que foram acima expostos, ou seja, na imagem (a) visualiza-se a perda de água ao longo da moldagem, bem como o limite da terceira camada compactada, e na imagem (b) a parcela de material que expandiu após o alívio do peso de compactação.

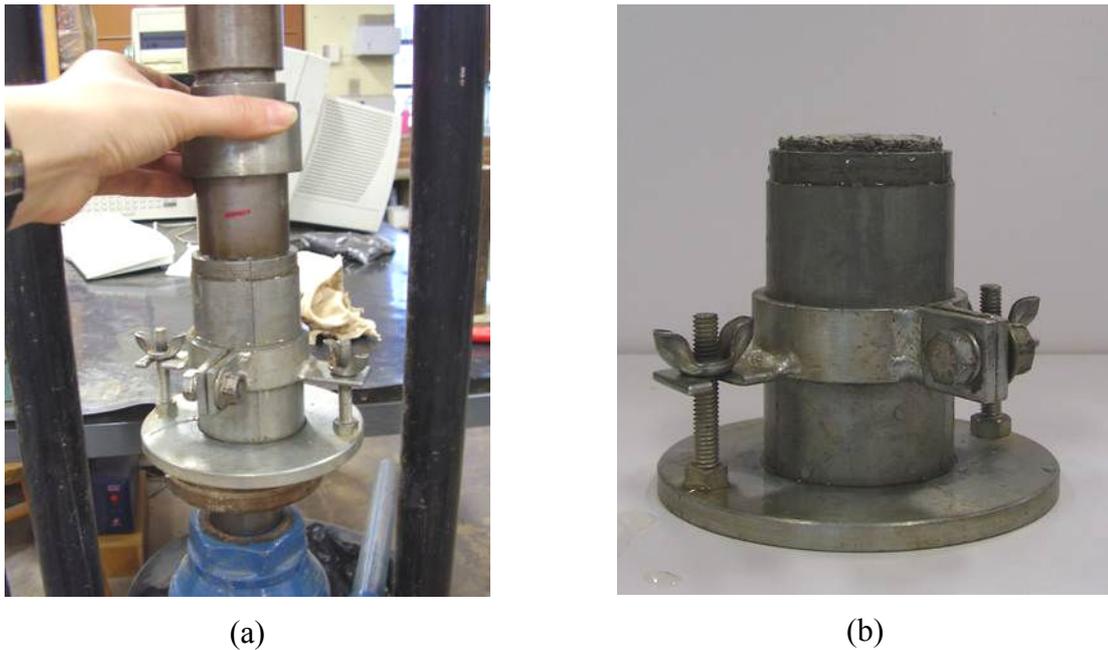


Figura 4.4: (a) Moldagem de corpo de prova (b) Expansão da altura do corpo de prova

Devido a estas particularidades ocorridas durante a moldagem dos corpos de prova, procedeu-se da seguinte maneira: o peso das camadas era calculado para se atingir os parâmetros de umidade e densidade desejados, utilizando-se uma umidade em torno de 5 % acima daquela que se pretendia. Tinha-se então o peso total inicial do corpo de prova. Tomava-se o cuidado para que não houvesse nenhuma perda de material durante a moldagem, exceto a água. Após a moldagem, pesava-se o corpo de prova, e o peso de água que saía era descontado do peso inicial da soma das camadas. Assim, tinha-se a umidade na qual realmente encontravam-se os corpos de prova. Além disso, antes da moldagem retiravam-se cápsulas com amostras para a verificação da umidade do material, e caso necessário, recalculavam-se os valores. Imediatamente após a pesagem dos corpos de provas, procedia-se a verificação de suas dimensões, com precisão de 0,01 cm e logo após, encaminhavam-se os mesmos para os ensaios de interesse.

Para os ensaios de compressão edométrica procedeu-se a moldagem de corpos de prova de forma semelhante a dos ensaios triaxiais, com a diferença de que eram compactados em apenas uma camada diretamente no anel de confinamento, com a densidade controlada através do peso de material e sua altura dentro do anel.

4.2.3 Ensaio de Caracterização Física

A caracterização física do material se deu pela realização dos seguintes procedimentos:

A determinação da massa específica real dos grãos baseou-se na norma NBR 6508 (ABNT, 1984).

Os limites de Atterberg (limite de liquidez e limite de plasticidade) seguiram as normas NBR 6459 (ABNT, 1984) e NBR 7180 (ABNT, 1984) respectivamente.

A determinação da umidade foi feita de acordo com a norma NBR 6457 (ABNT, 1986).

Estes ensaios seguiram os procedimentos descritos para solos. A essência dos ensaios não foi mudada, apenas o que foi tratado de forma diferente da prática corrente foi a preparação das amostras. Os ensaios foram realizados com material à umidade inicial, passado na peneira de abertura 4,75 mm para se ter amostras homogêneas.

Não foi adicionada água para misturar e homogeneizar o material durante os ensaios de determinação dos limites de Atterberg. Ao longo das determinações a umidade do material diminuía gradativamente, de modo a se ter as repetições necessárias para diferentes umidades.

A temperatura da estufa utilizada na determinação da umidade das amostras destes ensaios, bem como todas as determinações de umidade ao longo do programa experimental, esteve entre 60° e 75° C, para se evitar a queima de matéria orgânica .

4.2.4 Ensaio de Compactação

O ensaio de compactação foi realizado com energia Proctor Normal, baseando-se nos procedimentos descritos pela norma NBR 7182 (ABNT, 1986), para a determinação da relação entre os parâmetros de umidade e massa específica seca do material.

Iniciaram-se os ensaios com as amostras à umidade natural, passadas na peneira de abertura 4,75 mm. Diferentemente da prática comum, não se empregou a adição de água para a compactação, mas utilizou-se o resíduo a diferentes umidades ao longo do ensaio.

O ensaio foi realizado com reuso de material e partiu do estado úmido para o seco da curva. Procedeu-se assim devido ao elevado teor de umidade inicial do material e pelo motivo de que após seco, o mesmo forma grumos resistentes, não sendo eficiente a adição de água.

Após a compactação no cilindro de moldagem, e realizadas as medições necessárias, o material era desagregado, e passado novamente na peneira, de modo que, ao longo da determinação de diferentes pontos, a umidade do material se tornava cada vez menor.

4.2.5 Análise por Microscopia Eletrônica de Varredura

A análise da microestrutura do material foi realizada no Centro de Microscopia Eletrônica da UFRGS em um microscópio eletrônico de varredura JEOL, modelo JSM 5800.

Para a realização do ensaio, as amostras foram afixadas com uma fita adesiva do tipo dupla face em lâminas delgadas de vidro. Cada conjunto amostra-lâmina passou inicialmente por uma metalização com carbono, mas para melhorar as condições de trabalho, ainda sofreram uma metalização a ouro que proporcionou a condução elétrica necessária.

Após a metalização, as amostras foram levadas ao microscópio.

Conforme metodologia descrita por Marcon (2005), o princípio de funcionamento do microscópio eletrônico consiste em dirigir um feixe de elétrons acelerado por um campo elétrico, para a superfície de uma amostra em observação, em um ambiente com vácuo. O feixe de elétrons, chocando-se contra a superfície da amostra, distribui-se irregularmente. Uma parte dos elétrons é refletida, enquanto outra parte penetra a uma pequena profundidade da superfície, sendo posteriormente defletidos de volta à superfície da amostra com energia suficiente para escaparem desta. Parte destes elétrons é recebida por um coletor e transformados em energia luminosa por um cintilador. A luz proveniente do cintilador é levada a um fotomultiplicador e um amplificador de vídeo, que transformam a energia

luminosa em energia elétrica. Um tubo de raios catódicos reproduz a imagem da área observada da amostra, em função da varredura do feixe de elétrons na superfície da amostra.

As imagens analisadas foram reproduzidas com faixas de magnificação de 200, 160 e 90 vezes, o que permitiu observar a microestrutura do material a níveis de 100, 200 e 250 μm .

Para cada imagem foi realizada uma análise química dos elementos presentes em pontos demarcados na amostra pelo sistema de espectroscopia por energia dispersiva (EDS – *Energy Dispersive Spectroscopy*).

O espectrômetro de energia dispersiva acoplado ao microscópio permite a análise de composição química dos materiais visualizados. A análise é efetuada pela medição da energia e distribuição de intensidade de sinais de raios-X gerados por uma corrente de elétrons aplicada em determinado ponto do material em análise. A corrente de elétrons gerada pelo microscópio eletrônico e direcionada à superfície a ser analisada, ao atingi-la, gera um fluxo de raios-X a partir do contato do fluxo de elétrons com os átomos do material analisado. O nível de energia dos raios-X emitidos é característico de cada elemento químico constituinte do material. O equipamento EDS coleta os raios-X emitidos, identifica a quantidade de raios e o nível de energia de cada um, automaticamente identificando os elementos presentes. O espectro de energia de raio-X processado pelo espectrômetro varia de 0 a 10 keV. Cada elemento apresenta um valor específico de energia. Pela posição no eixo que representa o nível de energia, é determinado o elemento presente. O eixo de contagem indica a quantidade de raios-X captados em cada ponto do espectro de energia. Desta maneira, os elementos mais abundantes na amostra apresentam uma maior contagem e, portanto, maiores picos no gráfico. O *software* responsável pela aquisição e interpretação dos dados fornece os elementos químicos encontrados, bem como a concentração de cada elemento em cada ponto analisado (Marcon, 2005).

4.2.6 Ensaios de Compressão Edométrica

Os ensaios de compressão edométrica foram realizados seguindo as recomendações do método de ensaio MB 3336 (ABNT, 1990).

Para a execução dos ensaios edométricos foi utilizada uma prensa de adensamento convencional da marca Wykekam Farrance, a qual pode ser visualizada na Figura 4.5 a seguir.



Figura 4.5: Prensa de adensamento

Em linhas gerais, os ensaios seguiram a seguinte rotina:

Depois de moldada a amostra no anel, cujas dimensões são 50 mm de diâmetro e 19 mm de altura, colocava-se este conjunto na célula de adensamento (ou consolidômetro), apoiando-se o mesmo sobre pedra porosa e papel filtro. A seguir, colocava-se sobre o corpo de prova mais anel, outro papel filtro seguido do *top cap*, o qual já continha uma pedra porosa acoplada. Tomava-se o cuidado para que as pedras porosas e papéis filtros, quando posicionados na célula de adensamento, já estivessem devidamente saturados.

Na seqüência, instalava-se a célula de adensamento na prensa e realizava-se a sua inundação. Posicionava-se o extensômetro na leitura máxima para medição do deslocamento vertical e faziam-se os ajustes necessários para o nivelamento dos componentes (braço de alavanca, pendural de pesos e consolidômetro). Esperava-se para o início do carregamento um período de no mínimo 12 horas, para garantir a saturação do corpo de prova.

O primeiro estágio de carregamento correspondia à tensão vertical σ_v de 6,25 kPa e os incrementos subsequentes possibilitavam a aplicação das seguintes tensões: 12,5 kPa, 25 kPa, 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa e 400 kPa.

Cada estágio de carregamento tinha a duração de 24 horas. Neste período eram feitas as leituras do deslocamento vertical nos tempos indicados pela seguinte seqüência: zero, 7", 15", 30", 1', 2', 4', 8', 15', 30', 1 h, 2 h, 4 h, 8 h e 24 h. Ao final de cada estágio, iniciava-se imediatamente o próximo, sendo a leitura de vinte e quatro horas correspondente à leitura de tempo zero do estágio seguinte.

A Figura 4.6 apresenta o detalhe da célula de adensamento contendo o anel com o corpo de prova durante a aplicação de carga pelo sistema de carregamento axial. Observa-se o afundamento do *top cap* devido à diminuição da altura do corpo de prova ao longo do ensaio.



Figura 4.6: Detalhe da célula de adensamento

Ao final dos estágios de carregamento, iniciava-se a remoção de pesos na seqüência inversa dos valores das tensões aplicadas, deixando-se para cada valor de tensão aplicada, um período de duas horas.

Ao final do ensaio realizavam-se as verificações do peso e umidade do corpo de prova.

Com os índices físicos do material, e as leituras realizadas ao longo dos ensaios, estabeleceram-se relações entre os índices de vazios com o tempo e as tensões aplicadas.

Para cada tensão vertical aplicada, traçaram-se curvas da variação da altura do corpo de prova *versus* raiz quadrada do tempo, para a determinação do coeficiente de adensamento (C_v) através do método de Taylor. Traçaram-se também as curvas índice de vazios *versus* o logaritmo da tensão vertical para a determinação dos índices de compressão (C_c), descompressão (C_d) e recompressão (C_r), dados pelos coeficientes angulares dos trechos lineares das curvas de carregamento, descarregamento e recompressão, respectivamente. As tensões de pré-adensamento $\sigma_v'm$ foram calculadas pelo processo de Pacheco Silva.

4.2.7 Ensaios Triaxiais e Medição da Condutividade Hidráulica

Os ensaios triaxiais do tipo CIU foram realizados em um equipamento descrito por Carraro (1997). Os procedimentos gerais adotados na preparação e execução dos mesmos seguiram a metodologia já consolidada no Laboratório de Resíduos e Geotecnia Ambiental (ENVIRONGEO) da UFRGS, a qual segue os princípios descritos por Bishop e Henkel (1962) e Head (1980).

A aparelhagem utilizada para a execução dos ensaios consiste em: equipamento triaxial da marca Geonor, sistema de aplicação de pressão, transdutores de pressão da marca Sodemex, transdutor de deslocamento linear da marca Gefran, sensor de efeito Hall, célula de carga da marca Kratos, um conversor analógico/digital (data-logger) da Helwett Packard e um microcomputador para o processamento das leituras. Para a medição externa da variação volumétrica do corpo de prova utilizou-se um transdutor tipo Imperial College. Durante os ensaios, a poro-pressão, medida na base do corpo de prova, e a pressão confinante eram monitoradas através de dois transdutores de pressão acoplados à base da câmara triaxial. A célula de carga utilizada para leitura da força axial tem capacidade de 10 kN e resolução de 0,005 kN. A Figura 4.7 apresenta uma visão geral destes equipamentos.



Figura 4.7: Visão geral dos equipamentos para ensaio triaxial

Depois de moldado o corpo de prova, este era instalado no pedestal da câmara triaxial, sobre papel filtro apoiado em pedra porosa, previamente saturados. A face superior do corpo de prova era coberta com papel filtro seguido de pedra porosa, também saturados, sobre os quais apoiava-se o *top cap*. Após, seguia-se imediatamente com a colocação da membrana de látex, a qual envolvia o corpo de prova e era fixada ao pedestal e ao *top cap* através de *o-rings*.

Tomava-se o cuidado de promover uma boa aderência da membrana ao corpo de prova. Para tal, aplicava-se ligeiramente uma pressão de sucção à base do corpo de prova. Seguia-se com a colagem do sensor de medição de deformação axial sobre a membrana previamente demarcada para recebê-lo. O sensor era ajustado ao intervalo da curva de calibração.

Destaca-se aqui a intenção inicial de realizar-se a medição da deformação axial com o auxílio do sensor de efeito Hall instalado diretamente sobre a membrana, mas devido às grandes deformações ocorridas durante a fase de adensamento, não foi possível aproveitar as leituras provenientes do sensor, pois as mesmas encontravam-se fora do intervalo de calibração. Por este motivo, a medição da deformação axial foi feita através do transdutor de deslocamento linear externo, o qual mede o deslocamento relativo entre a câmara triaxial e o pistão de carga.

Depois da instalação do corpo de prova, do fechamento da câmara triaxial, e do adequado posicionamento do conjunto pistão – célula de carga – transdutor de deslocamento linear externo, a câmara era preenchida com água destilada, através da conexão com um reservatório que servia ao ensaio. Visualiza-se na Figura 4.8 a câmara triaxial após instalação do corpo de prova.



Figura 4.8: Câmara triaxial e corpo de prova

Os ensaios triaxiais com medição da condutividade hidráulica foram realizados com seis etapas distintas: (1) percolação, (2) saturação, (3) adensamento, (4) medição da condutividade hidráulica antes do cisalhamento, (5) cisalhamento e (6) medição da condutividade hidráulica após o cisalhamento.

A primeira etapa, de percolação, era realizada com o objetivo de eliminar as bolhas de ar de dentro do corpo de prova e facilitar a sua saturação.

A percolação é feita usualmente, pela utilização do reservatório acoplado ao equipamento, posicionado a uma altura que permite a aplicação de uma pressão (pela altura da coluna d'água disponível) do valor de aproximadamente 12 kPa. É necessária a aplicação de uma tensão confinante para evitar o fluxo preferencial de água entre a membrana de látex e o

corpo de prova. Pelo sistema de aplicação de pressão, o equipamento permite um valor mínimo de tensão confinante próximo a 28 kPa.

Com a realização de um ensaio preliminar, observou-se que esta diferença de pressão de 16 kPa, mínima possível de ser aplicada, causava adensamento do corpo de prova, devido a sua elevada compressibilidade e baixa densidade inicial. Por isso, optou-se por submeter o corpo de prova a uma tensão efetiva mínima capaz de evitar, ou reduzir ao máximo, o adensamento nesta fase do ensaio. Isto permitiu que o cálculo do índice de vazios ao final do adensamento fosse mais preciso, pois apenas era necessário contabilizar a variação volumétrica da fase de adensamento.

Para se obter esta tensão efetiva menor, instalou-se um segundo reservatório (com menor altura de coluna d'água) que permitiu a aplicação de uma pressão de 7 kPa. Deste reservatório, partia-se com a percolação ao longo do corpo de prova no sentido da base para o topo, estando este último aberto à atmosfera para que fosse estabelecido o fluxo de água.

O primeiro reservatório, já existente, era utilizado para aplicar a tensão confinante. Estabeleceu-se assim, uma tensão efetiva em torno de 5 kPa na fase de percolação, cuja duração se dava até que fossem percolados no mínimo duas vezes o volume de vazios do corpo de prova.

A próxima fase era a saturação por contra-pressão, realizada com o objetivo de assegurar a dissolução completa das bolhas de ar e a saturação do corpo de prova. Nesta etapa, estágios de incrementos de tensão de 5 kPa na tensão confinante e na contra-pressão eram aplicados pelo sistema de aplicação de pressões, mantendo-se uma tensão efetiva constante de aproximadamente 5 kPa. Quando a poro-pressão, monitorada na base do corpo de prova, equalizava-se com a contra-pressão aplicada no topo, um novo incremento era feito.

Os incrementos eram feitos até que se atingisse a saturação do corpo de prova, controlada pela medição do parâmetro B (Skempton, 1954). O valor do parâmetro B era medido da seguinte forma: fechava-se a entrada da pressão pela linha de topo e aplicava-se o incremento na tensão confinante. Media-se então a variação da poro-pressão na base do corpo de prova. O parâmetro B era calculado pela divisão do excesso de poro-pressão gerado pelo acréscimo de tensão confinante. Quando a variação da poro-pressão é igual ao acréscimo de

tensão confinante aplicada, B é igual a 1, indicando uma saturação de 100 % do corpo de prova. As verificações do valor do parâmetro B eram realizadas, e quando este atingia valores entre 0,96 e 0,98 era encerrada a fase de saturação.

Terminada a fase de saturação, aumentava-se a tensão confinante até que a tensão efetiva atingisse o valor em que o ensaio seria conduzido, procedendo-se a fase de adensamento. Através da medição da variação volumétrica do corpo de prova ao longo desta fase, calculava-se o índice de vazios após adensamento.

Como foi dito anteriormente, os ensaios também compreenderam medições do coeficiente de condutividade hidráulica (k) do material, antes da fase de cisalhamento dos corpos de prova. Tavenas *et al* (1983) descrevem o uso do equipamento triaxial como um permeâmetro, da forma como foi utilizado neste trabalho.

As medições de condutividade hidráulica foram realizadas com gradiente hidráulico constante de aproximadamente 10, conforme ASTM D 5084 (1990).

O sistema utilizado para a medição da condutividade hidráulica foi o de carga constante, o qual consiste em manter a carga hidráulica na entrada do corpo de prova constante.

Antes desta fase, ao corpo de prova estava sendo aplicada uma tensão efetiva igual à diferença entre o valor da tensão confinante e da contra- pressão aplicada no topo. Para se estabelecer o gradiente hidráulico, à base do corpo de prova aplicava-se o valor de contra-pressão que antes estava sendo aplicado ao topo, e deste diminuía-se a pressão de um valor de 10 kPa, obtendo-se um fluxo ascendente.

O cálculo do coeficiente de condutividade hidráulica baseou-se na Lei de Darcy. Para tal, a vazão da água através da amostra foi medida. O controle do volume de água que saía do corpo de prova era feito através do medidor de variação volumétrica externo, o qual é ligado à linha de drenagem de topo do equipamento, e o tempo de ensaio era cronometrado. Também se fazia uma medição da temperatura da água da câmara triaxial.

Após a medição de condutividade hidráulica, dava-se continuidade ao ensaio triaxial propriamente dito, seguindo-se com a fase de cisalhamento do corpo de prova.

Voltava-se aos valores de pressão aplicados na fase de adensamento, e prosseguia-se com um cisalhamento através de uma trajetória convencional, ou seja, pelo aumento da tensão axial, mantendo-se constante a tensão confinante.

A fase de cisalhamento era realizada com deformação controlada, sob velocidade de 0,0179 mm/min. Esta condição era mantida até que se atingissem deformações axiais próximas a 20 %, quando a prensa era desligada.

Para cálculo das tensões aplicadas, foram feitas correções de áreas. Pela observação do formato final dos corpos de prova, a correção considerada mais adequada para os valores de áreas foi a interpolação entre o valor de área média inicial e a área média final do corpo de prova. O valor inicial correspondia à área calculada após o adensamento, e o valor final era medido quando o corpo de prova era retirado da câmara triaxial ao final do ensaio.

Não foram feitas correções nas tensões em função da resistência imposta pela membrana de látex, por ser considerada de difícil avaliação e de magnitude irrelevante frente às baixas tensões de confinamento utilizadas nos ensaios.

4.2.8 Determinação do Teor de Matéria Orgânica

A determinação do teor de matéria orgânica para as amostras do material foi realizada conforme a norma NBR 13600 (ABNT, 1996).

As amostras inicialmente eram secas em estufas à temperatura de 100°C onde permaneciam por 24 horas. Após secas, as amostras eram colocadas em cadinhos para serem levadas à mufla. A espessura de material, no cadinho, não excedia 3 cm. A quantidade média de material colocada em cada cadinho era em torno de 10 g.

A balança utilizada para pesar o material tinha precisão de 0,001 g. As massas dos cadinhos, bem como as massas dos cadinhos com material, eram registradas. Os cadinhos eram levados à mufla e a temperatura era elevada gradativamente, 200°C por hora, até atingir 440°C, temperatura sob a qual ficavam mantidos por 12 horas. Ao final, registravam-se as massas dos cadinhos mais amostras e calculava-se o teor de matéria orgânica do material pela

expressão: $MO = (1-B/A)*100$, onde A é massa da amostra seca em estufa e B é a massa da amostra queimada em mufla. A Figura 4.9 apresenta os cadinhos com o material em mufla.



Figura 4.9: Cadinhos em mufla

4.2.9 Análise por Fluorescência de Raios-X

As amostras para análise por fluorescência de raios-x foram provenientes da queima a 440°C, quando da determinação do teor de matéria orgânica.

As análises foram realizadas no Centro de Estudos em Petrologia e Geoquímica do Instituto de Geociências da UFRGS conforme metodologia de ensaio apresentado em anexo nesta dissertação.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS E ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DO MATERIAL

5.1 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

Na primeira etapa do programa experimental foram realizados os ensaios de caracterização física do material. A caracterização física teve, além do caráter exploratório, o objetivo de identificar alguns índices físicos necessários a posteriores cálculos para os ensaios subsequentes. Os ensaios de caracterização física consistiram na determinação da massa específica real dos grãos, dos limites de Atterberg e da umidade natural do resíduo.

A Tabela 5.1 apresenta os resultados obtidos através dos ensaios de caracterização física.

Tabela 5.1: Índices físicos e de consistência do resíduo

Índice	Resultado
Massa Específica Real dos Grãos – G (g/cm^3)	1,862
Limite de liquidez – LL (%)	210
Limite de plasticidade – LP (%)	124
Umidade – ω (%)	256

Observam-se valores bastante elevados dos índices de consistência e da umidade, apresentando-se como uma característica inerente ao material.

Cabe-se ressaltar que estes índices foram determinados com o emprego de metodologias de ensaios descritos para solos, portanto, muitas vezes tiveram que ser adaptadas às características do material estudado. Principalmente no que se diz respeito aos índices de consistência, alguma dificuldade foi encontrada. Para a determinação do limite de liquidez, foi extremamente difícil conseguir abrir ranhuras no material de acordo com a espessura especificada pela norma, fator este padronizado e decisivo no resultado do ensaio. O arranjo aleatório das fibras presentes no material é responsável pela dificuldade encontrada na abertura das ranhuras.

Visualiza-se como a maior relevância da obtenção dos índices de consistência, o fato de poder-se utilizá-los como um elemento de comparação com outros resíduos já estudados na literatura, visto que eles não representam o que poderia ser o comportamento típico de um solo.

5.2 ENSAIO DE COMPACTAÇÃO

Como já foi dito no programa experimental, a primeira etapa do trabalho foi também um período de reconhecimento do material, o que influenciou diretamente na questão de como tratá-lo para sua utilização nos ensaios. Vários testes foram feitos na tentativa de melhor conduzir o ensaio de compactação e o que se definiu foi realizá-lo de uma forma diferenciada da prática usual.

As compactações eram feitas com o material a diferentes umidades, no sentido do ramo úmido para o seco da curva. À umidade original não foi possível se trabalhar, pois o material se comportava praticamente como um lodo.

O ensaio, a partir do qual se traçou a curva de compactação, levou mais de três semanas para ser realizado, pois foi necessário esperar-se que o material gradualmente diminuísse sua umidade, e de uma forma homogênea.

O ensaio de compactação com energia Proctor Normal permitiu a definição da relação entre a umidade e o peso específico seco do material, relação esta adotada para estabelecerem-

se os parâmetros de moldagem dos corpos de prova para os ensaios da próxima etapa do programa. A Figura 5.1 apresenta a curva de compactação obtida para o resíduo em estudo.

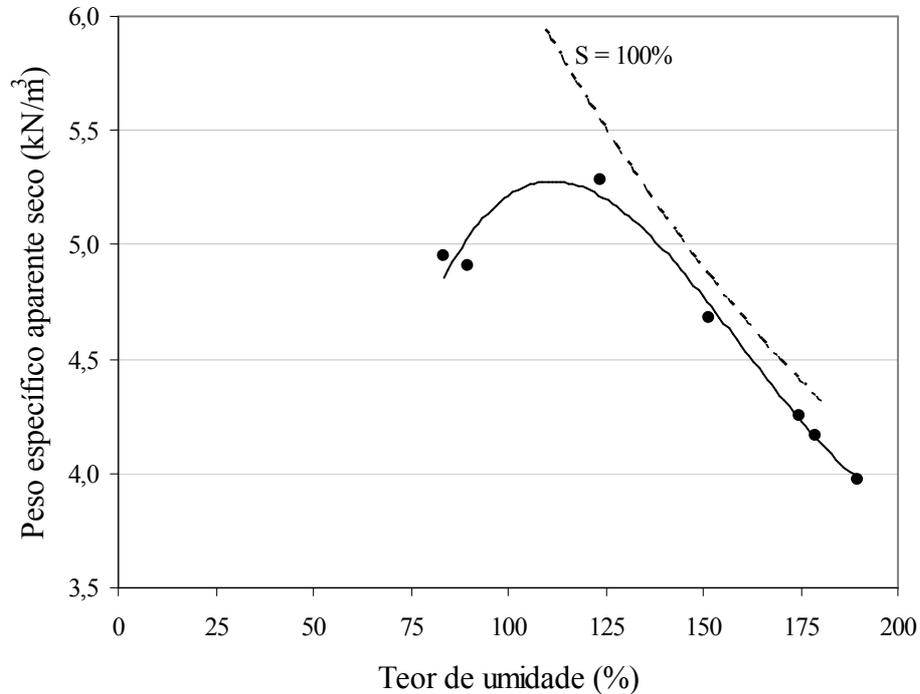


Figura 5.1: Curva de compactação Energia Proctor Normal

Os parâmetros de umidade ótima e peso específico seco máximo são de difícil obtenção. Estimou-se para tais, os valores de 110 % e 5,3 kN/m³ respectivamente. De todo modo, estes valores não foram utilizados como parâmetros de moldagem, pois já em torno deles, o material se encontra em uma condição de difícil trabalhabilidade. Além disso, em umidades próximas à ótima, não se consegue ter um bom controle deste parâmetro para se obter amostras homogêneas. A variação do teor de umidade é um fator de extrema importância, pois a umidade é a característica mais fundamental do comportamento deste material.

Apresentam-se dois corpos de prova retirados do cilindro Proctor de compactação para ilustrar o que foi exposto acima. A Figura 5.2 (a) apresenta um corpo de prova à umidade em torno de 150 %, na (b) observa-se um corpo de prova à umidade de 125 %, próxima da definida como ótima. Para umidades menores que esta última, após retirar-se do molde, os corpos de prova se desagregavam.



Figura 5.2: (a) Corpo de prova com umidade de aproximadamente 150 % (b) Corpo de prova com umidade de aproximadamente 125 %

Apresentam-se na Tabela 5.2 os parâmetros definidos para serem adotados na moldagem dos corpos de prova do programa experimental – ensaios de compressão edométrica e triaxiais. Destaca-se que devido às peculiaridades do material e moldagem, estes valores não foram atingidos, mas apenas valores próximos.

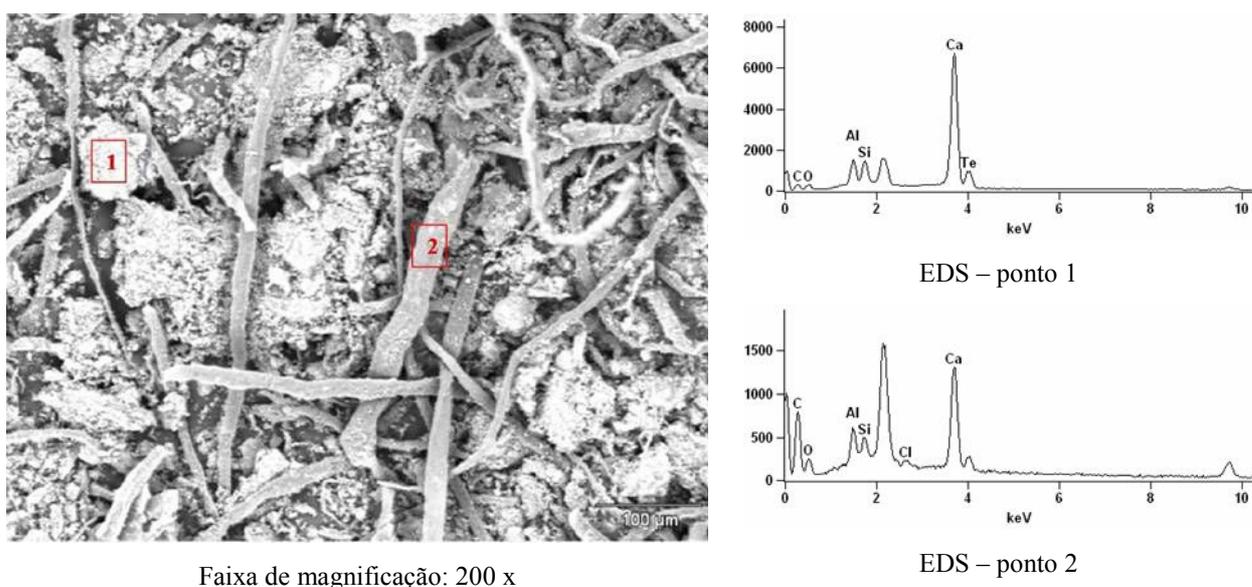
Tabela 5.2: Parâmetros almejados para a moldagem dos corpos de prova

ω (%)	γ_d (kN/m ³)
190	3,9
160	4,5
130	5,1

5.3 ANÁLISE POR MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

A análise em MEV (Microscópio Eletrônico de Varredura) foi feita no sentido exploratório, para que se pudesse visualizar a microestrutura e aspecto morfológico das amostras estudadas. Em cada imagem demarcaram-se alguns pontos, dos quais se realizou a verificação quantitativa dos componentes presentes pelo sistema de espectroscopia por energia dispersiva (EDS – *Energy Dispersive Spectroscopy*).

Seguem-se as Figuras 5.3, 5.4 e 5.5, nas quais são apresentadas imagens de microscopia, com pontos demarcados e os respectivos espectros. Seguem-se também as Tabelas 5.3, 5.4 e 5.5 correspondentes a cada figura. Nas tabelas constam as concentrações dos componentes identificados pelo sistema EDS.



Faixa de magnificação: 200 x
Figura 5.3: Imagem (1) do resíduo em MEV e espectros correspondentes

Tabela 5.3: Concentração dos componentes (%)

	CO ₂	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Cl	CaO	TeO ₂
Ponto 1	52.18	5.72	6.37		35.56	0.16
Ponto 2	90.35	2.02	2.23	0.24	5.16	

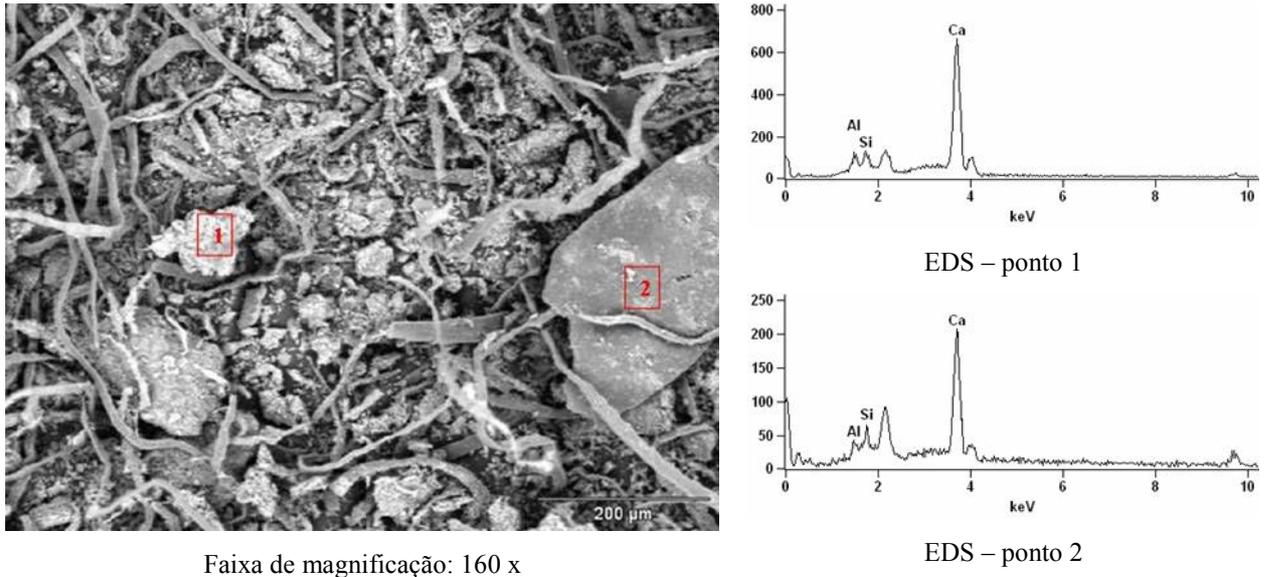


Figura 5.4: Imagem (2) do resíduo em MEV

Tabela 5.4: Concentração dos componentes (%)

	Al	Si	Ca
Ponto 1	6.69	8.50	84.81
Ponto 2	5.33	9.54	85.13

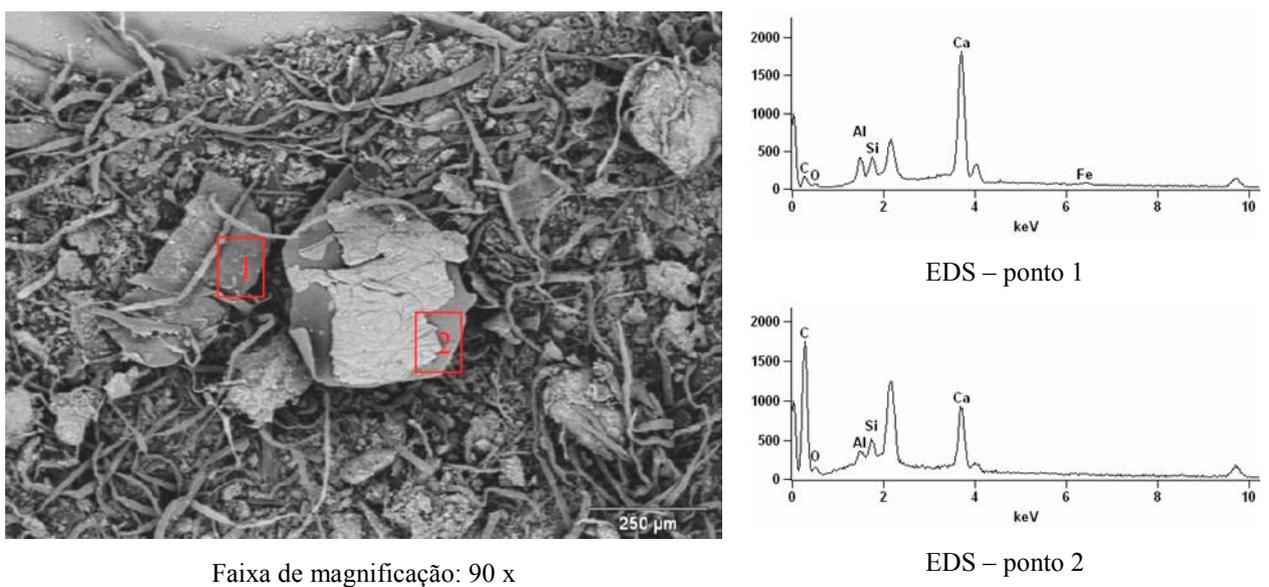


Figura 5.5: Imagem (3) do resíduo em MEV

Tabela 5.5: Concentração dos componentes (%)

	CO ₂	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	Fe ₂ O ₃
Ponto 1	96.69	0.53	1.06	1.72	
Ponto 2	63.94	4.13	4.20	26.98	0.75

Observa-se nas imagens de microscopia eletrônica de varredura apresentadas, regiões ocupadas por partículas tridimensionais, compostas por fibras e grãos, num arranjo que tende a assumir caráter de matriz.

As fibras aparecem dispostas de forma aleatória. Observam-se fibras de comprimento de até 600 μm . Fibras de comprimento menor que 100 μm agregam-se como se em torno de um núcleo. Observa-se também a presença de placas de carga mineral.

Nas composições apresentadas, observam-se óxidos de silício e alumínio em proporções semelhantes que sugerem a presença de caulinita $[\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4]$. Também se encontra óxido de cálcio, devendo indicar a presença do mineral calcita (CaCO_3). Estes valores guardam uma relação direta com a carga mineral que constituem os resíduos de papel, principais picos dos espectros obtidos.

5.4 COMPORTAMENTO MECÂNICO E HIDRÁULICO DO RESÍDUO

5.4.1 Ensaio de Compressão Edométrica

Os ensaios de compressão edométrica foram realizados com o objetivo de identificar os parâmetros de compressibilidade unidimensional do resíduo estudado: coeficiente de adensamento (C_v), índice de compressão (C_c), índice de descarregamento (C_d), índice de recompressão (C_r) e tensão de pré-adensamento (σ'_{vm}).

Como mencionado no capítulo anterior, os parâmetros de moldagem definidos não foram atingidos, apenas valores próximos. Apresenta-se então na Tabela 5.6, os parâmetros de moldagem e índices de vazios iniciais dos corpos de provas ensaiados nesta etapa, e para fins comparativos, os valores dos parâmetros ao final dos ensaios.

Tabela 5.6: Parâmetros iniciais e finais dos corpos de prova ensaiados

ω (%)		γ_d (kN/m ³)		e	
Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final
196	113	3,92	6,34	3,751	1,94
162	108	4,57	7,40	3,075	1,52
130	103	5,21	8,16	2,573	1,28

Durante os ensaios, desde o primeiro carregamento aplicado ao corpo de prova, observaram-se expressivas deformações, comportamento este repetido para todos os incrementos de carga, inclusive no último de 400 kPa.

Apresenta-se na Figura 5.6 o gráfico que relaciona o índice de vazios *versus* o logaritmo da tensão vertical aplicada para os três ensaios realizados.

É interessante observar que a amostra ensaiada a uma umidade inicial de 196 % praticamente não apresenta o trecho considerado como sendo o de recompressão. A partir da redução da umidade inicial de ensaio, pode ser verificada a existência do trecho de recompressão, bem como de uma tensão de pré-adensamento do material, o que ocorreu de forma mais expressiva para o ensaio realizado sob a menor umidade inicial ($\omega_i = 130$ %). Assim, observa-se um aumento gradativo de σ'_{vm} conforme a umidade inicial do ensaio decresce, chegando a 59 kPa para o caso do ensaio realizado com a menor umidade estudada ($\omega = 130$ %).

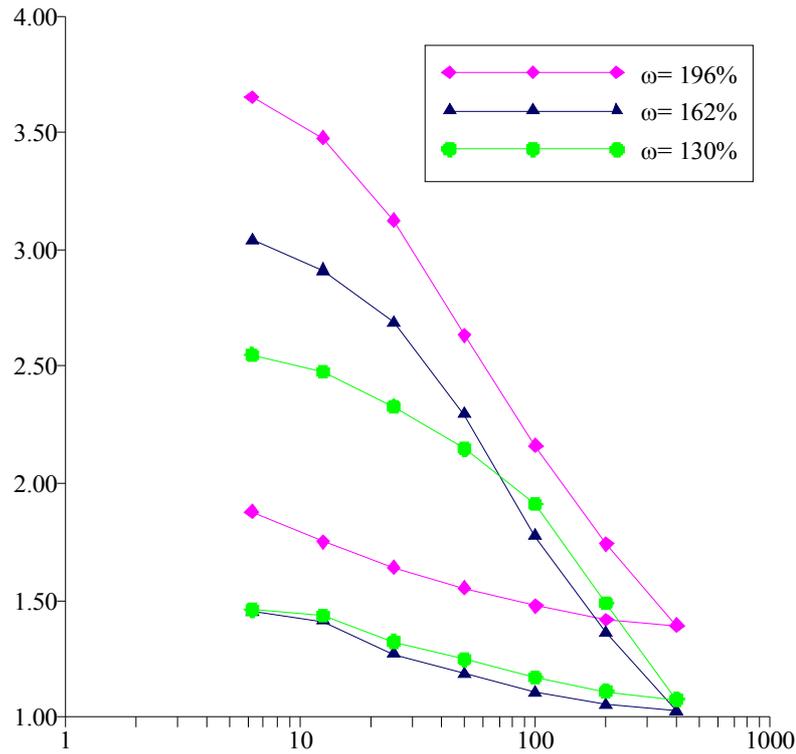


Figura 5.6: Índice de vazios *versus* logaritmo da tensão vertical

Conforme se observa também na Figura 5.6, os valores de C_c para as amostras ensaiadas sob diferentes umidades iniciais foram bastante semelhantes. Estes valores são considerados elevados (entre 1,384 e 1,546) se comparados a valores obtidos para algumas argilas brasileiras, podendo-se citar valores de C_c de 0,81 a 1,84 para argilas moles da cidade de Porto Alegre, estudadas por Soares (1997).

Em termos de coeficiente de descarregamento C_d , observa-se, assim como para valores de C_c , uma grande semelhança dos resultados para ensaios conduzidos sob diferentes umidades iniciais, ou seja, não foram observadas variações no coeficiente de descarregamento para diferentes umidades iniciais (ω_i). Os valores dos coeficientes de carregamento, descarregamento, recompressão e tensão de pré-adensamento são apresentados na Tabela 5.7.

Tabela 5.7: Coeficientes de compressibilidade de amostras ensaiadas sob diferentes ω_i

ω_i (%)	C_r	C_c	C_d	σ'_{v_m} (kPa)
196	-	1,528	0,275	-
162	0,424	1,546	0,265	22
130	0,693	1,384	0,231	59

Em termos de tensão de pré-adensamento, conforme já mencionado, foi observada a inexistência teórica deste parâmetro para a amostra ensaiada sob $\omega_i = 196$ %, ou seja, já a partir do primeiro carregamento, o material segue uma linha única de compressão (material normalmente adensado). Para amostras ensaiadas sob umidades iniciais de 162 % e 130 %, percebe-se (Figura 5.6) a formação de um patamar para os primeiros carregamentos, passando, após um determinado ponto, para o considerado trecho de compressão virgem, havendo desta forma uma tensão de pré-adensamento. Os valores de σ'_{v_m} variaram de uma tensão mínima entre 0 e 6,25 kPa ($\omega_i = 196$ %) a 59 kPa ($\omega_i = 130$ %), conforme apresentado na Tabela 5.7.

Um comentário julgado pertinente refere-se à alta compressibilidade do material, a qual pode ser atribuída aos elevados teores de umidade dos corpos de prova, visto que nestes casos, ocorreram grandes variações do índice de vazios durante o processo de adensamento pela expulsão de água do interior da amostra. As variações dos índices de vazios foram da ordem de 50% ao final do processo de descarregamento das amostras.

A Figura 5.7 apresenta a variação do coeficiente de adensamento (C_v) *versus* a tensão vertical (σ'_v) para as diferentes umidades ensaiadas, onde se visualiza uma significativa semelhança entre as curvas correspondentes a ensaios executados sob diferentes umidades iniciais. É importante ressaltar que o método de Taylor foi utilizado para o cálculo do coeficiente de adensamento em cada um dos incrementos de tensão.

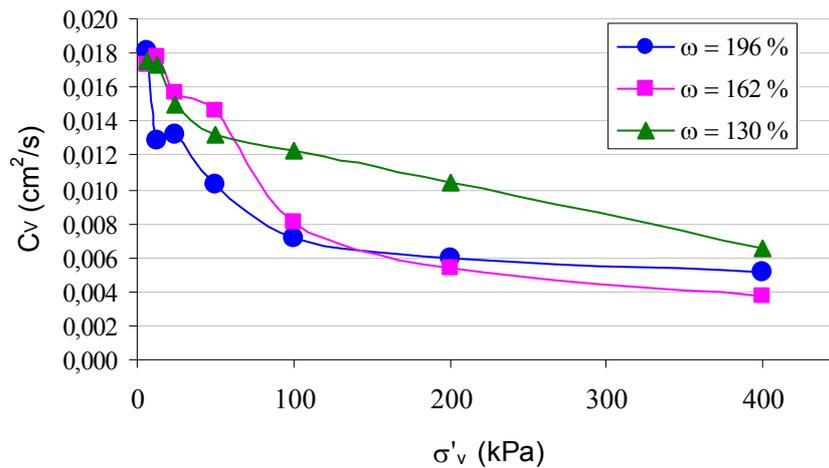


Figura 5.7: C_v versus σ'_v para diferentes umidades iniciais de moldagem

Em termos de valores médios, os resultados de C_v obtidos foram de 0,0132 cm²/s ($\omega_i = 130\%$), 0,0117 cm²/s ($\omega_i = 162\%$) e 0,0104 cm²/s ($\omega_i = 196\%$). A variação do coeficiente C_v para diferentes umidades iniciais não apresenta representatividade, visto a grande proximidade dos valores. Tais valores médios de coeficientes de adensamento (C_v) enquadram-se dentro de faixas de variações ou são ligeiramente superiores aos valores disponibilizados na literatura geotécnica nacional para solos argilosos (Soares, 1997).

5.4.2 Ensaios Triaxiais com Medição da Condutividade Hidráulica

5.4.2.1 Ensaios Triaxiais – Dados Gerais

Apresentam-se nesta etapa os resultados dos ensaios triaxiais convencionais adensados não-drenados (CIU) e de condutividade hidráulica, medida antes da fase de cisalhamento das amostras. Por tratar-se de um trabalho com caráter fortemente exploratório em um material ainda pouco conhecido, não foram feitas análises em termos de módulos de deformabilidade, apenas objetivou-se obter os parâmetros de resistência do material (ângulo de atrito interno efetivo, ϕ' e intercepto coesivo efetivo, c').

A Tabela 5.8 apresenta os valores das variáveis (umidade inicial e tensão efetiva média inicial) dos ensaios realizados, os valores de índice de vazios e peso específico seco no início do ensaio e ao final da fase de adensamento, bem como a variação volumétrica ocorrida nesta fase. Ressalta-se que não puderam ser aproveitados os dados da fase de cisalhamento de três ensaios por problemas com o equipamento; estes ensaios estão identificados.

Tabela 5.8: Variáveis dos ensaios e variação dos índices físicos antes e após adensamento

Ensaio	ω_i	σ'_c (kPa)	γ_d (kN/m ³)		e_i	γ_d (kN/m ³)		e_f	ΔV (%)
			inicial			final			
1	192	95	3,62		4,14	5,05		2,69	28,4
2 (*)	197	20	3,42		4,45	3,84		3,84	11,0
3	167	42	3,65		4,10	4,37		3,26	16,5
4 (*)	161	45	4,01		3,65	4,80		2,87	16,6
5 (*)	163	20	4,06		3,58	4,41		3,22	7,8
6	131	80	4,56		3,08	5,89		2,16	22,6
7	136	60	4,44		3,19	5,36		2,47	17,7
8	133	18	4,62		3,03	4,92		2,78	6,1

* Sem dados referentes à fase de cisalhamento.

Observando-se a Tabela 5.8 percebe-se uma representativa variação dos índices de vazios com o adensamento dos corpos de prova, a qual é tanto maior quanto maior a tensão efetiva média aplicada, para mesmas condições iniciais de moldagem, e tanto maior, quanto maior a umidade inicial, quando aplicada à mesma tensão efetiva.

A fase de saturação dos corpos de prova foi controlada pelo acompanhamento do parâmetro B, conforme metodologia mencionada no capítulo anterior. Em todos os ensaios, os valores deste parâmetro encontrados após o último incremento de contra-pressão e tensão confinante foram superiores a 0,96. A fase de cisalhamento era conduzida até que fosse atingido aproximadamente 18 % de deformação axial dos corpos de prova.

Para ilustrar a aparência dos corpos de prova ensaiados nesta fase do trabalho, apresenta-se na Figura 5.8 (a) a imagem do corpo de prova de umidade inicial de 133 % logo após sua moldagem, e em (b) o corpo de prova de umidade inicial de 192 % após a fase de cisalhamento, na qual foi submetido a uma tensão efetiva inicial (σ'_c) de 95 kPa.



Figura 5.8: (a) Corpo de prova $\omega_i = 133\%$ (b) Corpo de prova $\omega_i = 192\%$

As dimensões do corpo de prova, à umidade inicial de moldagem de 133 %, medidas logo após moldagem, foram de 5,0 cm de diâmetro e 11,14 cm de altura. O corpo de prova de umidade inicial de 192 %, após fase de cisalhamento, apresentou diâmetro médio de 4,7 cm e altura de 7,42 cm.

Observando-se a Figura 5.8 (b) percebe-se que após a fase de cisalhamento, o corpo de prova não apresentou um plano de ruptura definido, o que ocorreu foi uma redução de sua altura acompanhada do aumento do diâmetro, de forma praticamente uniforme ao longo de seu comprimento, ou seja, observa-se uma ruptura dúctil.

5.4.2.2 Comportamento Tensão Desvio e Variação da Poro-pressão *versus* deformação axial

A Figura 5.9 apresenta os gráficos tensão desvio *versus* deformação axial e variação da poro-pressão *versus* deformação axial, para as amostras ensaiadas às umidades de 192 %, 167 %, 131 %, 136 % e 167 %, a diferentes tensões efetivas iniciais.

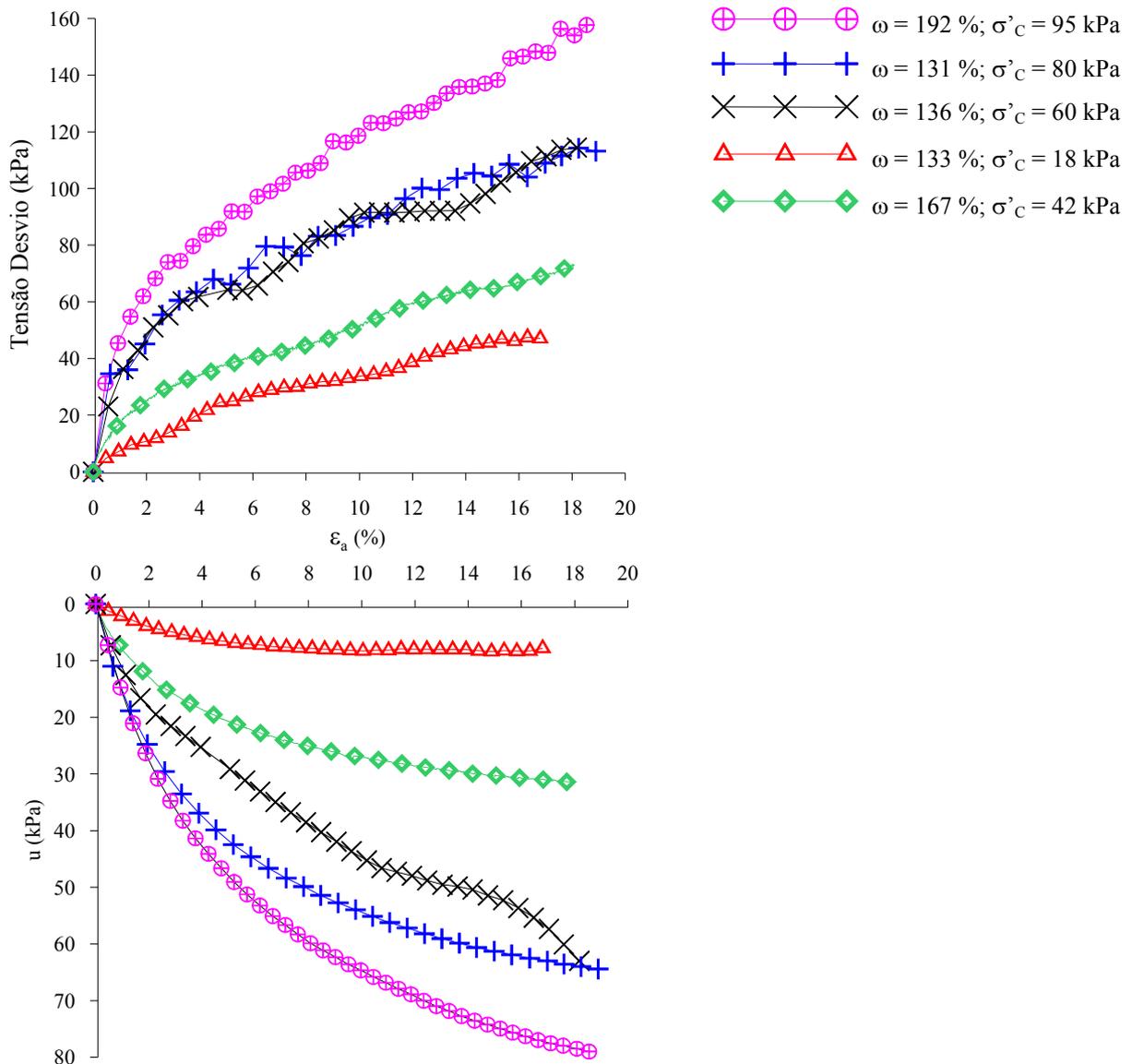


Figura 5.9: Comportamento Tensão desvio *versus* deformação axial e variação da poro-pressão *versus* deformação axial para o resíduo a diferentes umidades de moldagem

Ressalta-se que para a obtenção destas curvas, realizou-se uma filtragem dos pontos adquiridos durante a aquisição de dados da fase de cisalhamento das amostras, porém, este procedimento não foi adotado para a apresentação das trajetórias de tensões, para que não se ocultassem as tendências definidas.

Observando-se a Figura 5.9, percebe-se que o material apresenta ganho de resistência com o aumento das tensões efetivas médias iniciais, não sendo observado picos de resistência até 18 % de deformação axial. Comparando-se em termos da umidade inicial do material ($\omega_i = 167\%$ e $\omega_i = 136\%$), visualiza-se que para uma faixa de tensão efetiva entre 40 kPa e 60 kPa a resistência é maior para a amostra de menor umidade.

Com relação às curvas variação da poro-pressão *versus* deformação axial, observa-se um aumento gradativo da geração de poro-pressão com o aumento das tensões efetivas médias iniciais, indicando que para condições drenadas o processo de cisalhamento se daria acompanhado de uma tendência a contração do material.

5.4.2.3 Envoltória de Ruptura e Parâmetros de Resistência

Inicialmente era pretensão plotar-se envoltórias distintas para amostras ensaiadas a diferentes umidades iniciais, porém, ao observar-se que após o adensamento, as amostras reduziram significativamente seus índices de vazios, e atingiram condições aproximadamente semelhantes, guardadas as proporções, pois tratam-se de elevados valores de índices de vazios, acabou-se por ajustar uma única reta, que se entende ser representativa da envoltória dos máximos valores de resistência atingidos para o material.

A envoltória efetiva de resistência é plotada no espaço $t \times s'$. Estas coordenadas, definidas em termos de tensões principais, são dadas pelas expressões:

$$t = \frac{1}{2}(\sigma'_a - \sigma'_r) \quad (5.1)$$

$$s' = \frac{1}{2}(\sigma'_a + \sigma'_r) \quad (5.2)$$

A Figura 5.10 apresenta a envoltória de resistência de ruptura e as trajetórias de tensões efetivas dos ensaios triaxiais CIU para o resíduo moldado a diferentes umidades iniciais.

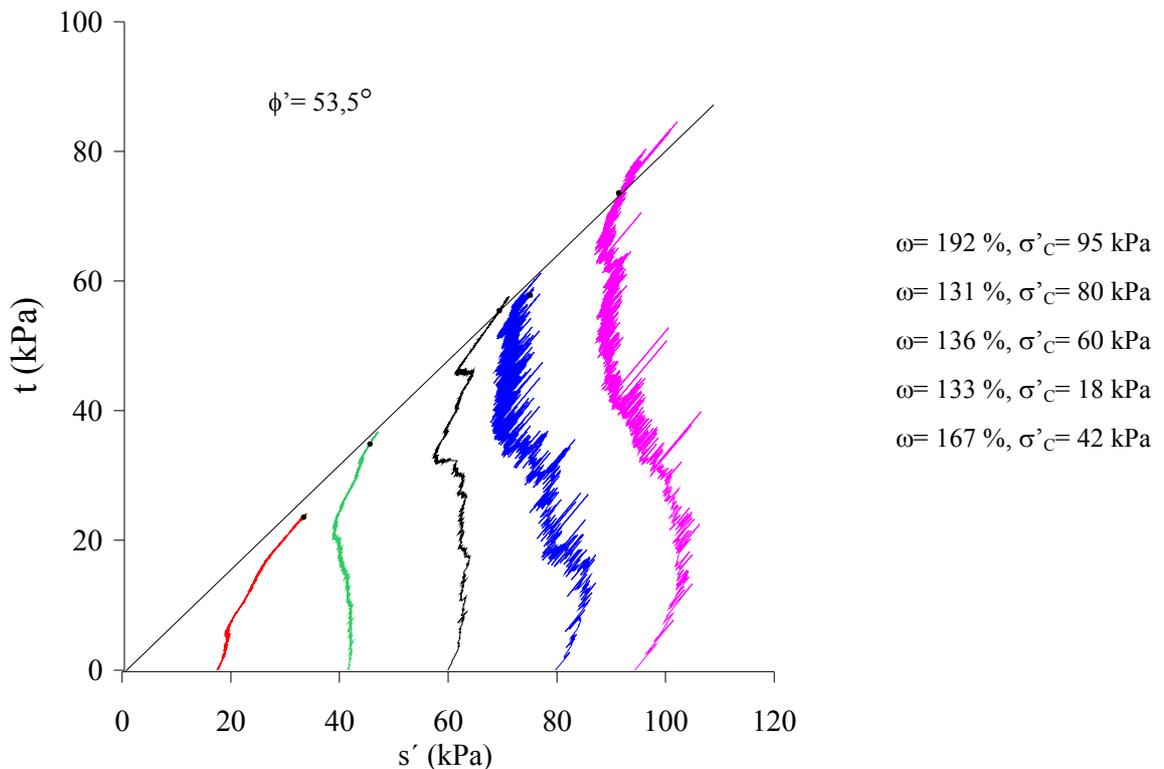


Figura 5.10: Envoltória de resistência ao cisalhamento do resíduo de papel

A envoltória não apresentou intercepto coesivo, e o valor do ângulo de atrito interno obtido foi bastante elevado ($\phi' = 53,5^\circ$).

Conforme observado na análise por microscopia eletrônica de varredura, o material se caracteriza por possuir fibras de até 600 μm , distribuídas aleatoriamente. Tal fato nos permite comparar o comportamento do material estudado, com materiais compósitos reforçados com fibras, extensivamente estudados e relatados na literatura.

Observa-se que as trajetórias de tensões começam com uma leve curvatura, e a partir de um determinado ponto, tendem a uma linearidade. Este é um comportamento já encontrado para solos reforçados com fibras de polipropileno, apresentado por Heineck (2002).

Segundo vários autores, o mecanismo de mobilização de resistência para solos reforçados com fibras pode ser descrito em duas etapas: para tensões confinantes baixas, a inclusão de fibras afeta a parcela friccional da resistência. Para tensões maiores existe um ponto que define uma clara mudança no mecanismo de interação matriz-fibra a partir da qual a alteração de comportamento corresponde somente à parcela coesiva. A tensão de confinamento correspondente à mudança no mecanismo de interação solo-fibra é então definida como a tensão confinante crítica. Abaixo da tensão crítica, a forma de ruptura nas zonas de cisalhamento do material compósito se dá por deslizamento entre solo e fibra. Para tensões maiores que a tensão crítica, a ruptura é governada pela resistência à tração da fibra (Gray e Ohashi, 1983, Gray e Al-Refeai, 1986; Feureharmel, 2000; Heineck, 2002).

A envoltória apresentada na Figura 5.10 certamente localiza-se na primeira porção da envoltória bi-linear do material, caracterizando um ganho de resistência na parcela friccional da resistência, onde a ruptura é governada pelo deslizamento entre matriz-fibra. Portanto, o fato da envoltória apresentada estar localizada abaixo da tensão crítica justifica o alto valor do ângulo de atrito do material. Para tensões confinantes maiores, provavelmente seria observada uma diminuição do ângulo de atrito e um aumento no intercepto coesivo, em função da contribuição das fibras quando tracionadas.

A tendência de um elevado valor de ϕ' para resíduos de papel pode ser corroborado pelos resultados obtidos por Heineck (2002) que encontrou valores de ângulo de atrito interno de até 60° para as misturas de solo e fibras de polipropileno. Desta forma, como já mencionado, o valor de ângulo de atrito interno obtido é atribuído à matriz fibrosa do resíduo de papel, e indica que a envoltória, correspondente a baixas tensões confinantes, encontra-se no primeiro trecho da envoltória bi-linear do material.

5.4.2.4 Comportamento Hidráulico do Resíduo

As medições de condutividade hidráulica foram determinadas durante os ensaios triaxiais antes da fase de cisalhamento, para as amostras ensaiadas a diferentes umidades iniciais de moldagem, submetidas a diferentes tensões efetivas médias iniciais, conforme apresentado na Tabela 5.8. Os ensaios foram realizados sob um gradiente hidráulico de 10 e o coeficiente de

condutividade hidráulica (k) foi calculado pela Lei de Darcy. Em média, as medições foram conduzidas por períodos de duas a quatro horas, o que permitiu a estabilização da condutividade hidráulica medida.

A Figura 5.11 compara a condutividade hidráulica medida para amostras a diferentes umidades iniciais submetidas a baixos valores de tensões efetivas médias iniciais.

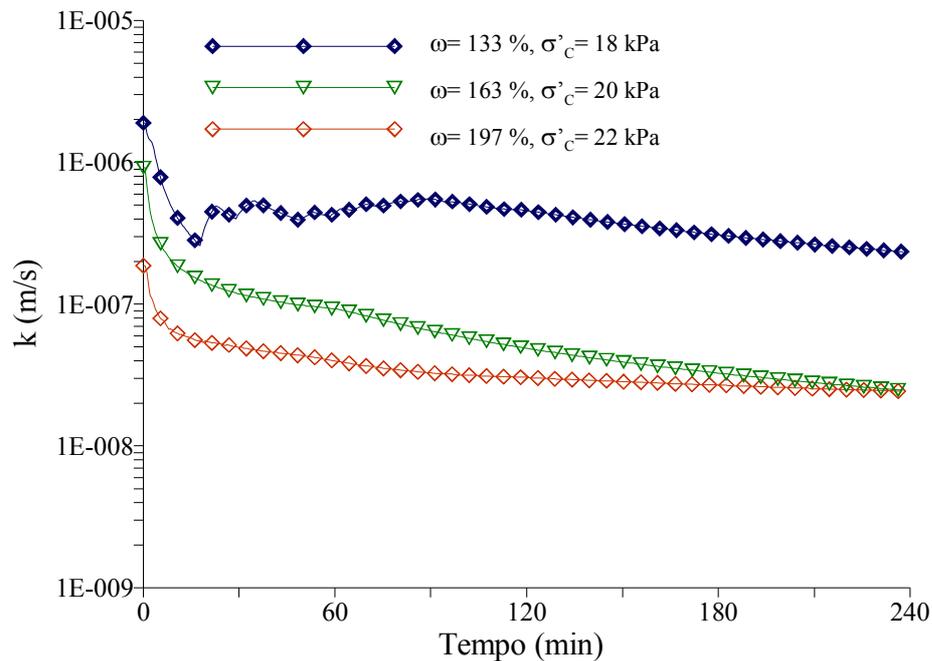


Figura 5.11: Condutividade hidráulica antes do cisalhamento para amostras a diferentes umidades iniciais e tensões efetivas médias

Observa-se através da Figura 5.11 que para uma mesma tensão efetiva, ou valores bastante próximos (18 kPa, 20 kPa, e 22 kPa), a condutividade hidráulica é menor para os maiores valores de umidade inicial de moldagem das amostras, com valores de coeficiente de condutividade hidráulica, para a umidade de 197 % já na faixa de valores de 10^{-8} m/s.

A Figura 5.12 apresenta os valores de coeficiente de condutividade hidráulica obtidos para as amostras moldadas a semelhantes valores de umidade ($\omega=133\%$ e $\omega=136\%$), submetidas a diferentes valores de tensões efetivas médias iniciais.

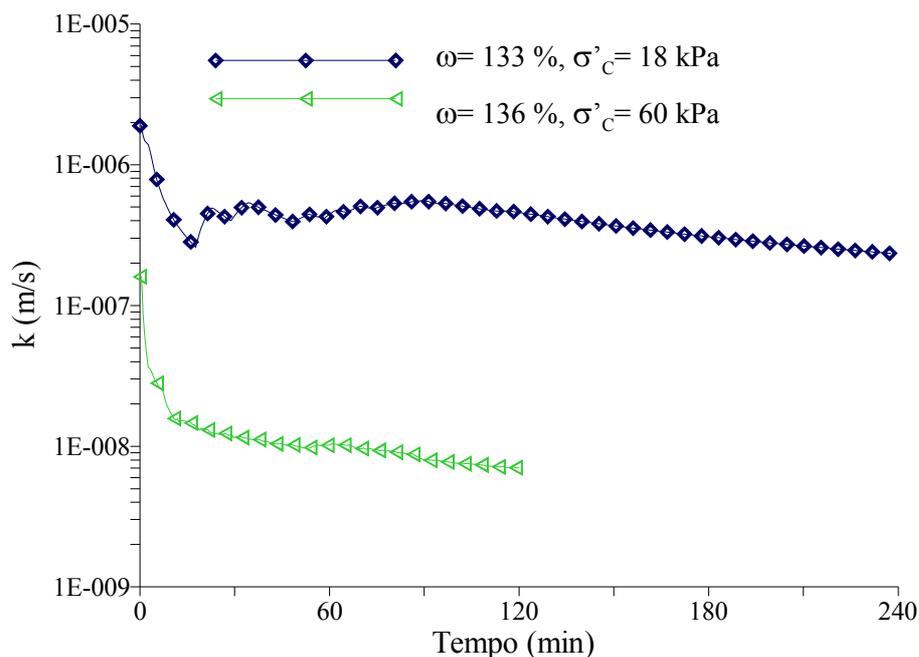


Figura 5.12: Condutividade hidráulica para amostras com umidades de moldagem próximas a 130 % e diferentes tensões efetivas médias

Observa-se a partir da Figura 5.12 que para valores bastante próximos de umidade de moldagem e diferentes valores de tensões efetivas aplicadas ($\sigma'_c = 18 \text{ kPa}$ e $\sigma'_c = 60 \text{ kPa}$), o coeficiente de condutividade hidráulica foi menor para a maior tensão de confinamento.

Destas comparações, o aspecto mais relevante e surpreendente deste material é o fato de se obter menores valores de condutividade hidráulica para as amostras com as maiores umidades iniciais de moldagem, cujos índices de vazios são bastante elevados. Certamente esta característica é importante quando se propõe o seu uso em coberturas de aterros, onde baixas condutividades hidráulicas são exigidas. Além disso, a obtenção de baixos valores de condutividade hidráulica para altos valores de umidade de moldagem, facilitam bastante a aplicação do material, cuja umidade *in natura* é de 256 %.

5.4.3 Determinação do Teor de Matéria Orgânica

A determinação da matéria orgânica das amostras coletadas em diferentes datas na planta industrial foi realizada através da queima a 440°C. Os teores de matéria orgânica variaram de 39% a 48%. Essa pequena variação permite constatar que existe controle no processo industrial, o que é um bom indicador, visto que a matéria-prima que dá origem ao resíduo é bastante heterogênea.

5.4.4 Análise por Fluorescência de Raios-X

Apresenta-se na Tabela 5.9 a análise química de elementos maiores da fração inorgânica para as amostras obtidas da queima do resíduo a 440°C.

Tabela 5.9: Composição química (%) para amostras do resíduo

Amostra	1	2	3	4	4
SiO ₂	16,66	18,77	19,93	15,79	16,01
Al ₂ O ₃	15,64	15,38	16,45	13,72	13,65
TiO ₂	0,34	0,47	0,32	0,38	0,28
Fe ₂ O ₃ (total)	0,73	0,67	0,85	0,58	0,6
MnO	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01
MgO	1,64	1,94	1,87	1,78	1,8
CaO	35,53	34,16	33,3	36,87	37,36
Na ₂ O	ND	ND	ND	ND	ND
K ₂ O	0,2	0,19	0,21	0,15	0,15
P ₂ O ₅	0,14	0,1	0,14	0,11	0,11
Perda ao Fogo	29,8	28,87	28,61	30,85	30,85

ND = Não Detectado

As quatro amostras apresentaram resultados bastante próximos. Os óxidos SiO_2 e Al_2O_3 indicam a presença do argilomineral do grupo da caulinita. Os baixos teores de K_2O indicam traços de argilominerais ílíticos.

A presença de teores elevados de CaO e perda ao fogo correspondem aos valores próprios de minerais carbonáticos. Neste caso, os valores inferiores a 2% de MgO sugerem que o material carbonático é predominantemente composto de calcita.

Os resultados analíticos obtidos por fluorescência de raios-x corroboram plenamente os espectros por EDS, obtidos nos ensaios de microscopia eletrônica de varredura apresentados anteriormente.

CAPÍTULO 6

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo são apresentadas as principais conclusões deste trabalho, as quais representam a síntese do conhecimento adquirido ao longo do seu desenvolvimento. Também são propostas sugestões para trabalhos futuros.

É importante enfatizar que o presente trabalho possui características de uma pesquisa precursora, de modo que foi necessário o desenvolvimento de uma metodologia própria para se atingir os objetivos definidos pelo programa experimental. Pelo fato de ter sido utilizada uma abordagem geotécnica para tratar o material de estudo, as rotinas operacionais convencionais de laboratório muitas vezes mostraram-se impróprias, não satisfazendo às necessidades impostas pelas características particulares deste material.

A seguir são apresentadas as principais conclusões obtidas ao longo deste trabalho.

6.1 CONCLUSÕES

As principais conclusões obtidas através dos resultados e análises desenvolvidos na presente pesquisa são apresentados neste item. Além disso, um breve comentário é feito sobre os ensaios utilizados e metodologia empregada para o desenvolvimento desta pesquisa.

6.1.1 Características Gerais do Resíduo Estudado

O resíduo de papel consiste em um material composto basicamente por matéria orgânica (de 40 a 45 %), cargas minerais (principalmente caulinita e calcita) e água. Em seu estado natural apresenta uma umidade de 256 %. Quando na condição seca, suas fibras constituintes arranjam-se aleatoriamente, de modo que o material se apresenta na forma de grumos resistentes. Quando submetido à compactação, o material apresenta elevada compressibilidade e sua condição de trabalho favorável se dá a elevados valores de umidade (aproximadamente 190 %).

6.1.2 Comportamento Mecânico do Resíduo

6.1.2.1 Compressão Edométrica

Os parâmetros de compressibilidade unidimensional das amostras do resíduo não apresentaram variabilidade significativa com a variação da umidade de moldagem, exceto a tensão de pré-adensamento. Para as umidades estudadas (196 %, 162 % e 130 %) os valores do índice de compressão (C_c) foram de 1,528, 1,546 e 1,384, enquanto os valores do índice de descarregamento (C_d) foram de 0,275, 0,265 e 0,231. A proximidade de valores também foi notável para os valores médios de coeficiente de adensamento (C_v) obtidos para o material: 0,0101 cm²/s, 0,0117 cm²/s e 0,0132 cm²/s. A tensão de pré-adensamento cresce de valores inferiores a 6 kPa para valores superiores a 50 kPa com a variação da umidade de moldagem de 196% para 130%. Os parâmetros obtidos para o material são indicativos de um comportamento bastante compressível, o qual pode ser atribuído aos elevados teores de umidade de moldagem, visto que nestes casos, ocorreram grandes variações do índice de vazios durante o processo de adensamento.

6.1.2.2 Compressão Triaxial

Nos ensaios triaxiais não-drenados com trajetórias convencionais de tensão, não foram observados picos de resistência para as amostras estudadas com diferentes umidades de moldagem (de 130 % a 190 %) submetidas a diferentes valores de tensão efetiva (de 18 kPa a 195 kPa).

A envoltória de ruptura obtida para as amostras ensaiadas não apresentou intercepto coesivo, e o valor do ângulo de atrito interno obtido bastante elevado ($\phi' = 53,5^\circ$) é justificado pela matriz fibrosa do material.

6.1.3 Comportamento Hidráulico do Resíduo

Durante os ensaios triaxiais, após o adensamento das amostras, medições do coeficiente de condutividade hidráulica (k) foram realizadas antes da fase de cisalhamento.

Os coeficientes de condutividade hidráulica, medidos na fase pré-cisalhamento, foram tanto menores quanto maiores os valores de umidade de moldagem das amostras.

A capacidade de atingir baixos valores de condutividade hidráulica é uma característica relevante do comportamento deste material e indica a possibilidade de ser utilizado como um material alternativo em substituição aos materiais convencionais utilizados em coberturas impermeáveis de aterros.

6.1.4 Consideração Sobre os Ensaio Empregados

Embora os procedimentos adotados para o estudo não sejam especificados para serem aplicados aos resíduos de papel, acredita-se que os resultados obtidos em termos de peso específico, compactação, adensamento, resistência ao cisalhamento, e condutividade hidráulica, são reproduzíveis e representam o real comportamento do material estudado e

definem o grande potencial do uso do mesmo em obras geotécnicas específicas, tais como selantes superficiais (*cover liners*) de aterros sanitários.

6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como já foi dito anteriormente, este trabalho consiste na investigação inicial de um material cujas propriedades até então eram desconhecidas, portanto, julga-se apropriado um estudo mais aprofundado sobre o seu comportamento.

Assim, de forma a ampliar o conhecimento a respeito do comportamento deste material, sugerem-se alguns tópicos para pesquisa:

- Investigar o material do ponto de vista de durabilidade, inclusive ao que se refere ao comportamento biológico;
- Realizar uma análise sobre o comportamento mecânico das fibras contidas no resíduo;
- Estudar o uso da adição de outros materiais (como solos ou agentes cimentantes) ao resíduo;
- Realizar um maior número de ensaios triaxiais para melhor entender o comportamento mecânico do material, bem como realizar repetições de ensaios, para permitir a comparação de resultados, já que este é um importante elemento para a garantia da confiabilidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard test method for measurement of hydraulic conductivity of saturated porous materials using a flexible wall permeameter.** D 5084, 1990. 8p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Solo – Determinação do limite de liquidez.** NBR 6459, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Solo – Determinação do limite de plasticidade.** NBR 7180, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Solo – Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da massa específica.** NBR 6508, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Solo – Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização.** NBR 6457, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Solo – Ensaio de compactação.** NBR 7182, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Solo – Ensaio de adensamento unidimensional.** MB 3336, 1990.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Solo – Determinação do teor de matéria orgânica por queima a 440°C.** NBR 13600, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Resíduos Sólidos – Classificação.** NBR 10004, 2004.

AUSTIN, T. Landfill-cover conflict. **Civil Engineering**, New York, v.62, n.12, p. 70-71. 1992.

BISHOP, A.W.; HENCKEL, D.J. **The measurements of soil properties in triaxial test.** London: Edward Arnold, 2ed., 1962, 277p.

CABRAL, A. R.; BURNOTTE, F.; LEFEBVRE, G.; PANAROTTO, C. T. Geotechnical characterization of a pulp and paper (deinking) residue used in cover systems. **In: Environmental Geotechnics**, p. 207-212, 2002.

CARRARO, J.A.H. **Utilização de resíduos industriais na estabilização de um solo residual de arenito.** 152p. Dissertação (Mestrado em engenharia) – CPGEC/UFRGS, Porto Alegre, 1997.

DANIEL, D.E. Clay liners. **In: Geotechnical Practice for Waste Disposal**, London: Chapman & Hall. Cap. 7, p. 137-163. 1993.

DANIEL, D.E.; TRAUTWEIN, S.J.; BOYNTON, S.S.; FOREMAN, D.E. Permeability testing with flexible-wall permeameters. **Geotechnical Testing Journal**, Philadelphia, v.7, n.3, p. 113-122, Setembro, 1984.

DANIEL, D.E.; KOERNER, R.M. Cover Systems. **In.: Geotechnical Practice for Waste Disposal**, London: Chapman & Hall, 1993. Cap. 18 p. 455-496, 1993.

DANIEL, D.E.; KOERNER, R.M. **Waste Containment Facilities: Guidance for construction, quality assurance and quality control of liner and cover systems**. New York: ASCE, 354p, 1995.

EPA - U. S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Code of Federal Regulations, Title 40, Chapter I, Part 264.221 – **Design and operation requirements**. 57 FR 3487, 29/01. Internet. Disponível em: <http://www.access.gpo.gov/ecfr>. 2002. Acesso em 25 de Janeiro de 2007.

FEUERHARMEL, M.R. **Comportamento de solos reforçados com fibras de polipropileno**. 131p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – PPGEC/UFRGS, Porto Alegre, 2000.

GRAY, D. H.; OHASHI, H. Mechanics of fibre-reinforcement in sand. **Journal of Geotechnical Engineering**, New York, ASCE, v.109, n. 3, p.335-353, 1983.

GRAY, D. H.; AL-REFEAI, T. Behavior of fabric versus fibre-reinforced sand. **Journal of Geotechnical Engineering**, New York, ASCE, v.112, n. 8, p.804-826, 1986.

HEAD, K. H. Manual of Soil Laboratory Testing, Vol 2, **Permeability, Shear Strength and Compressibility Tests**. London: Prentech Press, 1980. 402p.

HEINECK, K.S. **Estudo do comportamento hidráulico e mecânico de materiais geotécnicos para barreiras de contenção de resíduos**. Tese (Doutorado em Engenharia) – PPGEC/UFRGS, Porto Alegre, 2002, 251p.

KALTEZIOTIS, N.; SARSBY, R.W.; ZERVOGIANNIS, H. Compacted clay for landfill liners. **In: XII International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering**, New Delhi. Proceedings. v.4, 6v, p. 1591-1594, 1994.

KRAUS, J.; BENSON, C.; VAN MALTBY, C.; WANG, X. **Laboratory and field hydraulic conductivity of three compacted paper mill sludges**. **In: Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 123 (7), p. 654-662, 1997.

LA GREGA M. D.; BUCKINGHAM, P. L.; EVANS, J. C. **Hazardous Waste Management**, 2nd Ed., McGraw-Hill, 2001, 1202p.

LANDRETH, R.E. Landfill containment systems regulations. **In: Waste containment systems: Construction, regulation and performance**. San Francisco, California. Proceedings. ASCE, GSP n.26, 1990. p.1-13.

MARCON, L.P. **Estudo Comparativo do Comportamento Mecânico de duas Areias de Osório – RS**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – PPGEC/UFRGS, Porto Alegre, 137p. 2005.

MOO-YOUNG, H.K. Jr. **Evaluation of Paper Mill Sludges for Use as Landfill Covers**. Ph.D. Thesis, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, NY. 1995.

MOO-YOUNG, H. K.; ZIMMIE, T. F. Effects of organic decomposition on paper mill sludges used as landfill cover material. **In: Environmental Geotechnics**, p. 827-832, 1996.

MOREIRA, M.D. **Aplicações dos Minerais e Rochas Industriais**. Sociedade Brasileira de Geologia, Núcleo Bahia-Sergipe, Salvador, 87p, 1994.

SIMPSON, P.T.; ZIMMIE, T.F. Waste Paper Sludge: An Update on Current Technology and Reuse. *Recycled Materials in Geotechnics*, Geotechnical Special Publication No. 127, **Proceedings of Sessions of the ASCE Civil Engineering Conference and Exposition**, Aydilek, A.H. and Wartman, J., eds. , Baltimore, MD, October 19-21, ASCE, Reston VA, pp. 75-90. 2004.

SKEMPTON, A.W. The pore-pressure coefficients A and B. **Géotechnique**, London, v.4, p.143-147, London, 1954.

SOARES, J.M.D. **Estudo do Comportamento Geotécnico do Depósito de Argila Mole da Grande Porto Alegre**. Tese (Doutorado em Engenharia), CPGEC/UFRGS, Porto Alegre, 1997.

TAVENAS, F.; LEBLOND, P.; JEAN, P.; LEROUEIL, S. The permeability of natural soft clays. Part I: Methods of laboratory measurement. **Canadian Geotechnical Journal**, Ottawa, v. 20, p. 629-644, 1983.

TEIXEIRA, P. F. **Investigação sobre as características geotécnicas de um resíduo de papel**. Dissertação de mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2002.

ANEXO