

## Uso de Resíduos do Processo Reciclagem de Papel como Material de Recobrimento Alternativo de Aterros Sanitários e de Rejeitos de Mineração Geradores de Drenagem Ácida

**Use of Pulp and Paper Residues as an Alternative Cover Material to Landfill and to Acid Generation Tailings/ Alternativa de Basureros Sanitarios y de Mineralización Generadores de Drenaje Ácida**

### Sumário

Quantidades importantes de resíduos produzidas pelas indústrias de celulose e papel ainda são enviadas a aterros sanitários com custos elevados. Alguns destes resíduos têm características hidráulicas próprias que os tornam atraentes como materiais alternativos na composição de sistemas de recobrimento de áreas, destinadas a rejeitos geradores de drenagem minera-ácida e a aterros sanitários.

A drenagem minera-ácida (DMA) resulta da oxidação do enxôfre, quando estes últimos entram em contato com oxigênio e água. O controle da DMA pode envolver a colocação de uma barreira ao oxigênio, de modo a cortar o suprimento de  $O_2$  aos resíduos. A literatura técnica é bastante rica sobre os princípios e o uso de recobrimentos (ou coberturas) de solos saturados [(como barreiras capilares) - (Nicholson et al., 1989; Yanful e St-Amaud, 1991)].

Em resumo, materiais altamente saturados reduzem drasticamente a migração de  $O_2$  (Yanful, 1993; Cabral et al., 2000). Resíduos de celulose e papel, particularmente resíduos de destintamento, têm-se demonstrado quase tão impenetráveis quanto os materiais argilosos freqüentemente usados como recobrimento em aterros. Visto que há inter-relação entre a capacidade de retenção de água e a condutividade hidráulica, a alta capacidade de retenção de água dos resíduos do destinta-

---

\*A.R. Cabral

---

\*G. Lefebvre

---

\*F. Burnotte

---

\*C.T. Panarotto

---

\*E.L. Pastore

---

**T**his Paper presents the results of an investigation on pulp and paper (P&P) residues resulting from the deinking process at two mills in Eastern Canada. The residues are evaluated in terms of composition, hydraulic conductivity, oxygen diffusion and consumption and their biochemical evolution (which may affect the geomechanical and hydraulic properties). While the paper reports on the results of an on-going laboratory study, field observations are used to confirm laboratory results. The potential of deinking residues as cover material is evaluated both for landfills and acid generating tailings.

---

\*UNIVERSITY OF SHERBROOKE - CANADÁ



mento torna-os atraentes para emprego como camadas saturadas em sistemas de cobertura para resíduos reativos. Cerca de 40% (peso/peso) dos resíduos do destintamento estão associados a uma fase mineral. Os restantes 60% são compostos de matéria orgânica volátil (basicamente fibras de celulose), que eventualmente consomem oxigênio em decorrência da biodegradação.

Os resíduos do destintamento representam assim, não somente uma barreira de baixa condutividade hidráulica, mas também oferecem a capacidade de consumir  $O_2$ . Foi então conduzido um programa de testes de laboratório para determinar a condutividade hidráulica do material, suas características de compactação, sua capacidade de retenção de água e o potencial de difusão de oxigênio através dele, sob condições variadas. Os processos de biodegradação estão sendo identificados, e empenho está sendo empreendido na quantificação da massa perdida ao longo do tempo.

Este trabalho apresenta resultados com dados de campo obtidos mediante a construção e o monitoramento de quatro recobrimentos (dois sobre resíduos de mineração e dois sobre aterros sanitários). Os dados de campo e de laboratório confirmam que os resíduos do destintamento desempenham seu papel de barreira capilar. Nos dois locais com rejeitos de mineração, as concentrações de  $O_2$  no recobrimento ficaram rapidamente não-detectáveis, o que significa 100% de eficiência na prevenção do fluxo de  $O_2$ . O consumo tem sido identificado como mecanismo importante na redução do fluxo de oxigênio, enquanto que a difusão é baixa devido à alta saturação ( $S_r$ ) mantida na cobertura. Embora tenham sido obtidos baixos valores de condutividade hidráulica, podem ser conseguidas melhorias com a otimização do procedimento de compactação do material.

## Introdução

Grande parte dos resíduos gerados durante o processo de destintamento na reciclagem do papel é composta pelos diversos materiais usados em sua fabricação, em particular, calcita e caulim. A matéria orgânica (essencialmente fibras de celulose) é também um com-

ponente importante. Diversos estudos têm demonstrado que estes resíduos, quando compactados, podem ter uma condutividade hidráulica bastante semelhante a das argilas compactadas (Kraus et Al., 1997), constituindo assim um material excelente para uso em coberturas de baixa condutividade hidráulica. O benéfico aproveitamento dos resíduos do destintamento tem, evidentemente, um impacto econômico significativo; de um lado por economizar custos de eliminação para a indústria e, por outro lado, por oferecer alternativas econômicas para os sistemas de recobrimentos.

Baixas condutividades hidráulicas têm sido efetivamente obtidas em diversos locais nos Estados Unidos, onde foram usados resíduos de papel e celulose em sistemas de recobrimentos de aterros domésticos (Floess e Al., 1995; Moo-Young e Zimmie, 1996a, b; Kraus et Al., 1997).

Considerando que materiais com baixas condutividades hidráulicas também têm alta capacidade de retenção de água, é de se esperar que resíduos de destintamento sejam excelentes componentes para a construção de barreiras capilares. Cabral et al. (1996, 1997a, b; 1998, 1999) tratam do bom desempenho dos resíduos do destintamento como recobrimentos capilares no controle da migração de oxigênio para os rejeitos de mineração. A pequena quantidade de oxigênio que poderia se mover por difusão através da barreira capilar acaba sendo consumida por biodegradação, quando são usados resíduos de papel e celulose.

Este trabalho apresenta os dados de uma pesquisa sobre resíduos de papel e celulose (P&C) provenientes do processo de destintamento de duas fábricas do leste do Canadá. Os resíduos são avaliados quanto à composição, condutividade hidráulica, difusão e consumo de oxigênio e suas evoluções bioquímicas (o que pode interferir nas propriedades geomecânicas e hidráulicas). Ao mesmo tempo que o trabalho informa sobre os resultados de um estudo de laboratório em andamento, as observações de campo são utilizadas para confirmar os resultados de laboratório. O potencial dos resíduos do destintamento como material de re-

cobrimento é avaliado, tanto para aterros como para rejeitos geradores de ácidos.

## Retrospecto

Os projetos de recobrimento de aterros sanitários têm vários elementos em comum. Com algumas variações, o recobrimento consiste nas seguintes camadas, de cima para baixo: uma cobertura vegetal; uma camada de proteção; uma camada de controle hidráulico; e uma camada de controle/interceptação de biogás. Podem ser adicionadas camadas complementares, dependendo dos requisitos do projeto. As exigências postas na camada de controle hidráulico variam significativamente de um país para outro. Em Quebec, Canadá, por exemplo, está sendo proposta uma legislação estabelecendo que a condutibilidade hidráulica da camada de controle hidráulico deve ser inferior ou igual a  $10^{-5}$  cm/s. Podem ser empregados materiais alternativos, desde que tenham sido comprovados como tão eficientes quanto os materiais descritos no texto legislativo. Em Ontário, Canadá, a legislação estabelece que o recobrimento final não é "considerado para prevenir infiltração de águas superficiais ou da chuva, mas para controlar a infiltração, de modo que a geração de chorume, a decomposição dos detritos e a resultante formação de gás possam se desenvolver de forma controlada" (MEE, 1993). O recobrimento final deve funcionar tão longamente quanto necessário, para que fique garantida a proteção do meio ambiente.

Ainda que, em termos de condutividade hidráulica, estabeleça padrões de desempenho mais severos ( $k_{cobertura} < k_{fundo}$ ), a legislação dos Estados Unidos (USEPA, 1991; USEPA, 1992) também aceita a equivalência de materiais. Em uma situação em que a camada do fundo é projetada para que  $K_{fundo} < 10^{-7}$  cm/s, qualquer material alternativo deverá satisfazer ou exceder esta exigência.

Devido a seu potencial de baixa condutividade hidráulica, resíduos de P&C constituem-se em material interessante para aplicação em sistemas de cobertura final de aterros sanitários (Kraus e Al., 1997). Numerosos estudos informam o uso prático e bem-sucedido de resíduos de P&C, tanto em sistemas de



recobrimento de baixa condutividade hidráulica (Floess e al., 1995, Van Maltby & Eppstein, 1994 e Aloisi & Atkinson, 1991) quanto em sistemas de barreira de oxigênio para rejeitos geradores de DMA (Cabral e al., 1996-1997a, b; 1998,1999).

A condutividade hidráulica dos resíduos de P&C varia de  $4,2 \times 10^{-4}$  a  $5,8 \times 10^{-8}$  cm/s (NCA-SI, 1990), dependendo, principalmente, da composição inicial, da compactação do resíduo e do teor de umidade. Kraus et al. (1997) determinaram que podem ser obtidas condutividades hidráulicas em resíduos de papel e celulose menores que  $1 \times 10^{-7}$  cm/s a baixas pressões de confinamento (<10 kPa), quando o material é compactado, aplicando-se uma energia semelhante ao *Standard Proctor* e um teor de umidade entre 50 a 100% acima do ótimo. Outros resultados mostram que a condutividade hidráulica pode variar de  $2 \times 10^{-7}$  a  $2 \times 10^{-8}$  cm/s (Zimmie e Moo-Young, 1995).

Resíduos de P&C podem ser também usados como parte do sistema de recobrimento de parques de resíduos de mineração potencialmente causadores de DMA. Esta última é originada quando resíduos de mineração resultante do processamento de minério rico em sulfetos, como a pirita ( $\text{FeS}_2$ ) e a esfalerita ( $\text{ZnS}$ ), oxidam. O processo de oxidação requer a presença de  $\text{O}_2$  e água e é mediado por bactérias, como as *Thiobacillus Ferrooxidans* (Yanful and St-Arnaud, 1992).

As várias soluções adotadas ou propostas para o controle da DMA envolvem o manejo (limitação, redução, exclusão, tratamento ou outros) de um dos fatores anteriormente citados. Descrição detalhada de várias técnicas

pode ser encontrada em Tremblay (1993). Os princípios e usos de resíduos em recobrimentos têm sido relatados extensivamente na literatura técnica (Nicholson et Al., 1989; Yanful and St-Arnaud, 1991; Yanful, 1993; Broman et A., 1991, etc.).

O controle da DMA mediante redução do *input* de  $\text{O}_2$  pode ser conseguido por diversas técnicas: coberturas de água, barreiras úmidas (turfa, brejos) e recobrimentos "secos". Estes últimos são melhor definidos como recobrimentos com efeito de barreira capilar (REBC). A função do recobrimento é de evitar o fluxo difuso de  $\text{O}_2$  gasoso ao favorecer condições de saturação ou de quase saturação. Visto que o coeficiente de difusão do oxigênio em água é perto de 10.000 vezes menor que o seu coeficiente de difusão no ar (Yanful, 1993), a um alto grau de saturação (Sr), o fluxo difuso é amplamente atenuado.

Os REBC são constituídos de uma barreira impermeável (tal como uma geomembrana), ou uma barreira capilar (uma camada de solo de granulometria fina sobreposto a uma camada de material mais grosso), ou qualquer outra combinação de materiais, parcialmente saturados, envolvendo, por exemplo, material orgânico (tal como compostagem, lodo municipal, subprodutos florestais etc.; (Stogran and Wiseman, 1995). Uma camada de solo em sistema de cobertura colocada sobre resíduos geradores de ácido deve então ter capacidade de retenção de água suficientemente alta para permanecer saturada em todas as condições e, ao mesmo tempo, ser impenetrável o bastante para controlar a infiltra-

ção de água. Portanto, a conseqüente lixiviação de metais solubilizados e o fluxo de  $\text{O}_2$  dissolvido (embora lento, este tipo de fluxo pode manter o processo de oxidação por séculos). Os resíduos do destintamento têm uma capacidade de retenção de água relativamente alta e uma baixa condutividade hidráulica. Como conseqüência, deveriam constituir-se em excelente componente para a construção de barreira capilar destinada a controlar a migração de oxigênio para os rejeitos reativos da mineração.

### Programa de testes

Foi realizado um minucioso programa de testes de laboratório sobre diferentes resíduos de destintamento de duas fábricas de papel de Quebec, Canadá, como indicado na tabela 1. Foram primeiramente determinadas as propriedades geotécnicas padrão (teor de umidade, densidade de sólidos (Gs), curvas Proctor de compactação, conteúdo de matéria orgânica) de todas as amostras, paralelamente à caracterização físico-química mais detalhada. A seguir, foram realizados testes de retenção de água, de consumo e difusão de oxigênio e de condutividade hidráulica sobre uma série de materiais compactados com diferentes teores de umidade. Os dados obtidos foram comparados com dois recobrimentos construídos sobre áreas potencialmente geradoras de DMA, os parques de Eustis e Clinton. A instrumentação e o monitoramento destas coberturas estão detalhados em Cabral et al. (1996, 1997 a) b), 1998). As condições (energia de compactação e teor de umidade) foram também avaliadas *in situ* em dois recobrimentos parciais construídos sobre dois aterros sanitários (Miron e St-Rosaire).

Tabela 1 - Programa de testes

| Resíduo                | Testes de laboratório <sup>1</sup> Realizados |
|------------------------|---|
| KF 95/96 <sup>2</sup>  | -   |
| KF 220197              | WR  |
| KF 040497 <sup>3</sup> | WR, D, C, k                                   |
| PC 260597 <sup>3</sup> | K   |
| PC 150598 <sup>4</sup> | K   |
| KF 190698 <sup>5</sup> | K   |
| KF 030299              | K   |

<sup>1</sup>: WR = Retenção de água; D = Difusão; C = consumo; k = Condutividade hidráulica.

<sup>2</sup>: Semelhante ao material usado na construção da célula Eustis.

<sup>3</sup>: Semelhante ao material usado na construção da célula Clinton (mistura de dois resíduos).

<sup>4</sup>: Semelhante aos materiais usados na construção da célula Miron.

<sup>5</sup>: Semelhante ao material usado em uma fase da construção da célula St-Rosaire.

## RESULTADOS DE LABORATÓRIO

### Propriedades geotécnicas

A composição do material do destintamento varia de acordo com a matéria-prima usada no processo de reciclagem e com o tipo de polpa produzida. Os resíduos testados têm sua principal origem na reciclagem de papel branco pós-consumo (identificado pela indústria como 'misto de escritório' ou *office mix*), processado de modo a render polpa apta à produção de lenços de papel.



Tabela 2 - Propriedades básicas dos resíduos do destintamento

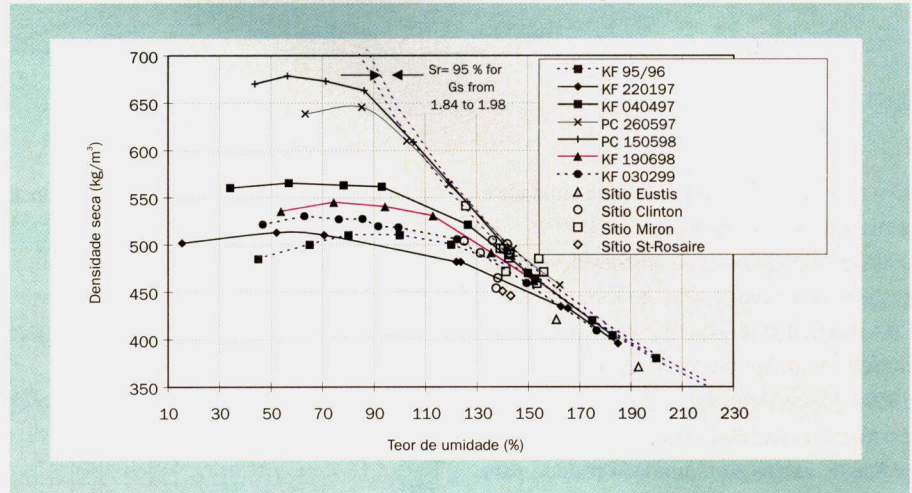
| Resíduo $r_{d \text{ máx}}$<br>( $\text{kg/m}^3$ )(%) | $W_{\text{opt}}$<br>(%) | $w_{\text{recept.}}$ | $G_s$<br>(%) | Cont.Orgânicos |      |
|---|-------------------------|----------------------|--------------|----------------|------|
| KF 95/96  | 520                     | 100                  | 140-200      | -              | -    |
| KF 220197   | 520                     | 60                   | 123          | 1,91           | 68,0 |
| KF 040497   | 570                     | 60                   | 124          | 1,95           | 61,5 |
| PC 260597   | 645                     | 80                   | 160          | 2,06           | 48,5 |
| PC 150598   | 680                     | 55                   | 90           | 2,09           | 46,6 |
| KF 190698   | 545                     | 75                   | 130          | 1,96           | 59,0 |
| KF 030299   | 530                     | 70                   | 126          | 1,94           | 60,9 |

O resíduo de destintamento é constituído de material fibroso, altamente compressível (esponjoso), com textura ao amassamento semelhante ao *papier-maché*, de coloração levemente cinzenta. É transportado com teor de umidade, variando de 120% a 200%. Seu teor seco (massa seca/massa total) varia de 33 % a 45%. O conteúdo de matéria orgânica é alto, variando de 48% a 72% (perda de peso na queima). O pH dos resíduos situa-se entre 7,0 e 8,0.

Na figura 1 são apresentadas algumas curvas de compactação Proctor realizadas em resíduos de destintamento. Elas mostram que estes resíduos têm características de compactação de grande variabilidade. A máxima densidade seca ( $r_{d \text{ máx}}$ ) varia de 580 a 680  $\text{kg/m}^3$ , com teor de umidade ótimo ( $W_{\text{opt}}$ ) entre 55 e 100%, conforme detalhado na tabela 2. O teor de umidade no recebimento ( $w_{\text{recept.}}$ ) é também indicado na tabela 2. O ( $w_{\text{recept.}}$ ) está sempre acima do ótimo. O ideal de energia de compactação e de teor de umidade deve ser definido em cada caso, mas, geralmente, quando é desejada uma baixa condutividade hidráulica, situa-se entre 50% e 70% acima do ótimo. A figura 2 mostra fotografia de amostras compactadas dos lados seco e úmido do ótimo. São evidentes os macroporos na amostra compactada do lado seco (amostra da esquerda).

Como mostrado na tabela 2, a densidade dos sólidos ( $G_s$ ) e o teor de matéria orgânica também variam substancialmente. Geralmente,  $G_s$  é inversamente proporcional ao teor de matéria orgânica devido à baixa densidade do material orgânico quando comparada àquela do material inorgânico (Moo - Young et Zimmie, 1996b).

Figura 1 - Curvas *standard* de compactação Proctor para vários resíduos do destintamento



### Propriedades físico-químicas

A avaliação da composição físico-química de resíduos do destintamento tem mostrado que os maiores componentes do material são a matéria orgânica volátil, a calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) e o metacaulim. Os resultados são resumidos na tabela 3.

A estrutura morfológica observada em microscópio eletrônico de varredura (SEM) indicou duas zonas diferentes: fibras, de celulose livres e fibras, formando agregados com material mineral (figura 3a). Algumas amostras apresentaram estruturas de fungos (figura 3b). As imagens mostram que as fibras não estão recobertas por uma camada de material inorgânico. Estas últimas se constituem, basicamente, de fragmentos espalhados entre as fibras. O material volátil é principalmente celulose, que funciona como fonte de carbono para microrganismos. Em condições aeróbias, ocorre colonização espontânea dos resíduos do destintamento por fungos após poucas semanas, tal como observado em laboratório.

Figura 2 - Resíduos do destintamento compactados nos limites seco/molhado do ponto Proctor ótimo

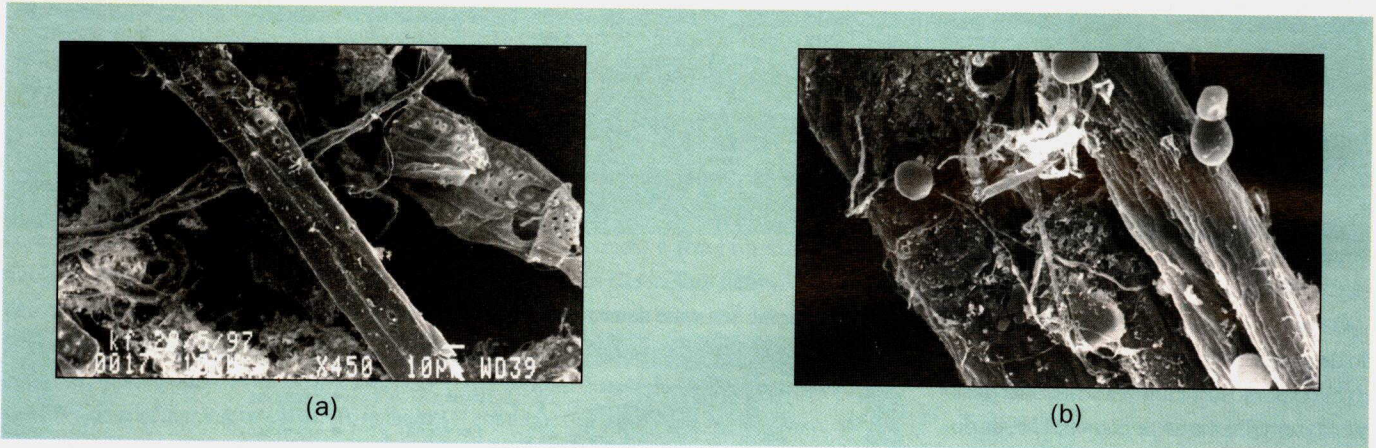


### Condutividade hidráulica

A condutividade hidráulica ( $k$ ) foi avaliada mediante testes com oedômetro. Foram aplicadas cargas normalmente crescentes, usualmente 12, 24, 48 e 96 kPa. Foram realizados testes de variabilidade da condutividade hidráulica, sob cada carga, depois de permitir consolidação durante 24 horas. Como base para os cálculos de condutividade hidráulica foi aplicada a lei de Darcy. Os testes fo-



Figura 3 - Fotografia de microscópio eletrônico de varredura (SEM). (a) resíduos do destintamento - 450x (b) Fibra de celulose do resíduo do destintamento colonizada por fungos - 2000x



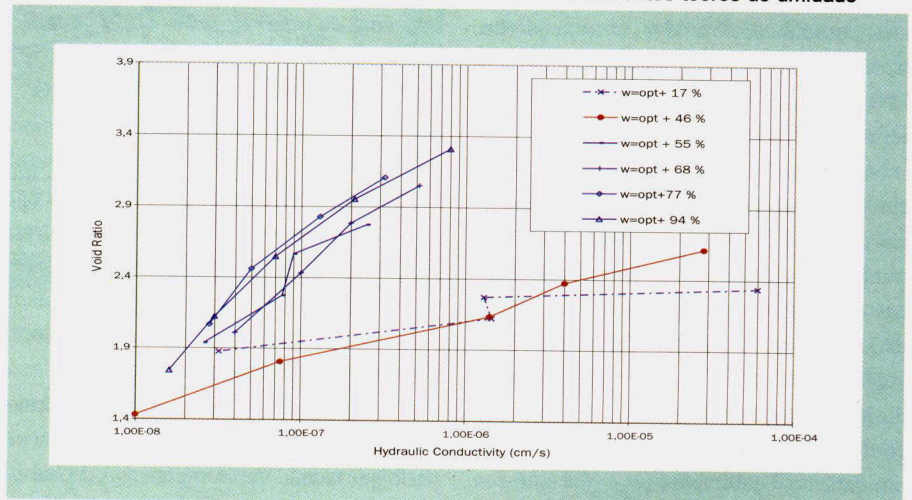
ram realizados, variando o teor de umidade e a energia de compactação.

Os resíduos do destintamento devem ser compactados com teores de umidade 50 a 70% acima do ótimo para a obtenção da condutividade hidráulica mínima (Kraus et al., 1997; Cabral, 1997 b). A figura 4 apresenta a variação da condutividade hidráulica com o índice de vazios para um dado resíduo para vários teores de umidade de compactação. Um comportamento semelhante foi observado em outros resíduos testados na Universidade de Sherbrooke, Canadá.

Como indicado na figura 4, o conteúdo de água de moldagem é responsável pela alteração de várias ordens de grandeza na condutividade hidráulica. De fato, para teores de umidade ~60% acima do ótimo, as curvas-índice de vazios *versus* logaritmo da condutividade hidráulica tendem a sobrepor-se, enquanto que, para espécimes mais secos ( $w < w_{opt} + 60\%$ ), a condutividade hidráulica é varias ordens de grandeza mais alta. Isto pode ser atribuído a uma melhor compressão dos macroporos, quando a amostra é compactada acima do ótimo.

Testes *in situ* com cone de areia resultaram em graus de compactação próximos do padrão Proctor. Para condições de carga normal-

Figura 4 - Condutividade hidráulica *versus* índice de vazios a diferentes teores de umidade



mente aplicadas a uma cobertura de solo (10-20 kPa), a condutividade hidráulica de laboratório é geralmente próxima ou abaixo de  $2 \times 10^{-7}$  cm/s. Testes de campo resultaram em condutividade hidráulica, variando entre  $1 - 5 \times 10^{-6}$  cm/s.

Kraus et al. (1997) demonstraram que testes de campo realizados em camadas de barreira construídas com resíduos de destintamento levaram a condutividades hidráulicas semelhantes àquelas medidas em laboratório sobre amostras compactadas em condições semelhantes de teor de umidade. Diferenças

entre resultados de campo e de laboratório encontradas neste estudo podem ser atribuídas a diferenças no método de compactação (martelo/rolo), a rotas preferenciais do fluxo durante os testes ou a dificuldades na avaliação da posição no nível d'água no campo.

A formação de pressão intersticial durante os testes no oedômetro foi atribuída à ocorrência de gás (originado pela degradação bioquímica). Isto possivelmente afeta a determinação da condutividade hidráulica. Em consequência, a formação de pressão foi prevenida mediante a dissipação do excesso de

Tabela 3 - Composição físico-química de resíduos do destintamento (% do peso seco)

| Resíduo  | Voláteis | Calcita | Metacaulim | Talco | Rutilo | Outros | Total |
|----------|----------|---------|------------|-------|--------|--------|-------|
| KF 95/96 | 57,7     | 21,2    | 12,1       | 1,7   | 1,0    | 6,2    | 100,0 |
| KF 97/98 | 62,9     | 21,1    | 8,4        | 2,0   | 0,7    | 5,0    | 100,0 |
| PC 97/98 | 48,8     | 21,4    | 16,9       | 2,4   | 1,8    | 8,8    | 100,0 |



pressão dos poros na base antes de cada determinação da condutividade hidráulica.

### Retenção de água

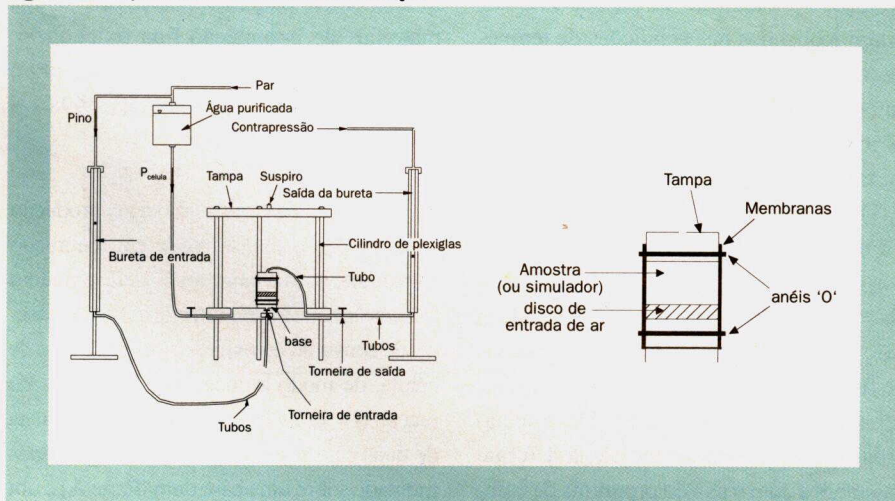
Como anteriormente mencionado, um material com boa capacidade de retenção de água ajuda a manter um alto grau de saturação, o que, por sua vez, reduz o fluxo de oxigênio por difusão.

As características de sucção estão sendo presentemente medidas em laboratório mediante a adaptação de um aparelho para medir a sucção em função do teor de umidade volumétrica (ou da saturação). A figura 5 apresenta um esquema da célula desenvolvido no laboratório de Géotechnique et Géoenvironnement, da Universidade de Sherbrooke. As variações de volume podem ser medidas continuamente, de modo que o grau de saturação - portanto o conteúdo volumétrico de água - pode ser continuamente calculado. Isto foi considerado particularmente necessário devido à compressibilidade dos resíduos.

Na figura 6 são apresentadas curvas características típicas. Os resultados mostram que o valor de entrada de ar do resíduo ( $y_a$ ) usado para cobrir a célula experimental está na faixa de 25 a 35 kPa. Estão sendo realizados testes suplementares para a afinação dos procedimentos.

Em uma barreira capilar, a espessura do material capaz de reter um nível suficiente de saturação é dado pela diferença entre o ( $y_a$ ) da camada impermeável (neste caso, o material do destintamento) e a sucção associada com o teor de umidade residual ( $y_r$ ) do material mais grosseiro que lhe está abaixo (Nicholson, 1989). Considerado que ( $y_r$ ) de uma areia fina está na faixa dos 10 kPa, entre 1,5 a 2,5 metros de resíduos de destintamento, deveriam ser teoricamente capazes de permanecer saturados, desde que postos sobre uma camada de areia de fina para média. Para materiais mais grosseiros, aplicados no sistema de cobertura, a descontinuidade capilar seria ainda maior. No caso do sítio Eustis, os resíduos de destintamento foram colocados diretamente sobre os rejeitos relativamente grosseiros, produzidos no começo do século (Cabrál et al., 1996, 1997 a, b). No sítio Clinton, foram colocados na última camada rejeitos

Figura 5 - Esquema da célula de desaturação



de minério grosseiros (cascalho). Como consequência, a descontinuidade assegura que a cobertura ficará saturada, independente da posição do lençol de água.

### Difusão de $O_2$

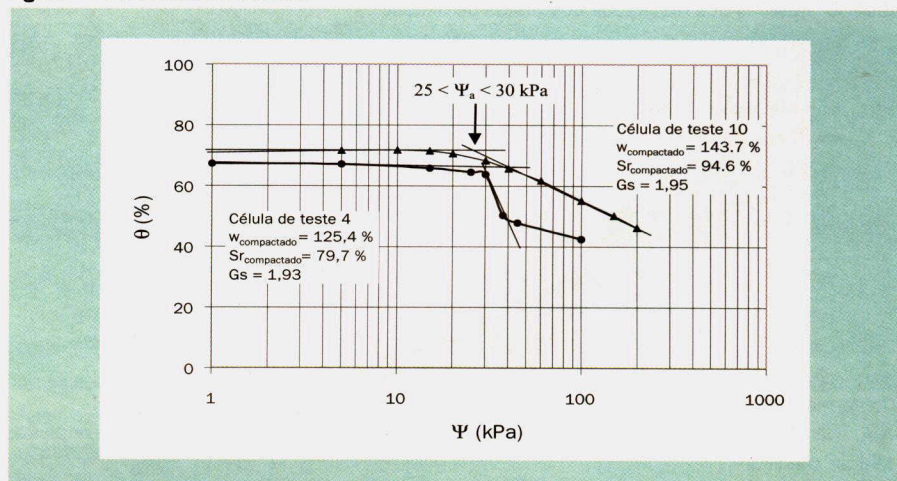
Para melhor compreensão dos vários fenômenos envolvidos na migração de  $O_2$ , através de resíduos de destintamento, foram realizados testes em laboratório de difusão de oxigênio sob diferentes condições.

Para o objetivo deste estudo, foi desenhada e construída uma célula no laboratório da Universidade de Sherbrooke. O desenho teve como referência a célula usada por Yanful (1993). A célula é dividida em três seções (A, B, e C, Figura 7). A seção A corresponde ao compartimento de admissão, onde o ar

entra no sistema durante os testes através de dois furos. Amostras com até 10 cm de altura podem ser compactadas diretamente na seção B. Para a avaliação do coeficiente de difusão dos resíduos do destintamento com exclusão do efeito do consumo de  $O_2$ , algumas amostras foram esterilizadas em autoclave antes da compactação. O oxigênio migra através da amostra e é recuperado no reservatório inferior (seção C, que é estanque), onde a sua concentração é monitorada. Um circuito fechado retorna o gás analisado para a seção C. O analisador de gás (ADC modelo LFG 20) mede as concentrações de  $CH_4$ ,  $CO_2$  e de  $O_2$ .

Para que fossem reproduzidas as condições de pressão normalmente encontradas no campo, a amostra foi submetida a uma carga de 10 kPa (equivalente à carga exer-

Figura 6 - Curvas características





cida por camada de 0,5-0,6 m de solo de proteção), por meio de um pistão. Os testes foram realizados nas condições de temperatura constantes do laboratório (21 °C). Os autores estão conscientes de que no campo as temperaturas variam significativamente, fato que afeta a taxa de difusão ( $D_e = f(T)$ , Freeze and Cherry, 1979).

Foi realizada uma bateria de testes, listados na tabela 4, sob várias condições iniciais (compactação, teor de umidade, saturação, índice de vazios, esterilização, adição de fungicida).

Os coeficientes de difusão ( $D_e$ ) e meia-vida ( $t_{1/2}$ ) apresentados na tabela 4 foram calculados com o uso do programa de computador Pollute v.6.3 (Rowe et al., 1994). Foi assumida uma concentração constante de oxigênio na delimitação superior ( $[O_2] = 20,9 \%$ ), embora tenha sido assumida velocidade zero para o fluxo de saída na parte inferior. Para as simulações foi usada somente a parte inicial dos testes, correspondente ao tempo necessário para que a concentração de  $O_2$  alcançasse seu máximo (cenário de pior caso).

Como esperado, as meias-vidas das amostras esterilizadas são maiores que aquelas das amostras não-esterilizadas: quanto mais rápida a produção de  $CO_2$ , mais curta a meia-vida. No caso das amostras não-esterilizadas, o consumo de  $O_2$  (ou produção de  $CO_2$ ) foi acompanhado desde o início. Também, quanto mais alto o grau de saturação das amostras, menor o coeficiente de difusão. Para um grau de saturação semelhante, os valores

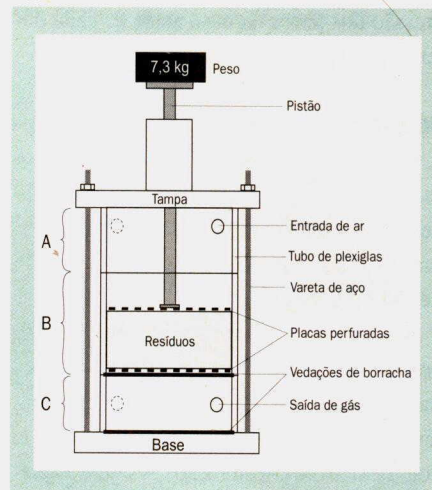
de ( $D_e$ ) dos resíduos de destintamento são da mesma ordem daqueles medidos em outros materiais de granulação fina (Nicholson, 1989; Yanful, 1993; Elberling et al., 1994; Aubertin et al., 1997; Cabral et al., 1998).

### Consumo de $O_2$

O consumo de  $O_2$  (e a associada produção de  $CO_2$ ) parece constituir-se em fenômeno importante no que tange ao fluxo de oxigênio através da barreira. Foram realizados dois testes de consumo de oxigênio em outro tipo de célula, de modo a poder calcular a taxa de reação ( $l = \ln 2 / t_{1/2}$ ). A célula era composta de duas partes: um cilindro oco de plexiglas montado sobre uma base dura (Parte A) e um reservatório superior (Parte B). O resíduo foi compactado diretamente na célula (Parte A). A parte B foi deixada aberta para a atmosfera em tempo suficiente para que se estabelecesse um fluxo constante de oxigênio. As entradas de ar do topo foram então fechadas, e a concentração de oxigênio do reservatório superior, monitorada, usando-se os mesmos analisadores de gás anteriormente descritos. A taxa de reação foi obtida, aplicando-se o procedimento descrito por Elberling et al. (1994). O coeficiente de difusão dado como *input* foi obtido de um teste, em que o consumo foi impedido mediante uso de fungicida (OD14).

As meias-vidas obtidas variam de 0,44 h a 1,75 h (Cabral et al. 2000). Isto indica que meias-vidas de amostras não-esterilizadas são muito curtas (ou que o consumo começa rapidamente), independentemente, do método usado para a avaliação.

Figura 7 - Esquema da célula de difusão



Os resultados obtidos no teste OD14 (uma amostra esterilizada e tratada com aplicação de fungicida) salientam a importância do consumo de  $O_2$  nas barreiras de resíduos como fator fundamental para o total controle da geração de ácido: não obstante o relativamente baixo ( $D_e$ ) calculado ( $0,3 \text{ cm}^2/\text{h}$ ), uma alta concentração de  $O_2$  foi eventualmente obtida no final do teste ( $[O_2] = 6,2 \%$  no  $t = 309 \text{ h}$ ).

Caso o oxigênio que alcançasse o fundo da barreira fosse prontamente consumido por rejeitos reativos, resultaria uma significativa - e persistente - produção de DMA. Por outro lado, foram observados baixos fluxos (e baixas concentrações finais de  $O_2$ ) em testes com amostras não-esterilizadas, tais como os do OD9, a despeito do alto ( $D_e$ ) obtido ( $\sim 1,0 \text{ cm}^2/\text{h}$ ).

Tabela 4 - Resumo dos resultados dos testes de difusão

| Teste                             | $S_r$<br>(%) | $\Delta a$ | w<br>(%) | $D_e$<br>( $\text{cm}^2/\text{h}$ ) | $t_{1/2}^{-1}$<br>(h) |
|-----------------------------------|--------------|------------|----------|-------------------------------------|-----------------------|
| <b>Amostras não-esterilizadas</b> |              |            |          |                                     |                       |
| OD6                               | 76           | 0,172      | 102      | 30 - 35                             | 0,4 - 0,3             |
| OD9                               | 84           | 0,120      | 131      | 1,0 - 1,3                           | 0,45 - 0,32           |
| OD11                              | 98           | 0,015      | 139      | N.A. <sup>2</sup>                   | -                     |
| <b>Amostras esterilizadas</b>     |              |            |          |                                     |                       |
| OD7                               | 77           | 0,172      | 116      | 15 - 19                             | 8 - 4                 |
| OD5                               | 79           | 0,158      | 123      | 2,7 - 3,0                           | 13 - 8                |
| OD12                              | 87           | 0,098      | 134      | 0,7 - 1,3                           | 10,0 - 2,3            |
| OD10                              | 88           | 0,088      | 126      | 1,3 - 2,6                           | 16,0 - 0,7            |
| OD14                              | 91           | 0,065      | 131      | 0,3 <sup>4</sup>                    | - <sup>5</sup>        |

<sup>1</sup> Conforme obtido por Pollute

<sup>2</sup> N.A.: Não aplicável; ( $D_e$ ) calculado com valores próximos ao limite de percepção nas primeiras 100 horas não teria significação.

<sup>3</sup> Melhor condição

<sup>4</sup> Devido ao fungicida, não aconteceu consumo de  $O_2$ , portanto, sem decomposição meia-vida.



## DADOS DE CAMPO

### Compactação de campo

Foram construídos dois recobrimentos em tamanho real sobre rejeitos minerais geradores de DMA e dois outros sobre aterros municipais. Os parques de mineração Eustis e Clinton e os aterros Miron e St-Rosaire estão situados, em Quebec, Canadá. O perfil típico de uma barreira de resíduos de destintamento é mostrado na figura 8.

A figura 9 mostra a construção de uma camada de resíduos de destintamento no sítio Clinton, e a figura 10, o contraste entre rejeitos minerais geradores de ácido no sítio Eustis e a célula coberta dois anos depois da construção. Foram realizados testes de compactação de camadas com os equipamentos disponíveis no local (*bulldozer*, carregadeiras, caminhões normais de dez rodas carregados e vazios, caminhões pesados de mineração, rolos compactadores). Foram aplicados diferentes níveis de energia (combinação da carga aplicada pelo equipamento com número de ciclos). Os testes nas camadas demonstraram que as densidades e os conteúdos de umidade, obtidos para níveis de energia semelhantes, eram próximos ao Standard Proctor (figura 1).

### Perfis de oxigênio

Foram realizadas medições locais de oxigênio gasoso no sítio Eustis desde a construção do recobrimento, em 1995. A metodologia para a amostragem do gás é descrita por Cabral et al. (1998). A figura 11 apresenta perfis de  $O_2$ . As últimas medições (1997) de oxigênio gasoso sobre a área plana foram impossíveis devido a condições de saturação ou quase saturação.

As medições foram então feitas nos taludes das células. Pode ser visto que as concentrações de oxigênio gasoso caem para valores não detectáveis a somente 0,4 m abaixo da superfície, o que confirma os resultados de laboratório sobre difusão/consumo e cálculos de fluxo de  $O_2$ . Tentativas de amostrar gás no sítio Clinton, em maio 1998, foram também impossíveis devido ao alto grau de saturação.

A condição próxima da saturação da camada de cobertura, entre 2 a 2,5 m de espessura no sítio Eustis, onde o lençol de água

Figura 8 - Perfil típico de barreira com aplicação de resíduos de destintamento

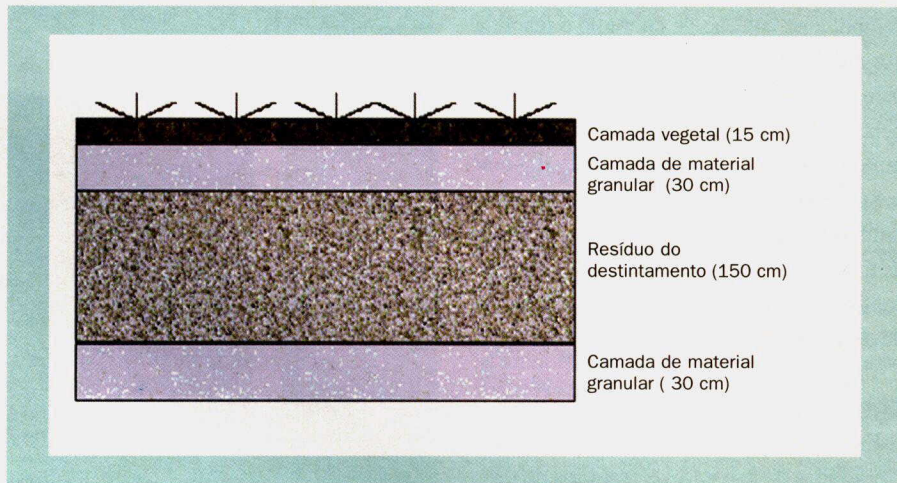


Figura 9 - Construção da camada de resíduos de destintamento no sítio Clinton



fica permanentemente a mais de 3 m abaixo da parte inferior do recobrimento, mostra que a capacidade de retenção de água dos resíduos de destintamento, conforme colocados no campo, é de pelo menos 25 kPa, o que corrobora os resultados de laboratório sobre retenção de água. Isto também confirma o efeito da barreira capilar.

### Perfis multigás e de biodegradação

A composição de campo do gás nos taludes (as piores condições de saturação) da barreira de resíduos do destintamento do sítio de Eustis é apresentada na tabela 5. Os perfis de campo mostram que oxigênio já não é encontrado a 0,5 m na superfície, o que indica que abaixo prevalecem condições anaeróbias. Este fato é confirmado pelo perfil de  $CH_4$ , cuja concentração aumenta com a profundidade e reflete uma degradação estritamente anaeróbia.

Abaixo de 1,5 m de profundidade, a composição do gás é muito semelhante àquela de aterros sanitários (Barlatz et al., 1990). A despeito da composição do gás, experimentos de laboratório em condições semelhantes àsquelas do campo têm mostrado que a produção de gás é muito lenta quando comparada àquela de detritos de aterros sanitários.

### Caracterização do chorume e avaliação da perda de massa

Análises da água de poros coletadas em poços (1,0 e 1,5 m de profundidade) e lisímetros mostram as seguintes características: pH ~5,5; alcalinidade total ~15.600 mg/L; DBO ~13.000mg/L; e sólidos totais ~30.000mg/L. Estas concentrações são características de um chorume na fase ácida da digestão anaeróbia (pH ~5,5 e relação DBO/DCO de ~0,5).

Considerando a baixa condutividade hi-



dráulica e o curto período de infiltração no campo, a percolação de chorume é mantida em níveis muito baixos, como confirmado pelos dados do lisímetro, apresentados na tabela 6. Os dados apresentados consideram uma condutividade hidráulica de  $1 \times 10^{-6}$  cm/s. Se a condutividade hidráulica do material diminuir uma ordem de grandeza, em função de melhor compactação ou subsequente consolidação e/ou degradação pelo tempo, a perda de massa diminuiria à mesma proporção.

## Conclusão

Este trabalho apresentou algumas possibilidades de uso para os resíduos do destintamento, que são produzidos no início do processo de reciclagem de papel impresso. O que foi considerado um refugio, enviado a aterros com altos custos, tem características hidráulicas e físico-químicas que o tornam atraente como material alternativo na construção de sistemas de recobrimento para aterros sanitários e parques de rejeitos geradores de DMA. Em outras palavras, ele se constitui em grande oportunidade para a indústria do papel e celulose reduzir custos e, ao mesmo tempo, proteger o meio ambiente.

Um extenso programa de experimentação de laboratório apoiado pelos dados de campo mostra que resíduos do destintamento compactados com umidade entre 50 a 70% do ótimo podem se comportar como camadas de baixa permeabilidade para cobertura de MSW (aterros sanitários).

Considerando que o material tem capacidade de retenção de água relativamente alta, ele pode manter um alto grau de saturação, o que contribui amplamente na redução da migração de oxigênio e, por extensão, na redução da DMA gerada em parques de resíduos de mineração. O consumo de oxigênio associado à degradação aeróbia diminui ainda mais as chances de o oxigênio alcançar o fundo de uma barreira de resíduos do destintamento.

Alguns aspectos no campo geoambiental relacionados ao uso dos resíduos de destintamento estão sendo atualmente pesquisados na Universidade de Sherbrooke. Produção de gás, perda de massa e sua influência nas propriedades hidráulicas e geo-

Figura 10 - Rejeitos de mineração geradores de DMA (à frente) e a célula Eustis (ao fundo)

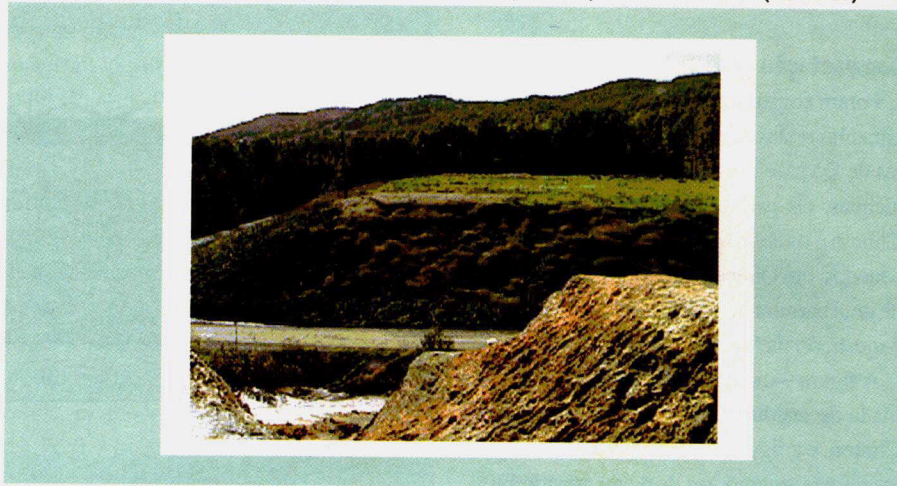


Figura 11 - Perfis de oxigênio no sítio Eustis

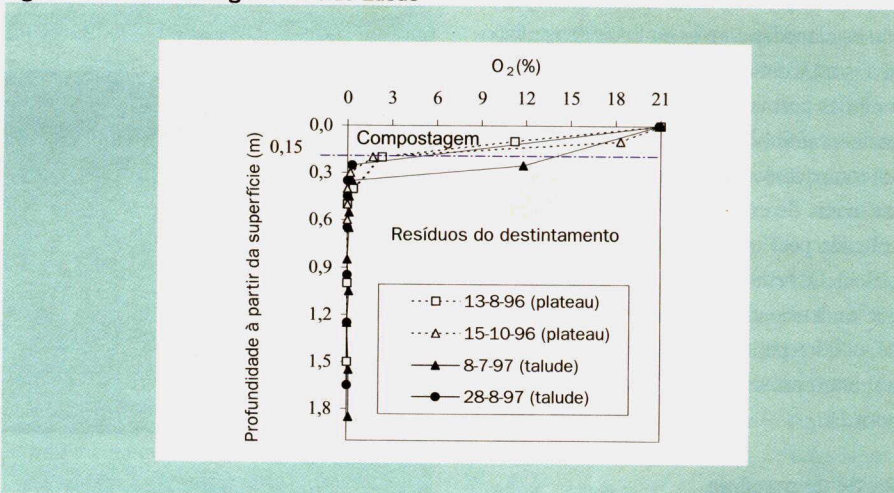


Tabela 5 - Composição do gás no campo produzida de resíduos do destintamento

| Profundidade (m) | O <sub>2</sub> (%) | CO <sub>2</sub> (%) | CH <sub>4</sub> (%) |
|------------------|--------------------|---------------------|---------------------|
| 0,0              | 20,8               | 0,0                 | 0,0                 |
| 0,5              | 0,0                | 53,6                | 43,5                |
| 1,0              | 0,0                | 55,1                | 43,7                |
| 1,5              | 0,0                | 40,5                | 56,1                |

Tabela 6 - Perda de massa por lixiviação para uma barreira típica (camada de 1,5 m de espessura de resíduos do destintamento)

| Parâmetros   |                             |
|--|-----------------------------|
| Condutividade hidráulica                                       | $1 \times 10^{-6}$ cm/s     |
| Massa de sólidos secos na barreira de resíduo do destintamento | 700 kg/m <sup>2</sup>       |
| Fluxo da lixívia   | 150 L/m <sup>2</sup> · ano  |
| Sólidos totais na lixívia                                      | 26 g/L                      |
| Perda de massa pela lixiviação                                 | 3,9 kg/m <sup>2</sup> · ano |

mecânicas são assuntos de interesse para um mais longo prazo. Alguns dos resultados apresentados neste artigo foram obtidos até 1998. Em uma outra oportunidade, valores mais atuais serão apresentados.

## Agradecimentos

Este trabalho foi parcialmente custeado por contribuição do National Science and Engineering Research Council of Canada (NSERC) em parceria com as Industries Cas-



cade Inc., Les Papiers Perkins Ltd. e Désencrage Cascade Inc. A Sra. Panarotto é patrocinada pelo CNPq, Brasil. Os autores gostariam de agradecer à Revista *O Papel* pela tradução do original em inglês.

## Bibliografia

- Aubertin, M., Bussière, B., B-M., Chapuis, R.P., Monzon, M., Aachib, M. 1997. Construction and instrumentation of in situ test pilots to evaluate covers built with clean tailings. Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Conference on Acid Rock Drainage, Vancouver, May 31 – June 6, 1997, vol. II, pp.: 717-730
- Aloisi, W., Atkinson, D., (1990). Evaluation of paper mill sludges for landfill capping material. Prepared for the town of Erving, MA, by Tighe and Bond Consulting Engineering, Westfield, MA
- Bartaz, M. A., Ham, R.K. (1990) Methane production from municipal refuse: a review of enhancement techniques and microbial dynamics, *Critical Reviews in Environmental Control*, vol. 19, Issue 6, pp.557-584.
- Broman, P.G., Haglund, P. and Mattson, E. 1991. Use of sludge for sealing purposes in dry covers, developments and field experiences. Proc. 2<sup>nd</sup> International Conference on the Abatement of Acid Drainage, Sept. 16-18, 1991. Montreal. Vol 1.
- Cabral, A.R., Lefebvre, G., Proulx, M-F., Robert, G., Audet, C., Labbé, M. 1996. Utilisation des résidus de désencrage comme matériau de recouvrement aux sites miniers produisant du DMA, Proc., Atelier sur les barrières de recouvrement pour rejets miniers générateurs d'eaux acides. Rouyn-Noranda, October 1996, pp.: 131-153.
- Cabral, A.R., Lefebvre, G., Proulx, M-F., Robert, G., Audet, C., Labbé, M. and Michaud, C. 1997. Use of Pulp & Paper residues as cover material in the prevention of AMD generation at an abandoned mine site. Proc., Tailings & Mine Waste, Balkema, Fort Collins, Jan. 1997, pp.: 257-266.
- Cabral, A.R., Lefebvre, G., Proulx, M-F., Robert, G., Audet, C. 1998. Developments in the use of deinking residues in cover systems for acid generating mine tailings. Proc. Tailings & Mine Waste, Balkema, Fort Collins, Jan, 1998.
- Cabral, A.R., Racine, I. Burnotte, F. et Lefebvre, G. (2000; in press). Diffusion of oxygen through a pulp and paper residue barrier. *Canadian Geotechnical Journal*.
- Elberling, B., Nicholson, R.V. Reardon, E.J. and Tibble, P. 1994. Evaluation of sulphide oxidation rates: a laboratory study comparing oxygen fluxes and rates of oxygen product release. *Canadian Geotechnical Journal*, 31: 375-383.
- Fergusson, K.D., et Erikson, P.M. 1987. Will it Generate AMD? Na Overview of Methods to Predict Acid Mine Drainage, Proceeding of the Acid Mine Seminar /Workshop, Halifax, Nova Scotia, 23-26 march, pp. 215-244
- Floess, C.H., Smith, R.F. and Hitcock, H. 1995. Capping with Fiber Clay. *Civil Eng.*, August.
- Fredlund, D.G. and Rahardjo, H. 1993 *Soil Mechanics for unsaturated soils*. Wiley.
- Freeze, R.A. and Cherry, J.A., 1979. Groundwater. Prentice-Hall, inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 604p.
- Gandolla, M., Acaia, C., Fischer, C. 1995. Techniques, exploitation et gestion des décharges contrôlées. École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse, avril, 1995.
- Kraus, J.F. Benson, C.H., Van Maltby, C., Wang, X, 1997. Laboratory and field hydraulic conductivity of three compacted paper mill sludges. *J. of Geot. And Geoenv. Eng.*, 123: 654-662
- Ministry of the Environment and Energy (MEE; 1993). Guidance manual for landfill sites receiving municipal waste. PIBS 2741, November, 1993.
- Moo-Young, H.K. and Zimmie, T.F. 1996a. Effects of freezing and thawing on the hydraulic conductivity of paper mill sludges used as landfill covers. *Can. Geot. Journal*, 33: 783-792.
- Moo-Young, H.K. and Zimmie, T.F. 1996a. Effects of organic decomposition on paper mill sludges used as landfill cover material. *Proc. 2<sup>nd</sup> Intern. Conf. Environmental Geotechnics*. Osaka, Japan, November 1996. Ed. M. Kamon, Balkema, 827-832.
- NCASI, (1990). A field-scale study of the use of paper industry sludges in landfill cover systems: first progress report. *Technical Bulletin n.º. 595*, Sept., 18 p.
- Nicholson, R.V., Gillhan, R.W., Cherry, J., Reardon, E.J. 1989. Reduction of acid generation in mine tailings through the use of moisture-retaining cover layers as oxygen barriers. *Canadian Geotechnical Journal*, 26: 1-8.
- Rowe, R.K. Booker, J.R., Fraser, M.J. 1994. Pollute v.6, User's guide. GAEA Env. Eng. Ltd.
- Stogran, S.W. and Wiseman, M.E. 1995. A Comparison of organic and inorganic covers for long term prevention or amelioration of acid mine drainage. Proc. Conference on Mining and the Environment, Sudbury, Ontario, May 28<sup>th</sup> – June 1<sup>st</sup>, 1995.
- Tremblay, G. 1993. Comité de prévention et contrôle: synthèse des résultats. Colloque sur le programme NEDEM, Val D'Or, Quebec, November 3-4, 1993.
- United States Environmental Protection Agency (1991). Federal Register, Part II, volume 56, Number 196, October 9, 1991 (40 CFR Parts 257 and 258; *Solid Waste Disposal Facility Criteria; Final Rule*).
- United States Environmental Protection Agency (1991). Federal Register, Volume 57, Number 124, June 26, 1992, pp. 28626-28632 (40 CFR 257 & 258; *Subtitle D Clarification*).
- Van Maltby, C., Eppstein, L. (1994). A field case study of the use paper industry sludges as hydraulic barriers in landfill covers systems. *Hydraulic Conductivity and Waste Contaminant Transport in Soil*. Philadelphia. Pp. 546-558.
- Yanful, E.K. and St-Arnaud, L.C. 1992. *Canadian Geotechnical Journal*, 29: 466-476.
- Yanful, E.K. and St-Arnaud, L.C. 1991. Design, instrumentation and construction of engineered soil covers for reactive tailings management. *Proc. 2<sup>nd</sup> International Conference on the Abatement of Acid Drainage*, Sept. 16-18, 1991. Montreal. Vol 1, pp. 487-504.
- Yanful, E.K. 1993. Oxygen diffusion through soil covers on sulphidic mine tailings. *ASCE Journal of Geotechnical Engineering*, 119: 1207-1228.
- Zimmie, T., Moo-Young, H., (1995). Hydraulic conductivity of paper sludges for landfill covers. *Geoenvironment 2000*, pp. 932-946.▲

## Normas para Publicação de Artigos Técnicos

A revista *O Papel* publica trabalhos de interesse ao setor de celulose e papel, sem custos para os autores, que conservam os direitos autorais para futuras publicações. No entanto, à revista é permitida a reprodução dos seus artigos, após análise do revisor técnico.

Se você, profissional do setor, pesquisador ou docente universitário, tem um artigo técnico novo e deseja apresentá-lo às indústrias, envie-o em disquete ou por e-mail: opapel@abtcp.com.br – arquivo compatível com o *Word for Windows*, versões Word 6.0 ou 7.0, juntamente com um pequeno resumo em inglês e palavras-chave: mínimo de três e máximo de cinco palavras. No caso do envio em disquete, é necessário encaminhar cópia impressa.

A redação da Revista *O Papel*, editada pela ABTCP – Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel, fica à Rua Ximbó, 165 – Aclimação - CEP: 04108-040 – São Paulo – SP. O texto e fotos deverão ser encaminhados aos cuidados de Patrícia Capó, Editora da Revista *O Papel*.

## Regras:

Tamanho: para publicação em uma única edição, o artigo não deverá exceder 15 páginas. Caso isto ocorra, o autor terá de dividi-lo em duas partes ou resumir o texto.

Unidade e dimensões: devem ser expressas de acordo com o Sistema Internacional de Unidades.

Figuras, gráficos, fotografias e tabelas: devem ser concisas e auto-explicativas. As fotografias devem ser, preferencialmente, em cores.

Resumo: o trabalho deve conter um resumo em português e inglês.

Informações gerais: o autor deve fazer uma breve referência à formação acadêmica, bem como o nome da empresa que trabalha ou instituição a qual pertence.

Os editores de *O Papel* se reservam o direito de fazer pequenas alterações nos textos para enquadrá-los aos padrões do *layout* da revista. Qualquer alteração de nível técnico será comunicada previamente ao autor.

Outras informações podem ser obtidas diretamente com a editora de *O Papel*, Patrícia Capó. E-mail: opapel@abtcp.com.br ou pelo telefone (011) 574-0166.