TURFA UTILIZADA NA RECUPERAÇÃO AMBIENTAL DE ÁREAS MINERADAS: METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO LABORATORIAL

JOSÉ GUILHERME FRANCHI¹, JOEL BARBUJANI SÍGOLO² &
JOSÉ RENATO BAPTISTA DE LIMA³

Abstract *PEAT AS A SOIL CONDITIONER USED IN ENVIRONMENTAL RECOVERY OF MINED AREAS – ANALYTICAL ASSESSMENT METHODOLOGY* This paper discusses the use of a peat ore, mined in State of São Paulo, Brazil, to improve both the physical and chemical soil properties of a sand mined area undergone environmental recuperation. A methodological proposal of laboratory assays is given. This study compares the results between laboratory assays from soil samples in their original state, and those where the soil has variable peat contents. Porosity, hydraulic conductivity, bulk density, cation exchange capacity and buffering were studied. The results showed expressive modifications for those soil properties in that this peat can be recommended as a remarkable auxiliary in those disturbed areas' environmental recuperation programs.

Keywords: peat, environmental recuperation, disturbed soils, sand mining, revegetation.

Resumo Este trabalho apresenta o estudo da aplicação de uma turfa, explorada no Estado de São Paulo, como melhorador de um solo utilizado no processo de recuperação ambiental de uma área submetida à extração mineral de areia. Apresenta-se uma proposta metodológica de ensaios laboratoriais para realizar este estudo, constituindo um comparativo entre resultados de ensaios físico-hídricos e químicos a que amostras deste solo foram submetidas. As amostras foram homogeneizadas em seu estado original (branco), de um lado, e com adição de turfa em diferentes proporções, de outro. Foram analisadas variações relativas à porosidade, condutividade hidráulica, densidade aparente, retenção de cátions e efeito tampão. Houve alterações favoráveis para todas estas propriedades dos solos para as amostras em que se incorporou turfa, de forma a caracterizar esta última como valioso coadjuvante em programas de recuperação ambiental de áreas degradadas por este tipo de atividade.

Palavras-chave: turfa, recuperação ambiental, solos degradados, mineração de areia, revegetação

INTRODUÇÃO A região do Vale do Paraíba – Estado de São Paulo notabilizou-se como principal fornecedora de areia ao mercado da construção civil da Região Metropolitana de São Paulo. A atividade extrativa aí existente há muitas décadas foi, e ainda representa, uma das principais responsáveis pelo elevado índice de degradação ambiental da região.

A degradação fez-se notar, sobremaneira, devido ao desmatamento necessário à atividade extrativa, o que acaba por provocar a exposição de amplas parcelas de solo a fenômenos erosivos.

Entre os procedimentos habitualmente necessários à recuperação de áreas mineradas, o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis – IBAMA (1990) recomenda o preenchimento da área lavrada com estéril e/ou rejeito, e a regularização do terreno para receber nova vegetação, normalmente com a recolocação do *topsoil* retirado quando do decapeamento da área a ser lavrada. Este, entretanto, nem sempre é armazenado e preservado prevendo reutilização, principalmente se longo intervalo de tempo decorre entre a retirada e retorno. Mesmo nos casos em que tenha sido estocado, comprometem-se suas características de fertilidade, principalmente em função da perda de seu conteúdo original em matéria orgânica. Franco *et al.* (1994) afirmam que o substrato de áreas mineradas são normalmente acidificados e com baixa disponibilidade de nutrientes e

matéria orgânica.

A presença de matéria orgânica, principalmente quando humificada, influi sobremaneira na estrutura e fertilidade dos solos tropicais. Segundo Primavesi (1985), a matéria orgânica em decomposição, genericamente denominada húmus, desempenha ação aglutinadora de partículas no solo tornando-o poroso e permeável, além de conferir-lhe baixos valores de Massa Específica Aparente (MEA), aumento em sua Capacidade de Troca de Cátions (CTC), e poder de tamponamento contra desequilíbrios minerais.

As formas mais comuns de matéria orgânica utilizadas em programas de revegetação de áreas mineradas incluem, dentre outras, esterco animal, feno, palhadas, efluentes de biodigestores, compostos de lixo, resíduos de madeira, torta de mamona, “húmus de minhoca”, lodo de esgoto, etc. Tais variedades de matéria orgânica apresentam entre si características distintas e desvantagens semelhantes como, por exemplo, baixos teores em nutrientes e matéria orgânica humificada, pequena disponibilidade, custo elevado, possível presença de constituintes patogênicos e existência, em alguns casos, de elevados teores de metais tóxicos (caso específico de alguns lodos de esgoto). Neste sentido, a turfa constitui um material orgânico naturalmente enriquecido em substâncias húmicas, amplamente disponível em todo território nacional e de baixo custo onde minerada.

1 - Instituto de Geociências - USP. Programa de Pós graduação em Geoquímica e Geotectônica. Rua do Lago, 562, Cidade Universitária, CEP 05508-080, São Paulo (SP), Brasil. E-mail: jfranchi@usp.br

2 - Instituto de Geociências - USP. Departamento de Geologia Sedimentar e Ambiental. Rua do Lago, 562, Cidade Universitária, CEP 05508-080, São Paulo (SP), Brasil. E-mail: jbsigolo@usp.br

3 - Escola Politécnica - USP. Departamento de Engenharia de Minas. Av. Prof. Mello Moraes, 2373, Cidade Universitária, CEP 05508-900, São Paulo (SP), Brasil. E-mail: jrblima@usp.br

Algumas áreas submetidas à extração mineral de areia às margens do rio Paraíba do Sul, município paulista de Jacareí, receberam aplicações experimentais de turfa com o objetivo de melhorar características dos seus solos no estágio final da recuperação ambiental, ou seja, a recomposição da vegetação nativa. Estas áreas apresentavam em comum o insucesso dos programas originais de recuperação. A introdução da turfa conseguiu reduzir a cerca de 5% os elevados índices (até 95%) de não evolução das mudas para aí transplantadas.

O presente trabalho apresenta uma metodologia de ensaios laboratoriais para avaliar alterações em propriedades físicas e químicas em solos, promovidas pela incorporação de turfa. São também demonstrados os resultados experimentais obtidos com um solo que serviu de suporte ao restabelecimento de vegetação nativa, numa das áreas referidas no parágrafo anterior.

A turfa A turfa é uma substância fóssil, orgânica e mineral, originada da decomposição de restos vegetais, encontrada em áreas alagadiças como várzeas de rios, planícies costeiras e regiões lacustres.

Trata-se de um biólito, isto é, um depósito sedimentar desenvolvido a partir de processos biológicos; uma vez passível de utilização como combustível, posiciona-se na categoria dos caustobiólitos (grego *kausticós* = que queima). A conversão da matéria vegetal em turfa é um processo cuja continuação, por alterações diagenéticas ou metamórficas, conduz à formação de linhito, carvão e antracito.

As turfás são normalmente classificadas segundo seu grau de decomposição. O modelo mais frequentemente utilizado foi desenvolvido por von Post (Clymo 1983), onde a turfa é classificada numa escala visual de 10 pontos (da mais incipientemente decomposta H1 até aquelas totalmente decompostas H10), após um teste de campo expedito de *squeezing* – que consiste em espremer-se à mão uma amostra fresca e molhada e observar-se o aspecto do material que flui entre os dedos e daquele que fica retido.

A definição varia conforme a instituição e o país, mas é consensual aceitar-se como sendo um material contendo 25% ou menos de massa inorgânica (ou teor em “cinzas”), referível à base seca (Andrejko *et al.* 1983). Clymo (1983) afirma que muitos pesquisadores elevam aquele limite a 35% e padrões comerciais consideram até 55%.

De acordo com Ramos e Lima Filho (1982), dependendo de suas características e eventuais tratamentos, podem-se produzir, a partir de turfás, gases combustíveis, coque, alcatrão, ceras, açúcares, carvão ativado, asfalto, álcool, parafinas, óleos, gasolina, querosene, lubrificantes, fertilizantes organo-minerais e de solubilidade controlada, etc. Desta forma, as turfás despertaram a atenção de vários ramos da ciência: engenharia energética, civil, química, medicina, biologia, arqueologia, geologia, agricultura, horticultura e outros diferentes campos profissionais.

Segundo a International Peat Society – IPS (1997), mais de 90% das turfeiras no mundo situam-se nos cinturões frios e temperados do Hemisfério Norte; o remanescente concentra-se em latitudes tropicais e sub-tropicais, em sua maioria em ambientes de florestas densas ou pantanosas.

Shotyk (1988) estima em 422 milhões de hectares a área do planeta coberta por turfeiras (cerca de 4% da superfície emersa). Segundo o mesmo autor, da área total da Finlândia, cerca de 30% são cobertos por turfás, assim como 17% da Irlanda e Suécia, 15% do Canadá e 10% da Escócia. A Rússia detém cerca de 60% das reservas mundiais conhecidas deste bem mineral (Clymo 1983).

No Brasil, o histórico de sua utilização remonta à época da Segunda Grande Guerra, quando a Estrada de Ferro Central do Brasil foi autorizada a explorar algumas turfeiras no Vale do Paraíba, para mover suas locomotivas, independentemente das formalidades exigidas pelo Código de Minas, em virtude de interrupções no fornecimento do carvão mineral importado (Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT 1979).

A importância da turfa para o Brasil restringiu-se, prioritariamente, à possibilidade de vir a participar da matriz energética nacional em períodos específicos das décadas de 1970 e 80, função da crise mundial do petróleo. Neste contexto, é digno de nota o trabalho desenvolvido pelo Departamento Nacional da Produção Mineral - DNPM - através da Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais - CPRM -, que culminou com a descoberta de inúmeras turfeiras no território nacional como fruto de vários projetos de prospecção regional, mormente nas faixas litorâneas: Região Sul, Sudeste, Centro Oeste, Região do Alto São Francisco, Faixa Costeira da Bahia e Sergipe, Nordeste Oriental (AL, PE, PB, RN) e Nordeste Setentrional (MA, PI, CE).

A posterior normalização e estabilização dos preços mundiais do petróleo trouxeram uma série de fatores impeditivos à continuidade de sua utilização para este fim no Brasil, destacando-se, principalmente, a pouca competitividade econômica perante os derivados do petróleo e outras fontes alternativas (lenha, carvão vegetal, casca de coco, bagaço de cana, pneus velhos, etc.). Os grandes programas prospectivos foram, então, paralisados no início da década de 80, embora iniciativas isoladas, como as do IPT (1981) e da METAMIG (Moraes 1982), tenham prosseguido e contribuído à caracterização e melhor conhecimento das turfeiras brasileiras. Recentemente, o Ministério das Minas e Energia buscou reavaliar a possibilidade de instalação de termoeletricas cuja base energética fosse parte das reservas de turfás conhecidas no país.

Embora o enfoque principal conferido pelo meio técnico, científico e governamental às turfás nacionais tenha visado principalmente seu uso energético, países como Alemanha e Holanda destinam, por lei, sua aplicação exclusivamente para fins agrícolas (Lopez 1985); EUA e Canadá são os países que mais extensivamente a utilizam na agricultura como condicionador de solos.

Segundo Couillard (1994), estudos microscópicos revelam que litotipos de turfa menos decompostos (fibrosos) apresentam porosidade próxima a 95% e superfície específica de até 200m²/g. Do ponto de vista físico-químico, Coupal e Lalancette (1976) afirmam que as substâncias húmicas presentes na turfa são as responsáveis pela elevada capacidade de adsorção para metais de transição e moléculas orgânicas polares. Fuchsman (1980) afirma ser um material quimicamente complexo, constituído por 4 grupos principais: betumes (ácidos graxos, ceras e esteróides), substâncias húmicas (ácidos húmicos, ácidos fúlvicos e huminas), carboidratos (principalmente celulose e proteínas) e ligninas (substâncias polifenólicas, a exemplo dos ácidos húmicos). Normalmente lignina e celulose são os constituintes maiores; o teor em substâncias húmicas é função direta do grau de decomposição uma vez que elas não existem naturalmente nas plantas vivas e são produtos intermediários no ciclo de decomposição da matéria orgânica. Segundo Stevenson (1994), são caracterizadas como ricas em grupos funcionais oxigenados tais como COOH, OH fenólico e/ou enólico, OH alcoólico e C=O de quinonas. A CTC das substâncias húmicas encontra-se entre os maiores valores já obtidos para materiais naturais; segundo Tan (1993) pode variar entre 500 a 1200cmol_c/Kg para os ácidos húmicos (cmol_c/Kg = centimol de cátions por quilograma de solo seco, equivalente a mEq/100g, em

desuso); valores ainda maiores podem ser encontrados para os ácidos fúlvicos.

Estas características refletem-se em importantes propriedades desta substância como um agente quelante e agregador de partículas do solo, bastante desejáveis para aplicações agrícolas por permitir pronta infiltração de fluidos, penetração de raízes e retenção de nutrientes.

Turfeiras do Vale do Paraíba São conhecidas diversas ocorrências de turfa na região do Vale do Paraíba, situadas mais precisamente nas planícies de inundação do rio Paraíba do Sul e alguns de seus tributários, que fluem rumo ao Oceano Atlântico predominantemente segundo direção NE.

Situam-se no contexto geológico da Bacia de Taubaté, unidade tafrogênica constitutiva de um segmento do Sistema de Rifts da Serra do Mar (Almeida 1976), de direção NE-SW, alojada entre as serras do Mar e da Mantiqueira. A bacia apresenta contatos eminentemente tectônicos em sua borda NW e erosivos na borda SE, tendo recebido sedimentação em sistemas de leques aluviais, fluviais e lacustres desde o Oligoceno.

As modificações mais profundas no entendimento da evolução da Bacia de Taubaté devem-se a Riccomini (1989) que realizou análise integrada da evolução vulcano-sedimentar, estrutural e tectônica de um segmento denominado pelo autor de Rift Continental do Sudeste do Brasil, compreendido pelas bacias sedimentares de Curitiba, São Paulo, Taubaté e Resende. No artigo o autor identificou 20 fácies sedimentares agrupadas em 5 sistemas deposicionais, litoestratigraficamente referidos às formações Resende, São Paulo e Tremembé, transicionais entre si e de idade oligocênica. Sobreposição aos sistemas oligocênicos a Formação Pindamonhangaba, fluvial, e substrato da sedimentação quaternária do rio Paraíba do Sul na porção central da bacia.

Vários autores (Carneiro *et al.* 1976, Hasui e Ponçano 1978, Hasui *et al.* 1978, Melo *et al.* 1985) reconheceram a conformação estrutural da bacia segundo um hemigraben basculado para NW, fato que pode motivar a ocorrência das turfeiras ao longo de depressões alongadas e meandros abandonados pela migração do rio rumo à borda NW da bacia, notadamente em sua margem direita.

Segundo Garcia (1994), a sedimentação orgânica perdurou desde o limite Pleistoceno-Holoceno (11050 ± 100 A.P.) até cerca de 3000 A.P.

A turfeira SJ-II (IPT 1979), situada no município de São José dos Campos, estende-se por cerca de 12Km exclusivamente à margem direita do rio Paraíba do Sul, apresentando largura média de 2Km. Apresenta-se capeada em quase toda sua extensão por solos de coloração negra, ricos em matéria orgânica.

MATERIAIS E MÉTODOS As amostras de turfa utilizadas na presente experimentação foram coletadas na turfeira SJ-II (Fig. 1), proximidades das coordenadas geográficas $23^{\circ}09'06''$ S e $45^{\circ}49'09''$ W, em local desprovido de qualquer capeamento.

As amostras de solo provieram de uma jazida de areia explorada para construção civil, num módulo já desativado e em recuperação ambiental, situado no município paulista de Jacareí. Trata-se de um solo alóctone, ou seja, trazido das proximidades com a finalidade de recobrir o referido módulo, após regularização topográfica, e servir de suporte à reintrodução de vegetação nativa.

Caracterização dos materiais Os materiais solo e turfa da presente experimento foram caracterizados pelos seguintes parâmetros:

SOLO Análise mineralógica por Difração de Raios-X (DRX); análise química por Fluorescência de Raios-X (FRX); pH (em CaCl_2 0,01mol.L⁻¹) segundo metodologia definida pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA (1997); V(%) ou porcentagem de saturação de bases ($V = 100 \cdot \text{SB}/\text{CTC}$), parâmetro de fertilidade que representa a participação de bases trocáveis em relação ao total de cátions no complexo (EMBRAPA 1997), valor utilizado para distinção entre solos eutróficos ($V > 50\%$) e distróficos; m(%) ou porcentagem de saturação com alumínio [$m = \text{Al}^{3+}/(\text{SB} + \text{Al}^{3+}) \cdot 100$], relação empregada na separação de classes do solo quanto ao caráter álico (quando $m > 50\%$); densidade das partículas (ou densidade real) por picnometria em água; massa específica aparente (MEA) pelo método do anel volumétrico (EMBRAPA, 1997); distribuição granulométrica (por espalhamento

Figura 1 – Ocorrências de turfa ao longo do Rio Paraíba do Sul (mod. de IPT 1979)

laser de baixo ângulo) e Capacidade de Troca de Cátions – CTC, representada pela soma de bases trocáveis ($SB = Na^+ + K^+ + Ca^{2+} + Mg^{2+}$) e acidez trocável ($Al^{3+} + H^+$). Estas últimas determinações foram realizadas através de extração por resinas trocadoras para K^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+} , extração pelo duplo ácido para Na^+ , e determinação da acidez trocável por solução de acetato de cálcio 1N pH 7,0.

TURFA Grau de decomposição, segundo escala visual de von Post; teor em umidade (por secagem a 70°C até peso constante); pH (em $CaCl_2$); Cz = teor de cinzas (ou da fração inorgânica), percentual em relação à massa da amostra seca, resultante da combustão, por patamares de 50°C e período de residência de 1h por patamar, até se atingir 550°C, temperatura em que a amostra permanece por mais 4h; matéria orgânica total (100 - Cz). O quimismo dos principais elementos constituintes obedeceu metodologia adotada pelo Laboratório de Solos da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ): carbono total (matéria orgânica total dividido por 1,72), carbono orgânico (oxidação do carbono menos resistente por bicromato de potássio e ácido sulfúrico), N (método Kjeldhal), P (por colorimetria), K (fotometria de absorção atômica), Ca e Mg (espectrometria de absorção atômica – AAS), e S (por turbidimetria a partir do extrato nitro-perclórico). Apenas a fração < 2mm dos materiais foi utilizada nos ensaios.

MISTURAS SOLO+TURFA O estudo foi exclusivamente laboratorial e conduzido através da comparação de resultados de ensaios físico-hídricos e químicos realizados para o solo em duas condições distintas: como testemunho (branco) e com adição de turfa em quantidades variáveis.

As incorporações de turfa ao solo foram realizadas nas proporções de 0–2–4–6–8% em peso, sendo as amostras designadas, respectivamente, BR (branco), A, B, C, e D.

PROPRIEDADES FÍSICAS Do ponto de vista físico, determinou-se a porosidade, condutividade hidráulica e massa específica aparente das amostras. A determinação destas propriedades pressupôs a submissão prévia das amostras a um procedimento padrão de compactação, baseado em metodologia segundo a norma BS-1460 (*British Standards Institution* – BSI 1967), cuja descrição e justificativas de seu emprego encontram-se em Franchi (2000).

A porosidade das amostras foi determinada pelo método de dessorção de água, consistindo na drenagem, por etapas, da amostra totalmente embebida em água através da aplicação de tensões específicas para drenar volume de água contido em poros de diâmetro cilíndrico equivalente (Reichardt 1985). Por este método, é possível determinar-se micro, meso e macroporosidades (Libardi 1995), valores de maior significado quando comparados à porosidade total, principalmente quando se tem em vista investigar o movimento e armazenamento de água e gases, a resistência dos solos, o desenvolvimento de um sistema de raízes pela planta e problemas envolvendo fluxo e retenção de calor.

A condutividade hidráulica, ou o coeficiente de permeabilidade de um solo, foi determinada para cada amostra tendo em vista a lei experimental de Darcy, segundo método de aplicação de uma carga hidráulica constante (Klute e Dirksen 1987).

A massa específica aparente, relação entre a massa da amostra de solo e seu volume, incluindo os espaços ocupados pelo ar, foi tomada de cada amostra submetida aos ensaios físico-hídricos. Constitui parâmetro de elevada importância para a produtividade dos solos, uma vez que desmatamento e manejo inadequado conduzem a adensamentos que impedem a exploração de volume mai-

or de solo pelas raízes.

PROPRIEDADES QUÍMICAS Do ponto de vista químico, estudaram-se o efeito tampão e alterações na retenção de cátions propiciada pela adição de turfa às amostras.

O poder de tamponamento é uma importante propriedade dos solos por refletir sua resistência contra modificações bruscas de pH no meio, evitando choques violentos e desequilíbrios minerais provocados por calagem ou adubação sobre sua microvida (Primavesi 1985). O tamponamento conferido às amostras foi avaliado pela adição de soluções de NaOH em 4 concentrações distintas (0–0,22–1,02–2,90g.L⁻¹), na proporção de 25mL de solução para cada 10g de amostra, e posterior leitura de pH em água, segundo metodologia definida pela EMBRAPA (1997).

A Capacidade de Troca de Cátions (CTC) é lastro de fertilidade de um solo. É uma propriedade peculiar a certos minerais, principalmente da fração argila, de trocar cátions em solução aquosa. Normalmente, é função de desbalanceamentos eletrônicos nos reticulados cristalinos de argilominerais, ligações quebradas nas arestas das partículas (e, conseqüentemente, da área específica) e de colóides orgânicos associados às partículas. Quanto maior a CTC de um solo mais nutrientes, recebidos de adubações, ele consegue reter contra a lixiviação imposta pelo clima tropical. Sua avaliação foi realizada pela adição das amostras com uma solução policatiónica preparada a partir de um fertilizante comercial à razão de 400mL da solução para 100g de amostra durante 24h. Visando simular a lixiviação naturalmente imposta aos solos tropicais, as amostras foram submetidas à lavagem e filtração em funil de Büchner por 1 litro de água destilada previamente à determinação da CTC. O poder de retenção dos cátions da solução, tendo em vista os diferentes teores de turfa em cada uma das amostras, foi avaliado por análise química dos volumes coletados na lavagem para os elementos K, Ca, Mg, Cu, Fe, Mn, Zn, (por Espectrometria de Absorção Atômica) e P (por colorimetria).

Aparelhagem A análise mineralógica foi realizada por DRX em difratômetro Philips modelo MPD1880-PW1710 com emissão de feixe de radiação X de $CuK\alpha$ a 40kV, 40mA, varrendo a faixa angular de 2,5 a 80°, com passo de 0,02° e tempo de coleta por passo de 1s. A análise granulométrica do solo foi realizada utilizando-se do equipamento ótico de marca Malvern, modelo Mastersizer, cobrindo faixas de tamanho de partículas de 0,05 a 3500µm. Análises químicas foram realizadas, no solo, por FRX utilizando-se espectrômetro de Raios-X Philips modelo PW-1400. Os filtrados obtidos das lavagens das amostras foram analisados por AAS, através de um espectrômetro de absorção atômica da marca Varian modelo 220 Fast Sequential SpectraAA, com amostrador automático e diluidor, e por colorimetria (para P) num espectrômetro marca Perkin Elmer, modelo Lambda 11 UV/VIS (200 a 900nm).

RESULTADOS E DISCUSSÃO **Caracterização dos materiais** Os materiais envolvidos na presente experimento apresentam as características a seguir descritas.

SOLO Composição mineralógica: caolinita, quartzo, microclínio, albita e biotita, além de possível gibsit, goethita e diopsídio; tamanho de partículas: $d_{90} = 328,53\mu m$ (90% do volume da amostra abaixo de 328,53mm), $d_{50} = 103,67\mu m$ (50% do volume da amostra abaixo de 103,67mm), $d_{10} = 14,43\mu m$ (10% do volume da amostra abaixo de 14,43mm); composição química conforme Tabela 1; CTC = 7,12cmol/Kg; V (%) = 28,37% (solo distrófico); m (%) = 28,37%

(solo não álico); pH (em CaCl_2) = 4,1; densidade das partículas = $2,59\text{g/cm}^3$; densidade aparente = $1,13\text{g/cm}^3$.

TURFA Grau de decomposição (von Post) = H4 a H5; umidade (base seca) = 58,91%; composição química segundo dados constantes da Tabela 2; pH (CaCl_2) = 3,0; CTC = 76cmol/kg ; densidade aparente = $0,27\text{g/cm}^3$.

Ensaios Laboratoriais POROSIDADE E DENSIDADE APARENTE Os dados obtidos para as diversas misturas solo+turfa encontram-se na Tabela 3 e os de porosidade também na figura 2.

A densidade aparente apresentou valores decrescentes com o acréscimo de turfa ao solo, observação reveladora de que a incorporação de material altamente poroso e fibroso, como a turfa, traz ao solo a possibilidade de se evitar um dos maiores problemas na sua produtividade: a existência de adensamentos.

Do estudo para definir a distribuição do tamanho dos poros, notou-se que os valores de porosidade total para as diversas misturas não variaram ou o fizeram de forma discreta, a exemplo do que foi obtido para a microporosidade; estes resultados são consonantes com os de Bonneau & Levy (1982), para quem a simples determinação da porosidade total não é relevante para a caracterização do sistema de poros de um solo, uma vez que apenas poros acima de determinado diâmetro permitem drenagem e aeração. Entretanto, o estudo aqui apresentado revelou variações evidentes de macro – em relação direta com o aumento da quantidade de turfa – e mesoporosidades – em relação inversa. A macroporosidade teve um incremento de 27,1% para a mistura A, e encontrou melhor resultado na mistura D, de 76,7% - valores todos referentes ao Branco.

CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA A Tabela 4 contém os resultados dos ensaios de condutividade hidráulica realizados para as diversas misturas ensaiadas, graficamente expressos na figura 3.

Estes resultados revelam relação direta desta propriedade dos solos com a quantidade de turfa adicionada às amostras, exceto quanto à mistura D, que apresentou valor no mesmo nível da mistura B (mas ainda substancialmente maior que a amostra Branco). Quantitativamente, houve acréscimo de 118,9% para a mistura A, ficando o melhor resultado com a mistura C, que foi 262,9% superior à amostra Branco.

EFEITO TAMPÃO A Tabela 5 contém os valores de pH das misturas às quais se adicionou as soluções de NaOH, graficamente expressos na figura 4.

Como esperado, o NaOH eleva o pH das misturas em todas as proporções utilizadas. Nota-se, entretanto, que as variações nos valores para cada amostra são sucessivamente menores para teores crescentes de turfa adicionada: para o solo *in natura*, a adição de NaOH fez o pH variar entre 4,59 e 10,91 (amplitude de 6,32 unidades de pH). Para a amostra D, a variação situou-se entre 3,99 e 9,11 (amplitude de 5,12); quantidades intermediárias de turfa adicionada aos solos apresentaram amplitudes intermediárias entre os valores acima apontados (respectivamente, 5,94, 5,5 e 5,27).

CAPACIDADE DE TROCA DE CÁTIOS-CTC A possibilidade de aumento da CTC do solo pela adição de turfa foi avaliada por meio da determinação da CTC das misturas aditivadas com a solução policatiónica após lavagem e por análise química dos filtrados desta lavagem.

As análises de CTC das misturas apresentaram os valores cons-

Tabela 1 – composição química do solo

Componente	(%)	Componente	(%)
SiO_2	$63,9 \pm 3,1$	BaO	0,06
Al_2O_3	$14,7 \pm 0,7$	MnO	0,05
Fe_2O_3	$4,26 \pm 0,2$	ZrO_2	0,04
K_2O	$2,81 \pm 0,1$	Rb_2O	0,02
TiO_2	$0,91 \pm 0,05$	Cl	0,02
MgO	$0,58 \pm 0,03$	ZnO	0,01
CaO	$0,33 \pm 0,02$	SrO	0,01
Na_2O	$0,32 \pm 0,02$	Ga_2O_3	0,01
Cr_2O_3	$0,12 \pm 0,01$	CuO	tr
SO_3	0,10	P.F.	11,73

Tabela 2 – composição química da turfa utilizada.

Elemento analisado	Valor
Matéria orgânica total (por combustão)	93,4% (base seca)
Cinzas (100 – M.O.)	6,6%
Carbono total (orgânico + mineral)	51,90%
Carbono orgânico	41,77%
N (total)	1,47%
P_2O_5 (total)	0,15%
K_2O	0,03%
Ca	0,37%
Mg	0,03%
S	0,15%
C / N	29 / 1

Tabela 3 - valores de porosidade e densidade aparente das misturas.

Amostra	Macroporosidade (%)	Mesoporosidade (%)	Microporosidade (%)	Porosidade total (%)	Densidade Aparente (g/cm^3)
Branco	13,48	19,71	31,07	64,26	1,13
A	17,13	17,16	30,44	64,73	1,11
B	18,38	14,80	31,40	64,58	1,07
C	19,72	13,94	31,78	65,44	1,05
D	23,82	7,96	32,62	64,40	1,05

Figura 2 – Diagrama de porosidade obtida por ensaios de dessorção, construído a partir da tabela 3

tantes da Tabela 6.

A amostra BR1 representa um “branco” não aditivado com a solução policatiónica, mas submetida às demais condições do ensaio (lavagem e filtração).

Os resultados das amostras Branco e BR1 revelam que a simples

Tabela 4 – valores obtidos nos ensaios de condutividade hidráulica

Amostra	Condutividade (cm/h)
Branco	4,82
A	10,55
B	13,73
C	17,49
D	14,30

Figura 3 – Diagrama dos ensaios de condutividade hidráulica, construído a partir da tabela 4

Tabela 5 – valores de pH das misturas em função da concentração de NaOH

Amostra\NaOH	0	0,22 g/L	1,02 g/L	2,90 g/L
Branco	4,59	7,12	8,71	10,91
A	4,5	6,7	8,27	10,44
B	4,47	6,42	7,97	9,97
C	4,17	6,2	7,7	9,44
D	3,99	6,04	7,36	9,11

Figura 4 – Diagrama de pH's das misturas em função da concentração de NaOH, construído a partir da tabela 5.

adição da solução policatiônica provoca aumento na CTC total do solo da ordem de 28% (de 72,2 para 92,4 mmol/Kg), o que pode ser explicado pelo teor em matéria orgânica nele existente, e pela possível presença de gibsit e goethita amorfas (não se pode creditar este aumento à presença da caulinita, único argilomineral identificado neste solo nas análises mineralógicas e, reconhecidamente, de baixo poder de retenção de cátions trocáveis).

Nota-se também que este aumento ocorre para todos os cátions trocáveis, exceto Ca^{2+} e Na^+ , este último por não estar presente na solução adicionada. O cálcio constitui, inclusive, o cátion trocável preponderante (H^+ à parte) no solo "in natura" e, em que pese estar presente em quantidade significativa na solução policatiônica (13938 mg/Kg – Tabela 7), não ocorreu aumento correspondente na CTC para este cátion tomado individualmente. A não retenção do Ca^{2+} em sua forma trocável pode indicar forte interferência dos demais constituintes da solução adicionada, principalmente K^+ .

A presença de turfa nas misturas acentuou mais este aspecto, uma vez que a quantidade trocável deste cátion apresentou-se ainda mais deprimida, indicando que a utilização desta turfa potencializou a não retenção de Ca^{2+} trocável no solo. Aparentemente, a solução policatiônica deslocou este cátion dos possíveis sítios de troca iônica ou, de alguma forma, não permitiu sua fixação

Tabela 6 – CTC das misturas solo+turfa+solução policatiônica, após lavagem

Amostra	pH (CaCl_2)	Na	K	Ca	Mg	Al	H+Al ⁽²⁾	SB ⁽³⁾	CTC ⁽⁴⁾
		(mmol/Kg)							
BRI ⁽¹⁾	4,1	0,2	2,0	16	8	7	46	26,2	72,2
Branco	3,1	0,2	11,2	13	9	11	59	33,4	92,4
A	3,1	0,3	12,0	12	8	13	80	32,3	112,3
B	3,1	0,2	8,4	8	5	16	96	21,6	117,6
C	2,9	0,2	7,9	8	6	17	102	22,1	124,1
D	3,0	0,2	9,4	12	9	18	100	30,6	130,6

(1) Amostra do solo sem adição da solução policatiônica, lavada nas mesmas condições que as demais.

(2) $\text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$ = acidez trocável

(3) $\text{SB} = \text{Na}^+ + \text{K}^+ + \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ = soma das bases trocáveis

(4) $\text{CTC total} = \text{H}^+ + \text{Al}^{3+} + \text{SB}$

nas amostras, contivessem elas turfa ou não.

O mesmo pode ser afirmado relativamente aos teores de K^+ e Mg^{2+} para as amostras com adição de turfa, cujos teores apresentaram-se, via de regra, inferiores à amostra Branco, ou seja, a presença da turfa pouco ou nada influiu na retenção destes cátions em sua forma trocável. O parâmetro SB (soma de bases trocáveis) ilustrou bem estas constatações, uma vez que o maior valor foi observado exatamente para a amostra Branco.

Foi, entretanto, para o parâmetro "acidez trocável" – soma algébrica de Al^{3+} e H^+ – que os valores se tornaram gradativamente maiores à medida que aumentou a proporção de turfa nas misturas, em função do aumento dos íons H^+ presentes nos grupos funcionais carboxílicos e fenólicos. Este parâmetro aumentou 35,6% para a mistura A relativamente ao Branco e, a exemplo do ocorrido com os demais cátions trocáveis, também sofreu incremento (cerca de 28%) com a simples adição da solução policatiônica (pH 1,41 – v. Tabela 7) às amostras. Segundo Crist *et al.* (1996), íons H^+ presentes naqueles grupos funcionais são liberados das substâncias húmicas principalmente por mecanismos de troca iônica. O aumento pronunciado na acidez trocável refletiu-se na CTC total, apresentando relação direta com a quantidade de turfa adicionada às amostras: o aumento de 21,5% obtido para a mistura A ascen-

deu a 41,3% para a mistura D, que se constituiu no melhor resultado dentre as amostras estudadas.

O aumento na CTC reflete-se positivamente na retenção de nutrientes pelo solo. A Tabela 7 apresenta as análises químicas dos filtrados provenientes da lavagem das misturas solo+turfa aditivadas com a solução policatiónica, bem como os respectivos percentuais de retenção de cada elemento químico, relativamente à amostra Branco.

Pelos dados da Tabela 7 pode-se inferir que a turfa adicionada ao solo lhe confere um aumento no poder de retenção de quase todos os elementos analisados. As exceções consistem do cálcio (para todas as incorporações), magnésio (para as amostras C e D) e fósforo (para a amostra D). A retenção do cobre somente foi observada na mistura com o maior teor em turfa (D), embora, em devido aos baixos teores envolvidos, pouco se pode afirmar relativamente à retenção deste elemento pela turfa em questão.

A ordem de grandeza do ganho de retenção não é, entretanto, proporcional o teor de turfa adicionada ao solo nas condições de análise utilizadas. Sob esta ótica, a pequena variação dos dados analíticos pode ser creditada à lixiviação por lavagem das amostras (um litro de água destilada para 100 g de amostra) e à impossibilidade de controlar o pH durante o experimento, fato de considerável relevância tendo em vista o baixo pH da solução policatiónica. Segundo Coupal & Lalancette (1976), entre pH 3,0 e 8,5 a turfa adsorve de forma bastante eficiente a maioria dos metais de transição, em proporções superiores a 4% do correspondente à sua massa seca, mas perde sensivelmente seu poder sorvente para a maioria dos metais em pH inferior a 3,0.

Em termos de retenção de cátions, o cálcio foi o único elemento a apresentar comportamento anômalo para todas as amostras que receberam a adição de turfa, fato que não encontra suporte na literatura sobre adsorção por turfas. Petroni (1999) observou, em experimentos envolvendo a adsorção de Zn^{2+} e Cd^{2+} por uma turfa proveniente do Estado de Santa Catarina a partir de soluções sintéticas, que a adsorção do metais foi bastante prejudicada quando Ca^{2+} foi adicionado à solução, constituindo-se em elemento fortemente interferente no fenômeno e de alta afinidade à referida turfa. Wolf *et al.* (1977 *apud* Brown *et al.* 2000) relatam que o poder sortivo para certos metais em solução (Pb, Cd, Cu e Zn) aumenta quando Ca^{2+} está presente na turfa na proporção direta de sua concentração, ou seja, quanto maior o teor em Ca^{2+} melhor o de-

sempenho tecnológico da turfa; outra conclusão daquele trabalho é que quando Ca^{2+} está presente na solução, o poder sortivo da turfa para aqueles metais diminui em favor do Ca^{2+} .

Não obstante a observação do parágrafo anterior, os dados da Tabela 7 revelam uma ordem preferencial de retenção de cátions pelas amostras contendo turfa representada pela sequência $Fe > Zn > K, Mn > P$.

CONCLUSÕES O presente trabalho logrou comprovar, no âmbito laboratorial, a eficácia da utilização da turfa como melhorador de solos degradados ou que apresentem deprimidos seus principais parâmetros de fertilidade.

A adição de turfa ao solo conseguiu alterar favoravelmente algumas de suas propriedades físicas de forma a consignar-lhe um espaço poroso redesenhado. Nesse sentido e para as condições experimentais utilizadas, obtiveram-se aumentos da macroporosidade em até 76%, bem como da condutividade hidráulica, em até 263%, com diminuição da densidade aparente em até 7%. Estes fatores são de elevada importância à circulação de fluidos e ao desenvolvimento de raízes pivotantes, capazes de explorar maior volume de solo em busca de água e nutrientes, bem como à diminuição de adensamentos.

A CTC total apresentou sensível melhora em função do aumento no parâmetro acidez trocável, reflexo do incremento dos íons H^+ trocáveis fornecidos pela turfa, o que permite aos solos maior capacidade de reter os nutrientes da adubação contra a lixiviação promovida pelas chuvas intensas características do clima tropical.

A adição de turfa ao solo conferiu-lhe, também, um tamponamento contra desequilíbrios minerais ocasionados por modificações do pH do meio, passíveis de ocorrência por adubações e/ou calagem descontroladas. As amostras contendo turfa apresentaram, relativamente ao Branco, variações de pH em razão inversa à quantidade de turfa presente, em resposta à adição de substâncias fortemente modificadoras do pH.

Os resultados credenciam-na, assim, à utilização em programas de recuperação ambiental de áreas degradadas, seja pela mineração, seja em decorrência de quaisquer outros empreendimentos modificadores do meio físico.

Agradecimentos À CAPES pela bolsa de mestrado a José Guilherme Franchi e aos revisores da RBG pelas sugestões.

Tabela 7 – análises químicas dos filtrados provenientes da lavagem das misturas aditivadas com a solução policatiónica (valores em mg/Kg)

	Solução Estoque	BR1 (*)	Branco	A		B		C		D	
	mg/Kg	mg/Kg	mg/Kg	mg/Kg	% Retenção	mg/Kg	% Retenção	mg/Kg	% Retenção	mg/Kg	% Retenção
P	4841±24	16	1754±9	1722±9	101,0	1700±9	101,7	1689±8	102,1	1777±9	99,3
K	38435±769	9±0,5	9327±187	8594±172	102,5	8386±168	103,2	8648±173	102,3	8368±167	103,3
Zn	90±2	< 1	28±1	25±1	104,8	25±1	104,8	26±1	103,2	25±1	104,8
Fe	189±4	< 1	108±2	98±2	112,3	97±2	113,6	103±2	106,2	99±2	111,1
Cu	12	< 1	3	3	100,0	3	100,0	3	100,0	2	111,1
Mn	110±2	< 1	41±1	39±1	102,9	39±1	102,9	40±1	101,4	40±1	101,4
Ca	13938±277	5±0,3	5437±109	5651±113	97,5	5748±115	96,3	5486±110	99,4	5655±113	97,4
Mg	5043±101	< 1	2702±54	1425±29	154,5	2445±49	111,0	2796±56	96,0	2797±56	95,9
pH	1,41	5,46	2,06	2,02		2,06		2,11		2,12	

(*) Amostra do solo sem adição da solução policatiónica, lavada nas mesmas condições que as demais.

Referências

- Almeida F.F.M. 1976. The system of continental rifts bordering the Santos Basin, Brazil. *An. Acad. Bras. Ciênc.*, **48** (suplemento):15-26.
- Andrejko M. J., Fiene F., Cohen A. D. 1983. Comparison of ashing techniques for determination of the inorganic content of peats. In: Jarrett, P. M. ed. *Testing of Peats and Organic Soils*. ASTM, Philadelphia, pp.: 5-20. (ASTM Special Technical Publication, 820)
- Bonneau M. & Levy G. 1982. Assembly and physical organization of particles. In: M. Bonneau & B. Souchier (coords.) *Constituents and properties of soils*. Academic Press, New York, pp.: 268-87.
- British Standards Institution – BSI. 1967. *Method for determination of apparent density after compaction of precipitated calcium carbonate*. BSI, London.
- Brown P. A., Gill S. A., Allen S. J. 2000. Review paper - Metal removal from wastewater using peat. *Water Research*, **34**:3907-3916.
- Carneiro C. D. R., Hasui Y., Giancursi F. D. 1976. Estrutura da Bacia de Taubaté na região de São José dos Campos. In: SBG, Congr. Bras. Geol., 29, *Anais*, p. 247.
- Clymo R. S. 1983. Peat. In: A. J. P. Gore (ed.) *Mires: swamp, bog, fen and moor*. Elsevier, Amsterdam, pp.: 159-224. (Ecosystems of the world, 4A)
- Couillard D. 1994. The use of peat in wastewater treatment: a review. *Water Resources Research*, **28**:1261-74.
- Coupal B. & Lalancette J. M. 1976. The treatment of wastewaters with peat moss. *Water Research*, **10**:1071-1076.
- Crist R. H., Martin J. R., Chonko J., Crist D. R. 1996. Uptake of metals on peat moss: an ion-exchange process. *Environmental Science & Technology*, **30**:2456-2461.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. 1997. *Manual de métodos de análise de solo*. 2. ed. EMBRAPA-CNPS, Rio de Janeiro, 212pp.
- Franchi J. G. 2000. *Aplicação de turfa na recuperação de solos degradados pela mineração de areia*. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica, Deptº Engº Minas, Universidade de São Paulo, 105p.
- Franco A. A., Campello E. F., Dias L. E., Faria S.M. 1994. Revegetação de áreas de mineração de bauxita em Porto Trombetas - PA com leguminosas arbóreas noduladas e micorrizadas. In: Fundação de Pesquisas Florestais do Paraná, Simp. Sul-Americano, 1, Simp. Nac. Recup. Áreas Degradadas, 2, *Anais*, p. 145-53.
- Fuchsman C. H. 1980. *Peat - industrial chemistry and technology*. Academic Press, New York, 279pp.
- Garcia M. J. 1994. *Palinologia de turfeiras quaternárias do médio vale do Rio Paraíba do Sul, Estado de São Paulo*. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 3v.
- Hasui Y. & Ponçano W. L. 1978. Organização estrutural e evolução da Bacia de Taubaté. In: SBG, Congr. Bras. Geol., 30, *Anais*, p. 368.
- Hasui Y., Gimenez A. F., Melo M. S. 1978. Sobre as bacias tafrogênicas continentais do sudeste brasileiro. In: SBG, Congr. Bras. Geol., 30, *Anais*, p. 382.
- International Peat Society – IPS. 1997. *On peat and peatlands: a short introduction*. [On line]. Disponível através de <http://www.peatociety.fi> [1997/12/19]. Arquivo capturado em 05/02/2000.
- Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis - IBAMA. 1990. *Manual de recuperação de áreas degradadas pela mineração: técnicas de revegetação*. MINTER/IBAMA, Brasília, 96pp.
- Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT. 1979. *Estudo das possibilidades de aproveitamento de turfa no Estado de São Paulo*. IPT, São Paulo. (Relatório 12.761)
- Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT. 1981. *Prospecção Regional de turfa no Estado de São Paulo*. IPT, São Paulo. (Relatório 15.318)
- Klute A. & Dirksen C. 1987. Hydraulic conductivity and diffusivity: laboratory methods. In: A. KLUTE (ed.) *Methods of soil analysis*. American Society of Agronomy and Soil Science Society of America, Madison, pp.: 687-734. (Agronomy, 9)
- Libardi P. L. 1995. *Dinâmica da água no solo*. O Autor, Piracicaba, 497pp.
- Lopes F. C. C. 1984. Paineis sobre o 7º Congresso Internacional de Turfa, realizado em Dublin - Irlanda (Junho de 1984), e sua correlação com a situação das turfas brasileiras. In: CESP, Seminário sobre turfa: prospecção, produção e usos, *Palestras*, p. 183. (Série Pesquisa e Desenvolvimento, 017)
- Melo M. S., Riccomini C., Hasui Y., Almeida F. F. M., Coimbra A. M. 1985. Geologia e evolução do sistema de bacias tafrogênicas continentais do sudeste do Brasil. *Rev. Bras. Geoc.*, **15**:193-201.
- Moraes J. A. P. 1982. Avaliação preliminar dos recursos e potencial de turfa no Triângulo Mineiro. In: SBG, Congr. Bras. Geol., 32, *Anais*, p. 2198.
- Petroni, S. L. G. 1999. *Estudos de adsorção de zinco e cádmio em turfa – potencialidade de utilização de um bioadsorvedor natural em sistemas de tratamento de efluentes*. Dissertação de Mestrado, IPEN, Universidade de São Paulo, 99p.
- Primavesi A. 1985. *Manejo ecológico do solo: a agricultura em regiões tropicais*. 8. ed. Nobel, São Paulo, 541pp.
- Ramos B. V. & Lima Fº C. A. 1982. Turfa: solução energética para o Nordeste? In: SBG, Congr. Bras. Geol., 32, *Anais*, p. 2178.
- Reichardt K. 1985. *Processos de transferência no sistema solo-planta-atmosfera*. 4. ed. Fundação Cargill, Campinas, 445pp.
- Riccomini C. 1989. *O Rift Continental do Sudeste do Brasil*. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 256p.
- Shotyk W. 1988. Review of the inorganic geochemistry of peats and peatland waters. *Earth-Science Reviews*, **25**:95-176.
- Tan K. H. 1993. *Principles of soil chemistry*. 2. ed. Marcel Dekker, New York, 362pp.

Manuscrito A-1330

Recebido em 12 de março de 2002

Revisão dos autores em 28 de agosto de 2003

Revisão aceita em 05 de setembro de 2003