

RESÍDUO DO PROCESSO DE RECICLAGEM DE PAPEL COMO MATERIAL ALTERNATIVO PARA APLICAÇÕES EM GEOTECNIA AMBIENTAL

Paper by-product as an alternative material for geo-environmental applications

Fernando Antônio Medeiros Marinho*

Alexandre Cabral**

Cláudia Echevengúá Teixeira***

Paula Fernanda Teixeira****

RESUMO – Para fabricar papel a partir de aparas é preciso separar as fibras secundárias de celulose dos agregados e contaminantes do papel. Devido às limitações do processo, até 30 % das fibras são perdidas na forma de resíduo, sobretudo na etapa de remoção da tinta. O resíduo de papel, que por suas características é também chamado de material argilo-fibroso, é composto principalmente por fibras de celulose, argila e calcita. Este resíduo vem sendo estudado como material geotécnico alternativo e vários projetos foram executados, incluindo projetos de larga escala no campo. Este trabalho apresenta os resultados de estudos realizados em dois resíduos da indústria de papel brasileira e canadense. Os estudos aqui apresentados mostram o grande potencial de utilização de subprodutos da reciclagem de papel como material de recobrimento, seja em aterros sanitários ou em sítios de mineração.

SYNOPSIS – In the first step of paper recycling secondary cellulose fibres are separated from the other constituents of the paper. Due to limitations in this process, up to 30% of the fibres are not recuperated and become part of the residues generated, imparting a high organic content to it. These residues, also called fibre-clay, are mainly constituted of cellulose, kaolinite clay and calcite. They have been used in the past few years as alternative geotechnical material in various types of large-scale projects in the field. This study presents the results of an investigation performed with two residues: one produced in Brazil and the other in Canada. These results show that there is a great potential to use paper recycling by-products as part of landfill final cover systems and acid-generating mine cover systems.

PALAVRAS CHAVE – Barreira capilar, resíduos de papel, dados experimentais.

1 – INTRODUÇÃO

O processo de reciclagem de papel gera uma grande quantidade de resíduos provenientes das diferentes etapas do processo, tais como: triagem do papel, preparo da emulsão, depuração, remoção de contaminantes fortemente agregados ao papel, no caso a tinta, lavagem, dispersão e branqueamento. Todas as etapas têm como objetivo separar as fibras secundárias de celulose dos agre-

* Professor Livre Docente da Escola Politécnica Universidade de São Paulo. E-mail: fmarinho@usp.br

** Professor titular da Universidade de Sherbrooke. E-mail: alexandre.cabral@usherbrooke.ca

*** Pesquisadora do Instituto de Pesquisas de São Paulo (IPT) e Professora da Universidade de Caxias do Sul. E-mail: cteixeira@ipt.br

**** Engenheira Civil, ex-aluna de pós graduação da Escola Politécnica Universidade de São Paulo. E-mail: pafete@hotmail.com

gados e contaminantes do papel. Devido às limitações do processo, até 30 % das fibras são perdidas na forma de resíduo, sobretudo na etapa de remoção da tinta.

O resíduo de papel, que por suas características é também chamado de material argilo-fibroso, é composto principalmente por fibras de celulose, argila e calcita. A quantidade de fibras e a composição geral variam significativamente com o tipo de papel utilizado na reciclagem e também depende do processo industrial utilizado (Latva-Somppi *et al.*, 1994). A caracterização de diversos resíduos de papel é apresentada por Vlyssides and Economides (1997); Latva-Somppi *et al.* (1994); Ettala (1993), Chabot *et al.* (1991), Teixeira (2002) e Teixeira (2001). O material é altamente compressível e normalmente deixa a zona de produção com um teor de umidade gravimétrico que varia de 100% a 190%. O teor de material volátil varia entre 48% e 60% e a densidade relativa está entre 1,8 e 2,0.

Este resíduo, devido às suas características vem sendo estudado como material geotécnico alternativo para o recobrimento de aterros bem como para controlar a drenagem mineira ácida (DMA) em rejeitos de mineração (Cabral *et al.* 2000). O uso do resíduo (subproduto) de papel tem sido acompanhado em camadas de proteção de aterros de resíduos sólidos urbanos em diversos aterros sanitários nos EUA (Laplante 1993; Maltby e Epstein 1994; Floess *et al.* 1995; Zimmie e Moo-Young, 2000; Kraus *et al.*, 1997; Malmstead *et al.*, 1999; etc.), no Japão (Kamon *et al.*, 2002), na África do Sul (Brown *et al.* 1998) e no Canadá (Audet *et al.* 2002). Como barreira de oxigênio este resíduo tem se comportado com boa eficiência na prevenção da drenagem ácida (Cabral *et al.*, 2000 e 2004). O resíduo impede a entrada de oxigênio devido a sua elevada capacidade em se manter com alto grau de saturação, além da sua capacidade aeróbica de degradação da matéria orgânica nele existente. De fato, considerando o elevado teor de matéria orgânica deste material, as barreiras que utilizam o resíduo de papel estão susceptíveis à biodegradação, desta forma as suas propriedades podem mudar com o tempo.

Os recobrimentos de aterros sanitários contribuem para o controle da infiltração, embora no caso de sítios de mineração, a cobertura final deva reduzir a entrada de oxigênio. É a entrada de oxigênio que leva à geração de drenagem mineira ácida - DMA (Cabral *et al.* 2000). O benefício de se utilizar o resíduo da reciclagem de papel, que é um material rico em celulose, está associado à redução dos custos para a implementação de um sistema de cobertura apropriado. Este material é gerado em grande quantidade pela indústria da reciclagem e a sua disposição em aterros industriais é onerosa. A valorização deste resíduo como material de recobrimento é interessante tanto do ponto de vista econômico como ambiental.

O resíduo gerado pela indústria de papel possui uma grande quantidade de água e baixa quantidade de sólidos, sendo comparado com as argilas, em relação ao seu desempenho e comportamento como material de cobertura para aterro (e.g. Moo-Young & Zimmie, 1996). A caracterização geotécnica do resíduo da indústria de papel é feita utilizando-se os conceitos dos ensaios usualmente aplicados a solos. Na literatura internacional encontram-se alguns dados geotécnicos de resíduos de papel em que se observa uma significativa variabilidade dos parâmetros geotécnicos (e.g. Zimmie & Moo-Young, 2000, Cabral *et al.* 1999, 2000 e 2002, Quiroz e Zimmie, 1998).

As diferenças nos resultados, muitas vezes encontrados entre os resíduos de papel, ocorrem devido aos diferentes processos industriais da própria fabricação do papel e dos vários tipos de processo de tratamento nas estações de rejeito de papel. Outros aspectos importantes a serem considerados nas comparações são as eventuais diferenças nos procedimentos de ensaios, que no caso do resíduo de papel podem afetar significativamente o resultado e a interpretação.

A compressibilidade do resíduo é um dos parâmetros geotécnicos mais importantes no projeto de um aterro quando se utiliza resíduo de papel como material de cobertura. A permeabilidade deste material varia em função do teor de umidade, da compressibilidade ou grau de compactação e idade do resíduo.

Este trabalho tem como objetivo apresentar uma discussão geral do comportamento de recobrimentos experimentais da província de Quebec – Canadá e os estudos realizados com o resíduo

de uma empresa brasileira localizada no estado de São Paulo, visando sua caracterização geotécnica e avaliação do seu potencial como material de recobrimento. Os estudos realizados foram confrontados com outros autores no intuito de apresentar uma discussão sobre os parâmetros geotécnicos necessários para a avaliação de resíduos de papel como material de recobrimento.

2 – RECOBRIMENTOS EXPERIMENTAIS EM QUEBEC, CANADÁ

Cinco recobrimentos, a partir de 1995, utilizando um subproduto da reciclagem do papel foram instalados em diferentes sítios da província de Quebec, Canadá. Dois destes recobrimentos foram implantados em aterros sanitários (St-Rosaire e St-Michel), e os outros três em sítios de rejeitos de mineração geradores de drenagem ácida de minas (DAM) (Eustis, Albert e Clinton). Os resíduos ou subprodutos utilizados foram gerados por duas empresas localizadas na província de Quebec. A concepção geral dos recobrimentos está apresentada na Figura 1.

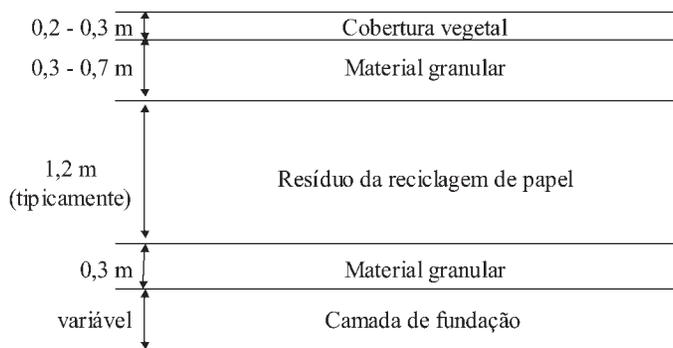


Fig. 1 – Esquema típico de recobrimentos com subproduto da reciclagem de papel.

Os recobrimentos são protegidos por uma cobertura vegetal para prevenir erosão e auxiliar na reabilitação natural do ambiente. Uma camada de material granular (não instalada no sítio de Eustis e aterro de St-Rosaire) age como camada de drenagem e confinamento, auxiliando na compressão do material. Os recobrimentos agem como barreiras hidráulicas devido às baixas condutividades hidráulicas. A superposição de uma camada de recobrimento a uma camada de material granular (areia) cria uma barreira capilar, garantindo que o material mantenha um alto grau de saturação, além de prevenir a migração do oxigênio.

A Tabela 1 apresenta informações sobre os locais de implantação: ano de construção, tamanho da área, e os instrumentos permanentes instalados em cada unidade experimental. Lisímetros foram instalados em todos os sítios para avaliar as taxas de infiltração e composição de lixiviados. As placas de recalques foram instaladas na base e no topo da barreira para monitorar a compressão do material com o tempo. Termopares foram usados para medir a temperatura no interior do recobrimento em várias profundidades, bem como sondas de TDR para avaliar o teor de água em diferentes perfis. Considerando que o material utilizado é orgânico foram avaliados alguns parâmetros relacionados à evolução bioquímica do material, tais como a composição do gás na base do recobrimento e a qualidade da água de poros no interior do recobrimento, coletada em poços de infiltração. A qualidade das águas superficiais foi avaliada em poços instalados na camada granular.

Os estudos nestes locais vêm sendo apresentados em publicações e em eventos científicos (Cabral *et al*, 1999a, b e Cabral *et al*, 2002). O presente trabalho apresenta uma discussão geral sobre o desempenho desses recobrimentos.

Tabela 1 – Informações gerais sobre os cinco recobrimentos instalados em Quebec.

	Instrumentação permanente							
	AC (ha)	PR	L	Poços de águas superficiais	Poços de infiltração	Termopar	Sonda TDR	Sensor de gás
Aterros Sanitários								
St-Michel (1998)	1,8	2	3	10	-	2	3	-
St-Rosaire I (1996)	1,0	1	2	-	6	1	-	-
St-Rosaire II (1998)	1,0	2	2	2	-	1	1	-
St-Rosaire III (1999-2000)	2,0	-	2	-	-	-	-	-
Sítios de mineração								
Eustis (1995-1996)	1,6	-	4	-	8	-	-	-
Clinton (1997)	0,5	3	3	3	3	3	3	3
Albert (2000-2001)	4,5	-	4	-	-	-	-	-

AC - Área de cobertura; PR - Placas de recalques; L - Lisímetros.

Os resíduos utilizados nos recobrimentos apresentados na Tabela 1 foram oriundos de uma das usinas canadenses. Ao longo do período de instalação dos recobrimentos experimentais diferentes amostras de resíduos utilizados foram caracterizadas em relação à composição mineral e orgânica. Nas Tabelas 2 e 3 estão apresentadas as composições médias de quatro sub-amostras dos resíduos que foram completamente caracterizadas. Conforme pode ser observado, o teor de orgânicos (sólidos voláteis) representa em média 61 % da composição do material, sendo a fibra de celulose o composto estrutural principal e a calcita e a metacaolinita os principais compostos da fase mineral do material.

Tabela 2 – Composição mineralógica do material utilizado no recobrimento (base seca).

Composição	Sólidos não voláteis	Calcita	Metacaolinita	Talco	Rutilo	Outros
Média (%)	39,2 ± 1,4	24,9 ± 3,5	7,1 ± 3,1	2,3 ± 0,6	0,7 ± 0,8	4,1 ± 0,6

Tabela 3 – Composição orgânica do material utilizado no recobrimento (base seca)

Composição	Sólidos voláteis	Celulose	Hemicelulose	Lignina	Outros
Média (%)	61,0 ± 1,4	31,8 ± 2,3	8,5 ± 0,9	8,5 ± 1,2	12,1 ± 1,4

3 – RESULTADOS DOS ESTUDOS GEOTÉCNICOS DO RESÍDUO BRASILEIRO

A caracterização geotécnica do resíduo foi realizada através de ensaios de adensamento, permeabilidade, cisalhamento direto, placa de sucção e placa de pressão, além da determinação do teor de umidade e de orgânicos.

Estes ensaios foram executados conforme as normas brasileiras e quando necessário, foram feitas adaptações devido às peculiaridades do material, obtendo-se assim as seguintes características do resíduo: curva granulométrica, densidade relativa dos “sólidos”, peso específico seco, curva de compactação, parâmetros de compressibilidade, envoltória de resistência, curva de retenção e condutividade hidráulica.

As referências das normas utilizadas para os diversos ensaios aqui apresentados podem ser encontradas em Teixeira, (2002).

Os resultados dos ensaios realizados com o resíduo brasileiro estão apresentados conjuntamente com dados obtidos na literatura. Na Tabela 4 está apresentada a nomenclatura utilizada pelos diferentes autores para identificar as amostras.

Tabela 4 – Nomenclatura dos materiais e sua respectiva referência.

Nomenclatura	Referência
A, B, C1, C2, C3, D, E	Moo-Young & Zimmie, 1996
KF 95/96, KF 220197, KF 040497, PC 260597, PC 150598, KF 190698, KF 030299	Cabral <i>et al</i> (1999a)
PMS, A-MI, B-MI, C-MA	Kamon <i>et al</i> (2000)
NCASI-P, NCASI-C, IP, Erving	Quiroz <i>et al</i> (2000)
H2, H3, CI-1, CI-2, DS-1	Andersland & Mathew (1973)

Na literatura a grande maioria dos autores menciona que a determinação do teor de matéria orgânica, densidade relativa dos grãos, teor de umidade natural e compressibilidade são as propriedades físicas mais importantes para a caracterização do resíduo de papel. Deve-se, no entanto incluir também a curva de retenção e as características de resistência.

A avaliação físico-química do resíduo foi executada pelo setor de Química da ESALQ/USP. Esta avaliação foi feita em um lote diferente do usado para os ensaios aqui apresentados.

O resíduo de papel (lodo fresco) é caracterizado como sendo um material orgânico, que é composto principalmente por fibras com elevado teor de umidade e baixa acidez. Dentre os seus componentes químicos se destaca o nitrogênio, como sendo o de maior concentração. Os metais pesados (Cd, Cr, Cu, Mn, Ni, e Zn) analisados estiveram em níveis muito baixos, inclusive desestimulando qualquer estudo de biodisponibilidade desses elementos.

3.1 – Características de Identificação dos Materiais

A Figura 2 apresenta os resultados referentes ao teor de matéria orgânica e densidade relativa dos “sólidos” obtidos para os ensaios realizados com as amostras do resíduo denominado RIG em conjunto aos resultados encontrados na literatura. Observa-se que o resíduo RIG é o que apresenta o maior teor de matéria orgânica e em consequência uma menor densidade dos “sólidos”.

Os resíduos estudados não permitem a determinação de curva granulométrica. Por conter uma significativa quantidade de fibras o ensaio de granulometria não se aplica a este tipo de material.

Com relação aos limites de Atterberg observa-se na Figura 3 que o resíduo RIG apresenta-se com o maior limite de liquidez e maior índice de plasticidade em comparação com os dados obtidos na literatura. Observa-se ainda que todos se encontram abaixo da linha A. Aconselha-se a execução do ensaio de limite de liquidez por meio do Cone pela facilidade do mesmo, pois pelo método de Casagrande existe a dificuldade de abrir-se a ranhura na amostra com o cinzel padronizado.

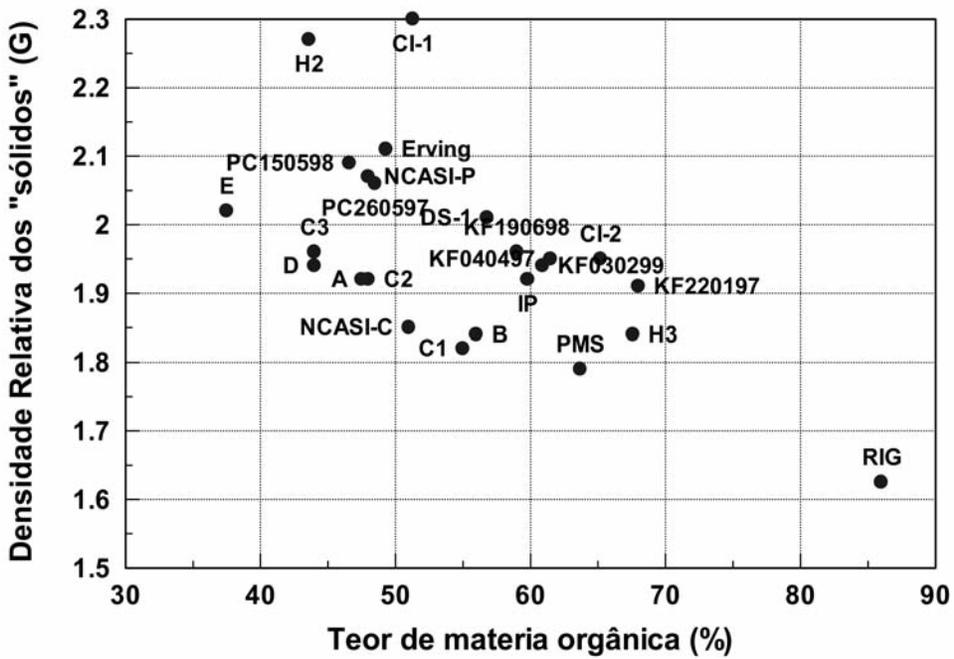


Fig. 2 – Teor de matéria orgânica versus densidade relativa dos “sólidos” em paralelo com outros resultados da literatura.

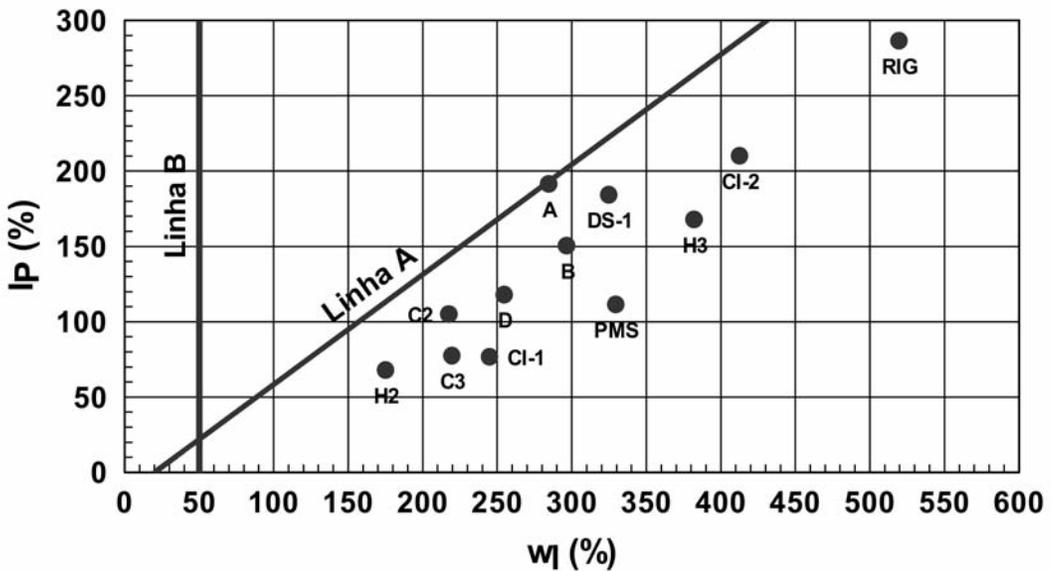


Fig. 3 – Carta de plasticidade com resultados do RIG em paralelo com outros resultados da literatura.

Convém ressaltar que as amostras utilizadas para os ensaios não sofreram secagem total. Para cada ponto obtido a amostra era seca revolvendo-a com uma espátula metálica dentro de um cadinho de porcelana até alcançar o teor de umidade estimado para cada ponto. O valor do limite de liquidez encontrado para o resíduo RIG foi de 520%.

Os ensaios de limite de Atterberg com o resíduo são de difícil execução devido ao alto teor de umidade do material, além do elevado teor de fibras que constitui o resíduo. As fibras dificultam a formação de uma superfície lisa e também inibem o aparecimento das fissuras no ensaio de plasticidade. Sendo assim os resultados devem ser interpretados com cuidado em termos de classificação geotécnica. Moo-Young e Zimmie (1996) também encontraram dificuldades e inconsistências durante os ensaios de limite de consistência, para os resíduos de papel. Em geral, os limites de Atterberg são questionáveis para sua utilização como parâmetro geotécnico deste tipo de resíduo.

3.2 – Ensaios de Compactação

A Figura 4 apresenta os resultados obtidos no ensaio de compactação. Observa-se que não há uma boa caracterização do peso específico seco máximo. Com base nos resultados adotou-se como teor de umidade ótimo do resíduo RIG 50% e o peso específico seco máximo $6,35 \text{ kN/m}^3$.

Os ensaios foram realizados partindo-se de uma amostra úmida e seca ao ar para cada ponto. Este procedimento foi adotado devido à dificuldade na homogeneização do material umidificado partindo-se da condição seca ao ar. Comportamento semelhante foi seguido por Moo-Young e Zimmie (1996).

Durante a secagem ao ar do resíduo, até uma umidade abaixo de aproximadamente 40%, formaram-se grandes torrões, que foram difíceis de serem rompidos e o resíduo perdeu a plasticidade inicial. Para o resíduo RIG foi difícil a determinação do ramo seco da curva de compactação. O mesmo comportamento foi notado por Moo-Young e Zimmie (1996). Os ensaios foram realizados em molde reduzido (Pinto, 1965). O molde possui 90 mm de altura e um diâmetro de 36 mm. O ensaio realizado no molde miniatura é bastante simples e de operação mais rápida do que os processos tradicionais de compactação. O principal objetivo de se usar este processo nesta pesquisa foi facilitar a compactação das amostras e também pela necessidade de se utilizar uma quantidade menor de material. A utilização deste método para o resíduo de papel forneceu uma curva de compactação muito próxima da curva de compactação do Proctor normal, apresentando as vantagens de ser mais rápido e de utilizar uma quantidade menor de amostra, o que facilitou a secagem do material, em comparação com o ensaio de Proctor normal.

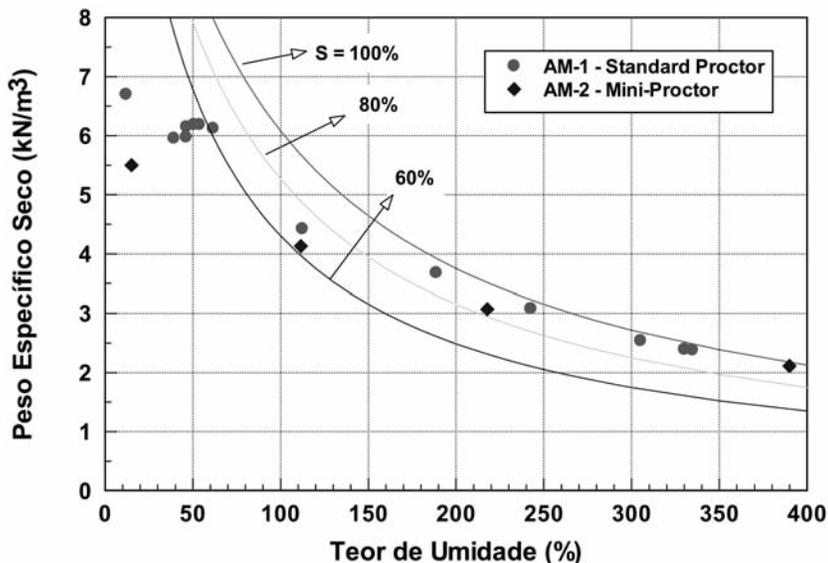


Fig. 4 – Resultados do ensaio de compactação.

3.3 – Ensaio de Adensamento

O ensaio empregado para a determinação da deformabilidade do resíduo foi o ensaio de compressão edométrica. Para a execução do ensaio usaram-se corpos de prova retirados de uma amostra compactada através do processo de Proctor Normal onde, após sua extração do cilindro, talhou-se o corpo de prova. A Tabela 5 apresenta os dados iniciais das amostras nos ensaios de adensamento bem como o índice de compressão obtido em cada ensaio. Salienta-se que o índice de compressão foi determinado no intervalo entre 100 kPa e 1000 kPa.

Os dados dos ensaios de adensamento obtidos para o resíduo RIG apresentaram uma variação no índice de compressão (C_c) de 0,79 a 1,88. Esta variação de valores está associada à variação do teor de umidade da amostra, que variou entre 51,1 a 131,0. O índice de compressão aumentou com o teor de umidade inicial da amostra.

Na literatura encontram-se algumas correlações empíricas apresentadas por Wang *et al.* (1991) e Moo-Young e Zimmie (1996) para a obtenção do índice de compressão. Aplicando estas correlações para o resíduo RIG podem-se comparar os índices de compressão encontrados no laboratório com as correlações apresentadas por Wang *et al.* (1991) e Moo-Young e Zimmie (1996). Na Tabela 5 estão apresentados os valores calculados juntamente com os valores obtidos experimentalmente para o resíduo RIG.

Nota-se uma boa aproximação das correlações (1 e 2) apresentadas por Wang *et al.* (1991) com os resultados dos ensaios obtidos com o resíduo RIG. Moo-Young e Zimmie (1996) apresentaram uma correlação do C_c com o teor de matéria orgânica (Tabela 5). No entanto, os resultados obtidos com a expressão (3) não foram bons para o resíduo RIG, apresentando um C_c muito elevado em comparação com C_c experimental. Salienta-se que uma correlação baseada unicamente no teor de matéria orgânica não poderia ser adequada, pois o teor de umidade inicial tem um papel fundamental no comportamento do material, pois impõe estruturas iniciais distintas.

Na Figura 5 apresentam-se os valores de C_c obtidos da literatura juntamente com a correlação sugerida por Wang *et al.* (1991) e apresentada por Moo-Young (1996). Pode-se observar uma boa concordância para os valores obtidos e avaliados. Os dados para o resíduo de papel RIG também são apresentados na Figura 5. A correlação apesar de não ser desenvolvida para materiais compactados apresentou uma boa concordância para o resíduo RIG.

3.4 – Ensaio de Condutividade hidráulica

O ensaio utilizado para determinar a condutividade hidráulica do resíduo de papel foi o ensaio de permeabilidade de carga variável.

Os ensaios de permeabilidade com carga variável foram executados concomitantemente ao ensaio de adensamento, nos estágios de tensão de 10, 40, 160, 640 kPa, após o recalque primário da amostra.

As características das amostras ensaiadas estão apresentadas na Tabela 5 (amostras 4,5 e 6). Na Figura 6 apresentam-se os resultados dos ensaios. O material pode ser classificado segundo sua condutividade hidráulica como tendo de baixa permeabilidade. No entanto, quando consideramos o índice de vazios associado à condutividade hidráulica observa-se que o material não se enquadra nos padrões conhecidos para solos normalmente encontrados na natureza (e.g. Lambe e Whitman, 1979).

3.5 – Ensaios de Cisalhamento

Os ensaios de cisalhamento direto foram realizados em amostras compactadas de acordo com o Proctor normal. Foram utilizadas tensões normais de 20, 40, 100, 200 e 400 kPa, com uma fase

Tabela 5 – Comparação do índice de compressão encontrado no laboratório com correlações apresentadas por Wang *et al.* (1991) e Moo-Young e Zimmie (1996).

Amostra	w_0 (%)	e_0	C_c (ensaio)	$C_c = 0,009w_0$ (1)	$C_c = 0,39e_0$ (2)	$C_c = 0,027O_c$ (3)
1	51,1	2,710	0,79	0,46	1,05	2,3
2	125,9	2,727	1,36	1,13	1,06	2,3
3	130,2	2,824	1,2	1,17	1,10	2,3
4	131,1	3,822	1,45	1,18	1,49	2,3
5	131,1	3,880	1,87	1,18	1,51	2,3
6	131,1	3,440	1,88	1,18	1,34	2,3

w_0 - Teor de umidade inicial; e_0 - Índice de vazios inicial; O_c - Teor de matéria orgânica.

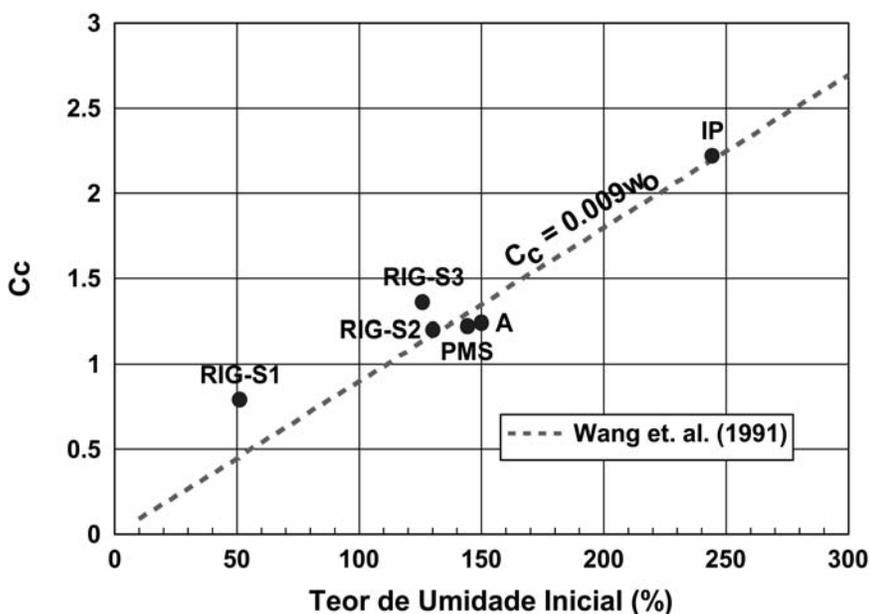


Fig. 5 – Relação entre o teor de umidade e o índice de compressão do resíduo RIG e comparação com correlação apresentada por Wang *et al.* (1991).

de adensamento de 24 horas seguida da fase de cisalhamento. Utilizou-se uma velocidade de ensaio de 0,016 mm/min. Considera-se que a velocidade de ensaio é suficientemente baixa para não gerar pressões na água dos poros. As curvas tensão deslocamento obtidas para as tensões normais maiores que 100 kPa indicam um comportamento onde não se observa pico e existe um aumento contínuo da tensão cisalhante com o deslocamento. Já o comportamento das amostras ensaiadas com tensões normais igual ou inferior a 40 kPa definiram uma resistência máxima.

As envoltórias de resistência obtidas para o resíduo RIG e para vários outros resíduos de papel encontrados na literatura (ver Tabela 4) são apresentadas na Figura 7.

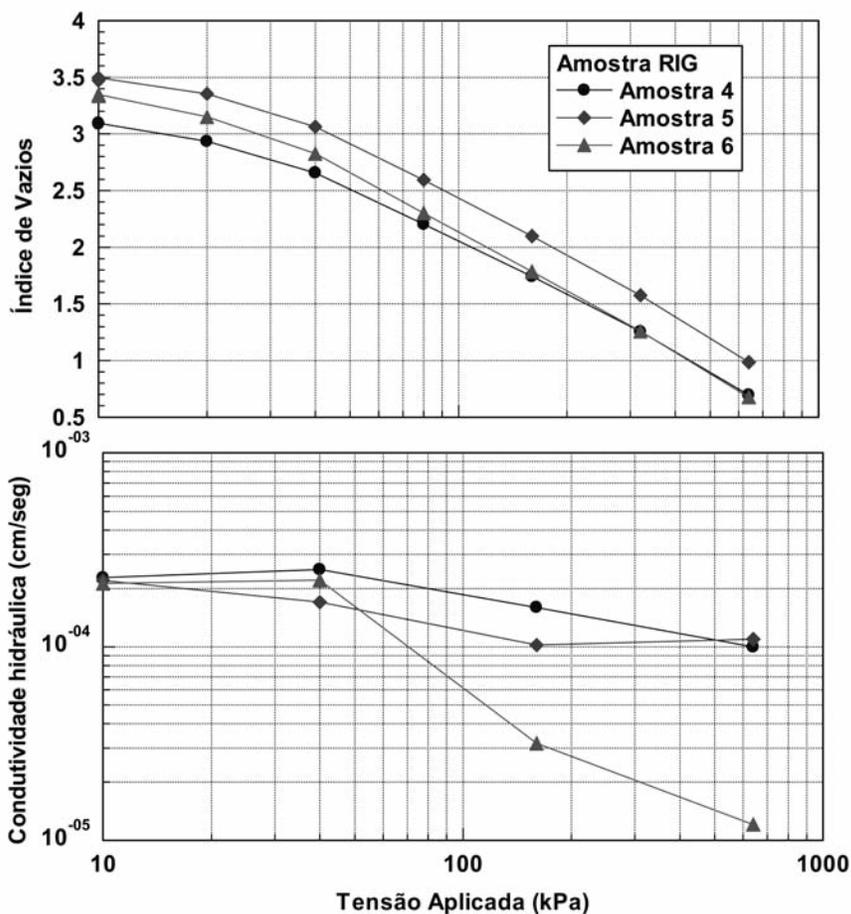


Fig. 6 – Resultado do ensaio de condutividade hidráulica em amostras do resíduo RIG.

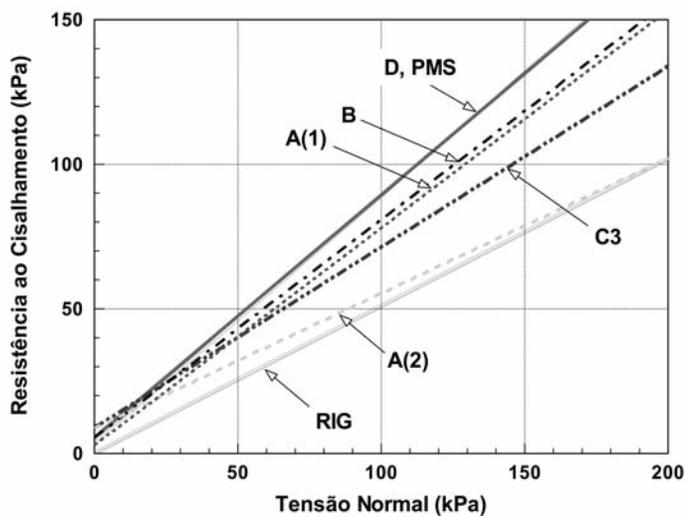


Fig. 7 – Envoltórias de resistência obtidas em ensaios de cisalhamento direto realizados no resíduo RIG e comparação com resultados da literatura.

3.6 – Ensaio de curva de retenção

A Figura 8 apresenta a curva de retenção obtida para o resíduo RIG. Dois métodos foram utilizados para impor sucções e assim obter a curva de retenção de água: placa de sucção e placa de pressão. Seis corpos de prova foram ensaiados. Nos três primeiros ensaios não foi possível a construção total da curva de retenção, pois durante a execução do ensaio houve o desenvolvimento de micélio fúngico na amostra. Assim nestes três corpos de prova a sucção máxima aplicada foi de 25 kPa. A amostra 3 foi desprezada, pois houve o crescimento de fungos antes mesmo do início da aplicação da pressão para a realização do ensaio. Um fungicida foi adicionado à amostra durante o ensaio de placa de sucção. Esta adição foi feita borrifando-se o fungicida diretamente no corpo de prova após a compactação. Após este processo, a amostra foi levada para a placa de sucção onde se deu início ao ensaio. Para níveis de sucção superiores a 30 kPa utilizou-se à técnica da placa de pressão. Na placa de pressão, as sucções aplicadas foram 50, 100, 200, 300, 400 kPa. Os corpos de prova utilizados foram os mesmos ensaiados na placa de sucção, ou seja, amostras 4, 5 e 6. Salienta-se que os valores iniciais apresentados para as amostras 4, 5 e 6 referem-se à situação após a aplicação do fungicida.

A curva de retenção em resíduos de papel não é comum de ser encontrada na literatura. O valor da sucção de entrada de ar obtido para o resíduo RIG é superior aos encontrados por Cabral *et al.* (2002). Estes autores encontraram valores variando entre 15 e 25 kPa, enquanto o valor obtido para o resíduo RIG foi superior a 50 kPa. Na Figura 8 estão apresentados os resultados dos ensaios da curva de retenção de água. Os resultados apresentam a variação do teor de umidade gravimétrico (base seca), grau de saturação e teor de umidade volumétrico (θ_w) com a sucção do material.

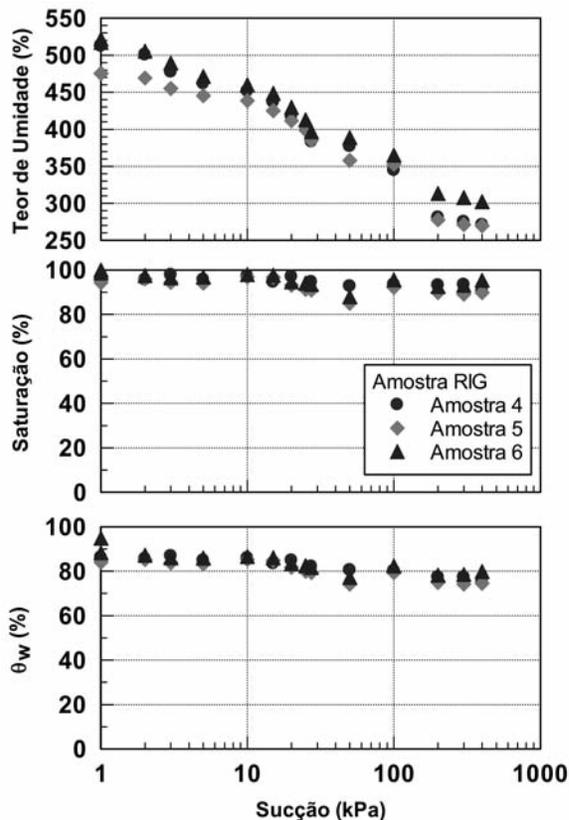


Fig. 8 – Curvas de retenção do resíduo RIG.

Observa-se na Figura 8 que o grau de saturação da amostra permanece elevado para todos os níveis de sucção impostos. Isto indica uma elevada capacidade do material em se manter saturado. Este comportamento é importante quando a cobertura é utilizada para reduzir o aporte de oxigênio para as camadas inferiores.

O material apresentado por Cabral *et al.* (2002) apresentou uma entrada de ar menor. O uso deste material deve sempre estar associado aos aspectos climáticos locais. Materiais com baixo valor de sucção de entrada de ar só podem ser utilizados em regiões onde haja excedente hídrico.

4 – DESEMPENHO DOS RECOBRIMENTOS NA PROVÍNCIA DE QUEBEC - CANADÁ

O resíduo oriundo da reciclagem de papel, considerando a fonte de fibra secundária utilizada (e.g. papel cartão, papel officio) e as características do processo, pode apresentar composição e estrutura diferentes. Uma mesma fábrica, produzindo o mesmo tipo de papel, pode ter resíduos distintos em épocas diferentes em função da eficiência do processo entre outras coisas. Mesmo com características distintas o resíduo de papel pode ser um material apropriado para coberturas de outros resíduos.

Desta forma, pretende-se nesta secção apresentar o comportamento típico de uma cobertura feita com resíduo de papel na província de Quebec, Canadá, tendo em vista que no Brasil ainda não se tem notícia do uso deste material como cobertura de aterros de resíduos.

O monitoramento de lisímetros, nos diferentes recobrimentos experimentais, indica um bom desempenho do subproduto da reciclagem do papel como barreira impermeável. Os valores de condutividade hidráulica (k) calculados a partir de dados dos lisímetros (L1 e L2) do sítio de St-Rosaire, apresentados na Figura 9a, mostram que o valor de k se situa em patamares inferiores a 10^{-7} cm/s, o que constitui uma condutividade bastante baixa e comparável à de uma argila. Para os cálculos de k foi assumido que há sempre água livre na superfície do recobrimento. Desta forma, considera-se o pior cenário de escoamento, pois o gradiente hidráulico é sempre ao menos igual à unidade. Os resultados apresentados na Figura 9a indicam uma tendência de decréscimo da condutividade hidráulica com o tempo, com o valor de k passando a valores inferiores a 10^{-8} cm/s. A hipótese de água livre na superfície é confirmada pelo monitoramento do nível da água na superfície da camada de granular (piezômetros PZ 1 (leste) e PZ 2 (oeste), durante o período de observação (Figura 9b). Como se pode observar, sempre foi registrada presença de água na camada sobrejacente à camada de SPRP, tendo sido registrado inclusive acumulações de até 60 cm, ou seja, em toda a espessura da camada sobrejacente.

As leituras com a sonda de TDR e as infrutíferas tentativas de amostragem de gás no interior dos recobrimentos indicam alto grau de saturação, confirmando a boa capacidade de retenção de água e um bom desempenho da cobertura do recobrimento como barreira capilar. Os recobrimentos com o subproduto da reciclagem de papel indicam uma eficiência de 100 % no controle da migração de oxigênio (Burnotte *et al.* 2004), aliado ao consumo deste pela biodegradação da matéria orgânica que faz parte do SPRP (Teixeira, 2001, Cabral et al. 2000). Em amostras periódicas de gás realizadas em três regiões (A, B e C) do sítio Clinton, imediatamente abaixo do recobrimento, nunca se detectou a presença de oxigênio (Figura 10). Medidas no interior do recobrimento não foram possíveis devido ao alto grau de saturação. Estas amostragens conforme apresentado na Figura 10 começaram a ser amostradas e analisadas logo após a construção do recobrimento e durante um período de 60 meses. Neste período foi possível detectar a presença de gás metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), o que confirma as condições anaeróbias do recobrimento. Os comportamentos das concentrações destes gases ao longo do tempo nos pontos amostrados (A, B e C) mostram uma tendência de diminuição das concentrações de CO_2 e um aumento das concentrações de CH_4 . A produção de gás em termos ambientais, bem como em relação a possíveis perdas de características do material devido à biodegradação mereceu atenção e estudos detalhados (Ait-Benichou *et al.*, 2008;

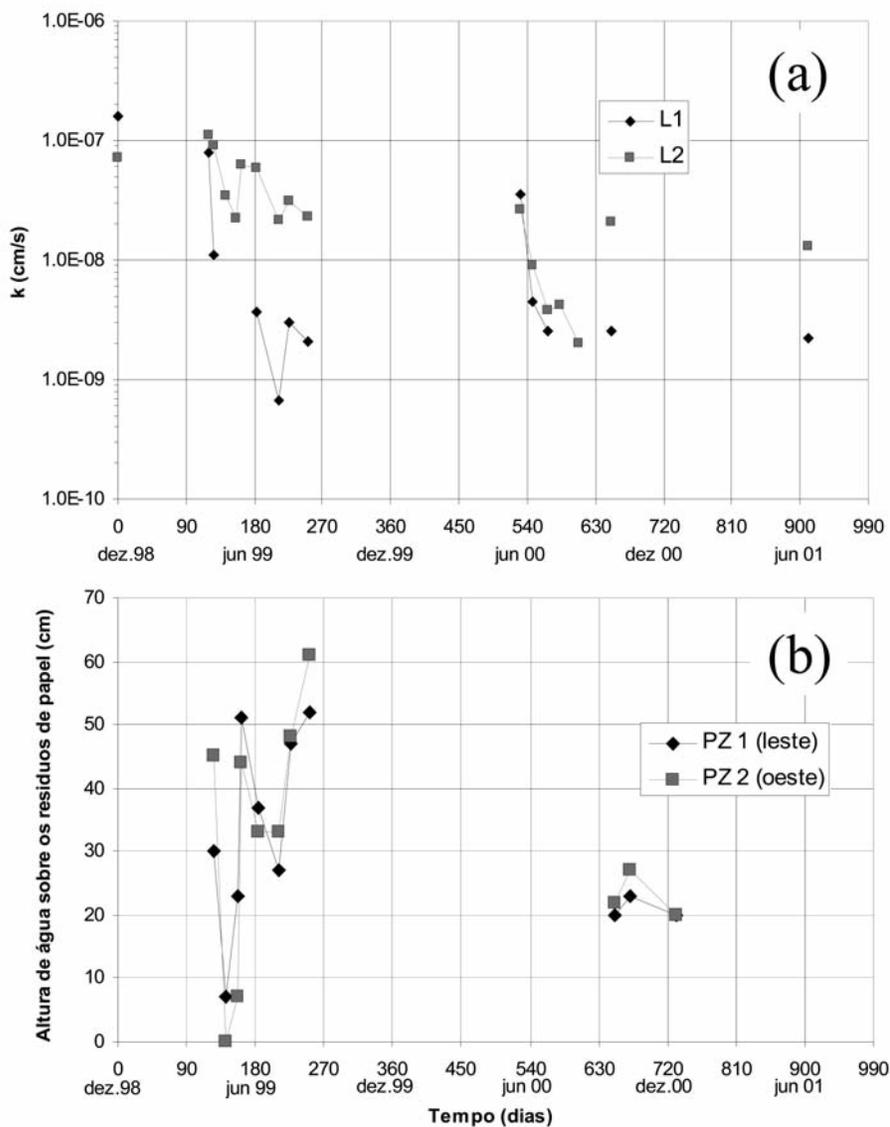


Fig. 9 – Evolução no tempo da condutividade hidráulica (k) e do nível de água acima da camada de resíduo do sítio de St-Rosaire.

Panarotto *et al*, 2005 e Teixeira, 2001). Estes estudos demonstraram que a produção de gás pode a longo tempo representar perda de massa do material. Contudo, em função das condições de instalação do recobrimento o processo é bastante lento.

A Figura 11 apresenta a curva de compressibilidade do recobrimento do sítio de Clinton. O recalque medido através das placas indica uma rápida compressão nos primeiros meses, correspondendo à consolidação primária. A compressão continua, mas de forma mais lenta e numa razão aproximadamente constante, indicando a presença de uma compressão secundária, associada entre outros factores à biodegradação. O aumento da compressibilidade com o tempo pode ser traduzido como um decréscimo na condutividade hidráulica, conforme pode ser observado na Figura 9a.

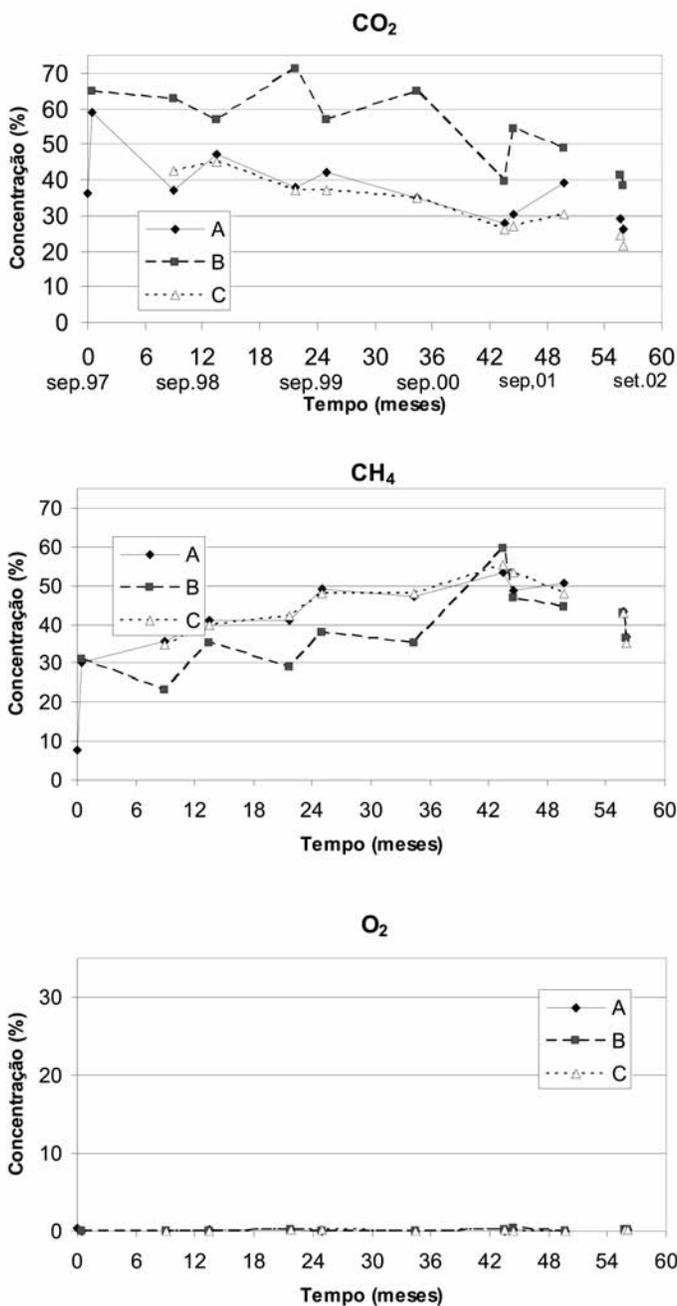


Fig. 10 – Concentração de O₂, CO₂ e CH₄ abaixo da camada de cobertura no sítio de Clinton.

A Tabela 6 apresenta alguns dados obtidos no monitoramento dos lisímetros instalados no sítio de Clinton, dentro da camada de resíduo, ou seja, 1,0 m sob a superfície. Para todos os percolados obtidos nos lisímetros, dos diferentes recobrimentos, foi detectada uma grande quantidade de sólidos totais dissolvidos, variando de 20 a 30 g/L. Esta presença de sólidos está associada à solubilização de substâncias do recobrimento por biodegradação. Cerca da metade dos sólidos são volá-

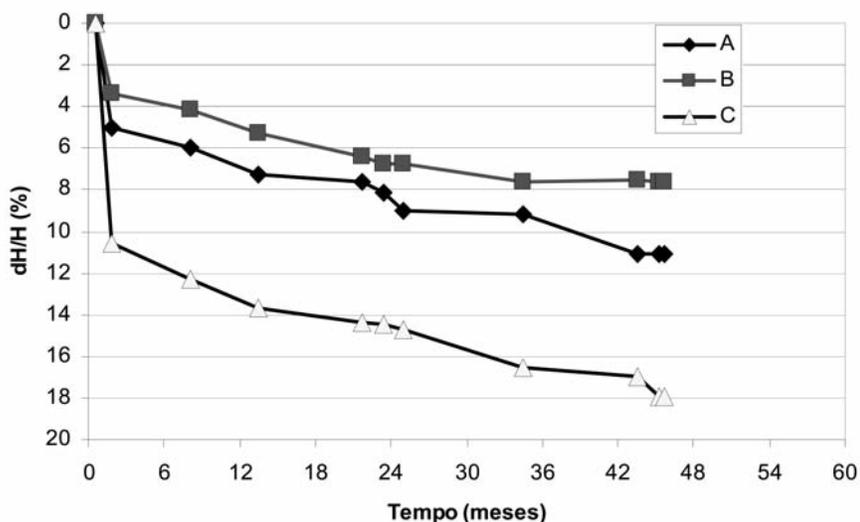


Fig. 11 – Curva de compressibilidade do recobrimento do sítio de Clinton.

teis. Além disso, de 20 ou 30 g de sólidos são perdidos para cada litro de percolado. Uma parte da compressão secundária observada na Figura 11 pode ser devido à perda do material por lixiviação, bem como pela produção de gás. Dados de laboratório indicam que o processo de biodegradação é lento (Teixeira, 2001).

Tabela 6 – Dados dos lisímetros do sítio de Clinton – 1998.

	L1	L2	L3
Volume acumulado (l/ano)	3,25	0,20	0,57
Infiltração (mm/ano)	14,4	0,9	2,5
Sólidos totais dissolvidos (g/l)	20	16	25
Fração orgânica dos sólidos (%)	54	56	54

5 – CONCLUSÃO

5.1 – Caracterização geotécnica do resíduo

Com base nas informações encontradas na literatura e fazendo uso da experiência obtida com a realização dos ensaios geotécnicos no resíduo de papel RIG, apresentam-se as seguintes conclusões:

Os resultados obtidos com a determinação dos limites de Atterberg refletem, de forma razoável, o comportamento potencial do material. Não é possível determinar a distribuição granulométrica destes materiais.

A determinação da curva de compactação confirmou que o material não apresenta pico bem caracterizado. Observou-se ainda que o aumento da energia de compactação não afetava a curva de compactação obtida de um modo muito significativo.

A análise dos ensaios de adensamento confirmou a elevada compressibilidade do material, mesmo no estado compactado.

A resistência ao cisalhamento do material indicou um valor de ângulo de atrito no limite inferior aos dos encontrados na literatura. Já o intercepto de coesão mostrou-se inferior aos da literatura e igual a zero.

Os ensaios de permeabilidade realizados durante o ensaio de adensamento, não conduziram a resultados de fácil interpretação. Aspectos relacionados com os processos biológicos podem ter afetado o comportamento do fluxo da água no material.

As curvas de retenção obtidas para o material sugerem um valor de entrada de ar, para a amostra compactada, superior a 50 kPa. Esta informação permite concluir que o material é adequado para ser utilizado como um dos elementos de barreiras capilares, onde a manutenção da saturação é fundamental.

O uso de resíduos da indústria para fins geotécnicos deve levar em conta a eventual variabilidade destes resíduos na sua fonte. Deve haver uma total conscientização por parte da indústria sobre a qualidade do resíduo gerado.

Os resultados dos ensaios realizados com o resíduo RIG indicam características diferentes das normalmente encontradas na literatura. Tais resultados indicam um material com maior capacidade de retenção de água, porém com grande capacidade de contração.

5.2 – Recobrimentos experimentais

A utilização de subprodutos da reciclagem de papel como material de recobrimento seja em aterros sanitários ou em sítios de mineração tem se demonstrado uma técnica viável tanto do ponto de vista econômico como ambiental.

Considerando que o material tem capacidade de retenção de água relativamente alta, ele pode manter um alto grau de saturação. Isto contribui grandemente na redução da migração de oxigênio e, por extensão, na redução da DMA gerada em parques de resíduos de mineração, além de se comportar como barreira impermeável devido à sua baixa condutividade hidráulica em aterros sanitários.

O desempenho dos recobrimentos depende de um controle efetivo do teor de água durante a compactação. Considerando que o resíduo é orgânico, uma camada superior a 1,0 m tem se mostrado suficiente para aceitar o recalque com o tempo.

A composição predominantemente orgânica do resíduo confere a ele um potencial de biodegradação, tanto em condições aeróbias, quanto anaeróbias. Nos estudos realizados nas células experimentais no Canadá, a biodegradação não gerou nenhum efeito adverso em relação ao comportamento do resíduo como recobrimento, tanto em aterro como em sítios de mineração. O consumo de oxigênio devido a biodegradação aeróbia associada à saturação permitiu uma eficiência de 100% da barreira em relação a migração do oxigênio.

6 – AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a RIGESA pelo fornecimento do material ensaiado. Os autores da USP agradecem a CAPES e CNPq pelo apoio financeiro dado. Este trabalho também foi parcialmente custeado pelo National Science and Engineering Research Council of Canada (NSERC) em parceria com as Indústrias Cascade Inc., Les Papiers Perkins Ltd. e Désencrage Cascade Inc.

7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ait-Benichou, S., Cabral, A.R., Teixeira, C. E. (2008). Evolution of biodegradation of deinking by-products used as alternative cover material. *Waste Management* 28(1): 85-96.

- Andersland, O. B. e Mathew, J. (1973). Consolidation of high ash papermill sludges – Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, vol. 99 n.SM5, pp. 365-374.
- Audet, C., Lefebvre, G., Cabral, A. R., and Burnotte, F. (2002). State of development in the valorization of deinking by-products as an alternative to fine grained soils. TAPPI, Montréal.
- Brown, R. A., Fourie, A. B., and Snyman, R. (1998). Pulp sludge: waste or valuable capping material Proc. Wastecon '98, Fourteenth Congress of the Insitutte of Waste Management, Kempton Park, 564-579.
- Burnotte, F., Cabral, A. R. and Lefebvre, G. (2004). "A Simple Field Method to Monitor the State of Saturation in Capillary Barriers." Geotechnical Testing Journal 27(6): 614-618.
- Cabral, A. R., Burnotte, F. e Lefebvre, G. (1999). Design construction and monitoring of waster rock cover using pulp and paper residues. Symposium on Tailings and Mine Wastes, Fort Collins, Colorado., Jan., pp. 405-415 Proceedings.
- Cabral, A. R., Burnotte, F., Lefebvre, G. e Panarotto, C.T. (2002). Geotechnical characterization of a pulp and paper (deinking) residue used in cover systems. Environmental Geotechincs (4^a ICEG), v. 1, pp. 207-212.
- Cabral, A. R., Tremblay, P. and Lefebvre, G. (2004). "Determination of the diffusion coefficient of oxygen for a cover system composed of pulp and paper residues." Geot. Testing J. 27(2): 184-197.
- Cabral, A.R., Lefebvre, G. Burnotte, F. Panarotto, C.T. e Pastore, E.L. (1999). Use of pulp and paper residues as an alternative cover material to landfill and to acid generating tailings. Segundo Seminário de Meio Ambiente em Industria de Processo. São Paulo, Jun pp. 56-70.
- Cabral, A.R., Racine, I., Burnotte, F., and Lefebvre, G. (2000). Diffusion of Oxygen through a Pulp and Paper Residue Barrier. Canadian Geotechnical Journal, 37, pp. 201-217.
- Chabot, R., Marchildonil, I., Labinte, M. and Lavallée, H.-C. (1991). "Que faire des boues de désencrage?" Journal des Pâtes et Papiers, Nov. et Déc.
- Ettala, M. (1993). Quality of deinking sludge. J. Environ. Sci. Health, A28(4), 923-932.
- Floess, C. H., Smith, R. F. J. and Hitchcock, R. H. (1995). "Capping with fiber clay." Journal of Civil Engineering: 62-63.
- Kamon, M., Inazumi, S., Rajasekaran, G. and Katsumi, T. (2002). "Evaluation of waste sludge compatibility for landfill cover application." Soils & Foundations 42(4): 13-27.
- Kamon, M., Katsumi, T., Rajaseakran, G. e Inazumi, S. (2000). Waste sludges utilization as landfill cover. Geo-Eng 2000, Melbourne, Australia, CD-ROM.
- Kraus, J. F., Benson, C. H., Van Maltby, C., and Wang, X. (1997). Laboratory and field hydraulic conductivity of three compacted paper mill sludges. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 123(7), 654-662.
- Lambe, T.W., e Whitman, R.V. (1979). Soil mechanics, SI version. John Wiley and Sons, New York.
- LaPlante, K. (1993). Geotechnical investigation of several paper mill sludges for use in landfill covers, Master thesis, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, New York, United States.
- Latva-Somppi, J., Tran, H. N., Barham, D., and Douglas, M. A. (1994). Characterization of deinking sludge and its ashed residue. Pulp & Paper Canada, 95(10), T382 - T385.

- Malmstead, M. J., Bonistall, D. F. and Van Maltby, C. (1999). "Closure of a nine-acre industrial landfill using pulp and paper mill residuals." TAPPI Journal 82(2): 153-160.
- Maltby, C. V., and Eppstein, L. (1994). A field case study of the use of paper industry sludges as hydraulic barriers in landfill cover systems. Proceedings of Hydraulic Conductivity and Waste Contaminant Transport in Soil, Philadelphia, 546-58.
- Moo-Young, H.K. e Zimmie, T. F. (1996b). Effects of organic decomposition mill sludges as landfill cover material", Environmental Geotechnics. Masashi Kamon (editor), Balkema. pp. 827-832.
- Moo-Young, H.K. e Zimmie, T. F. (1996a). Geotechnical properties of paper mill sludges for use in landfill cover" Journal of Geotechnical Engineering, pp.768-775, Sept..
- Panarotto, C. T., Cabral, A. R., Lefebvre, G. (2005). Environmental, geotechnical and hidraulic behavior of a cellulose-rich by-product used as alternative cover material. Journal of Environmental Engineering and Science. 4(2): 123-138.
- Pinto, C.S. (1965). Equipamento reduzido para moldagem de corpo de prova de solo- aditivo, I Simpósio sobre Pesquisas Rodoviárias, Rio de Janeiro. Ago..
- Quiroz, J. D.; Simpson, P.T. and Zimmie, T. F. (2000). "Evaluation of paper sludge landfill cover sttlement" – Geo-Denver – Environmental Geotechnics – GTP 105, pp. 16-31.
- Quiroz, J. D. e Zimmie T. F. (1998). Paper mill sludger landfill cover construction. Recycled materils in geotechnical applications, Geotechnical Special publication Number v.79, pp.19-36.
- Teixeira, C.E. (2001). Evolution biochimique des résidus de désencrage dans un contexte de valo - risation comme barrière de recouvrement. Tese de doutorado (Ph.D), Université de Sherbrooke, Canada.
- Teixeira, P,F. (2002). Dissertação de Mestrado - Características Geotécnicas de um resíduo de papel, Escola Politecnica , Universidade de S.P..
- Vlyssides, A. G., and Economides, D. G. (1997). Characterization of wastes from a newspaper wash deinking process. Frenesius Environmental Bulletin, 6, 734-739.
- Wang, M. C.; He, J. Q. and Joa, M. (1991). "Stabilization of water plant sludge for possible utilization as embankment material" – The Pennsylvania State University, State College, PA.
- Wang, M. C. e Tseng, W. Permeability behavior of water treatment sludge. Journal of Geotechnical Engineering. 1993. v. 119, p.1672-1677.
- Zimmie, F. T. e Moo-Young, H. K. (2000). Hydraulic conductivity of paper sludger used for landfill covers. Specialty Conference on Geoenvironment 2000, Special publication.