

# Modelo reológico de comportamento de resíduos e aterros sanitários, segundo critérios de projeto e operação atuais no Brasil

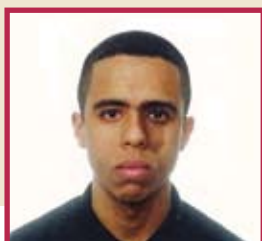


Clóvis Benvenuto

Geotech: Geotecnia ambiental, Consultoria e Projetos Ltda.

R. João da Cruz Melão, 131 – Fax: (11) 3771-4786 / Tel: (11) 3742-0804

Diretor Técnico, Eng<sup>o</sup> Civil, Mestre em Engenharia – geotech@terra.com.br



Marco Aurélio Cipriano

Geotech: Geotecnia ambiental, Consultoria e Projetos Ltda.

R. João da Cruz Melão, 131 – Fax: (11) 3771-4786 / Tel: (11) 3742-0804

Estagiário de Engenharia Ambiental – marco@geotech.srv.br

## RESUMO

Este trabalho apresenta a abordagem geotécnica da concepção de um modelo reológico do comportamento dos resíduos sólidos domiciliares dispostos em aterros sanitários, relativo a poro-pressões. O intuito é estabelecer a adequação da aplicação dos modelos geotécnicos para solos, através de análises de estabilidade por equilíbrio limite, e a aproximação que se faz para os resíduos sólidos domiciliares. Como característica marcante do comportamento desses resíduos destaca-se a alta porcentagem de matéria orgânica presente nos mesmos, trazendo a variação mássica entre as fases sólida, líquida e gasosa ao longo do tempo, devido à decomposição da matéria orgânica. Como consequência identifica-se um modelo de movimento e comportamento das fases sólidas e fluidas no meio, sua influência na geração e mudanças de poro-pressões e na adequação dos modelos matemáticos de estabilidade. Essas reflexões e proposições foram baseadas em observações de campo, ao “pé da sonda” e junto ao computador, e cristalizam alguns anos de estudo e atuação nessa área do conhecimento. Os autores tentam apresentar, gradualmente, as suas convicções procurando traduzir o imaginado no comportamento dos resíduos em sua posição espacial nos aterros sanitários, objetivando contribuir para atividades de avaliação de riscos e de projeto dos aterros sanitários.

## Palavras-chave:

resíduos sólidos urbanos, aterro sanitário, estabilidade, lixo.

## 1. INTRODUÇÃO E CONTEXTO

Muito embora a matéria a ser abordada pertença ao mundo dos “restos” das atividades humanas, sua disposição final encontra pertinência na relação e importância no comportamento geotécnico dos resíduos, tal e qual com a evolução tecnológica dos produtos, com tendência de tornar esse conjunto de conhecimentos em uma disciplina, denominada de “residuotecnia” ou “residuotécnica”.

O modelo de produção e de consumo da sociedade atual exige respostas também para os resíduos e sua inexorável existência, razão pela qual esse assunto se torna de interesse público/privado, onde a técnica de destinação e disposição é parte do gerenciamento dos “restos”.

Muito embora a mistura dos “restos” seja uma abominável realidade, buscando-se alternativas de gerenciamento adequado dos resíduos, o aterro sanitário com essa mistura é a solução definida pela equação técnica e econômica da sociedade a curto e médio prazo.

Desta forma, nas próximas linhas pretende-se deixar de lado os pruridos do gerenciamento ideal sustentável dos resíduos sólidos domiciliares e enveredar pelo comportamento das massas de resíduos dos aterros sanitários atuais, com as implicações para a engenharia e com conceitos técnicos voltados à necessidade de obterem-se respostas para a segurança ambiental.

Essa abordagem deve ser considerada técnica e de utilidade centrada no nosso tempo, com evolução futura esperada, não sendo, portanto, baseada em axiomas práticos de uma nova teoria, mas sim de adaptações do conhecimento da Mecânica dos Solos e Geotecnia a serviço dos aterros sanitários.

## 2. HIDROGEOECNIA DOS ATERROS SANITÁRIOS

O modelo de quatro fases para os resíduos em aterros sanitários tem sido adotado com a coexistência de sólidos (fibras e pasta-putrecível-decomponível), líquidos e gases.

O enfoque deste artigo é a fase fluida, líquido e gases, considerando aceitos os conceitos de fibras e “pasta”, ou “sólidos pastosos”, conforme definido em Machado, Carvalho e Vilar (2009). Ou seja, principalmente parte dos sólidos por ação biológica e química se decompõe ou reage de forma a mudar de fase ou integrar a fase líquida, sendo as fibras a parcela sem mudança de estado, ou seja, com variação volumétrica insignificante.

### 2.1. O MODELO DAS “BOLHAS”

Inicialmente, representa-se uma “bolha” de ar somente em líquido, que exibe pressão interna superior à externa para poder manter-se e, num segundo momento, o modelo de “bolha” nos resíduos, onde as permeabilidades aos gases e líquidos geram o equilíbrio das fases, momentaneamente.

De forma semelhante, para a existência da “bolha” nos resíduos, a pressão interna deve ser maior que a externa.

### 2.2. A “RESPIRAÇÃO” DOS ATERROS SANITÁRIOS

Os aterros sanitários apresentam, ao longo do tempo, geração de biogás, com aumento das pressões internas, na medida em que haja aprisionamento ou dificuldade do mesmo ser drenado. Esta pressão se dissipa à medida que o biogás percola pelos vazios dos sólidos, sendo drenado pelo sistema de drenagem ou percolado pela camada de cobertura do aterro. Esse fenômeno se apresenta de forma intermitente, com intervalos de tempo irregulares, com oclusões dos líquidos, que se rearranjam por forças de campo.

Tem-se a impressão que o aterro “respira”, ou seja, “inspira” por geração interna do biogás e suas conseqüentes pressões, e “expira” o biogás, percolando e desviando das oclusões dos “bolsões” de líquidos.

Concomitantemente, os líquidos percolam para cotas inferiores, lixiviando os resíduos, abastecendo as bactérias e gerando

o chamado “chorume”, sendo posteriormente coletado e tratado.

Já foi possível observar esse “arfar”, visualmente, com aparência de cobertura dos resíduos “inchando” ou “enrugando” no Aterro Sanitário Sítio São João, em São Paulo.

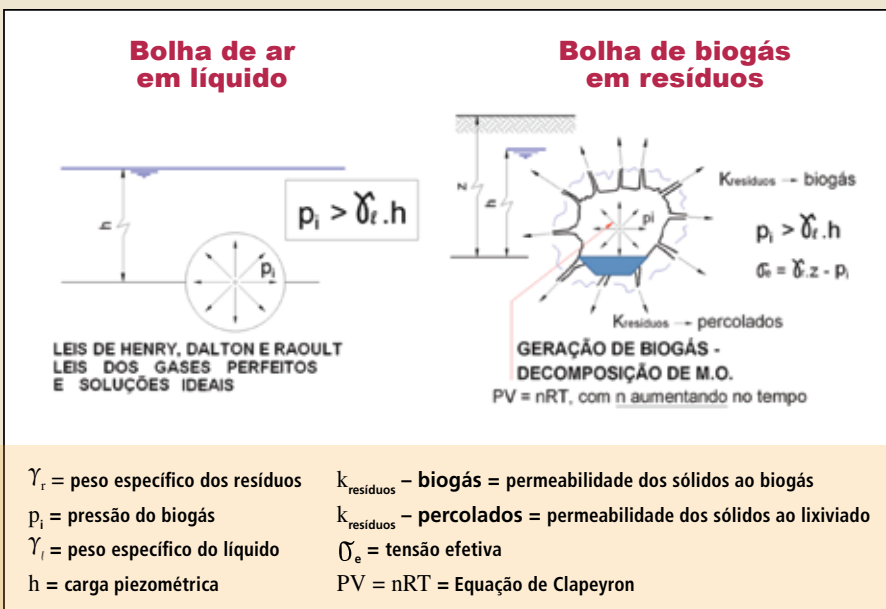
O acompanhamento da variação dos deslocamentos horizontais dos maciços dos aterros sanitários, em geral, ao longo do tempo, registra numericamente essa movimentação, com alternância das direções e sentido dos vetores de deslocamento horizontal.

### 2.3. INFLUÊNCIA DO BLOQUEIO DE AR (“AIR LOCKED”) E DOS LÍQUIDOS SUSPENSOS

O modelo apresentado para os resíduos estabelece a interação entre as fases líquida, sólida e gasosa, ocorrente nos resíduos, com permeabilidades aos gases e líquidos diferenciadas devido às diferentes viscosidades dos fluidos e da estrutura dos vazios do arcabouço sólido. Assim, para a coexistência das fases líquida e gasosa e a existência da bolha, a pressão instantânea é ligeiramente maior nos gases. Este fato cria uma oclusão que dificulta a passagem e a percolação dos lixiviados, segundo as leis da percolação de líquidos em meios porosos.

Essas pressões de líquidos e gases atuam no arcabouço sólido como pressões internas, poro-pressões, forçando e direcionando a movimentação de gases e líquidos pela massa de resíduos. Os gases são formados, principalmente, na fase da “pasta sólida”, em pontos indistintos dos resíduos. Os líquidos sofrem as forças de campo e tendem a “descer” e os gases (biogás) tendem a “subir” por efeito da convecção. Nesse cruzamento de rotas os bloqueios e impedimentos de movimentação assumem posições transitórias na massa, criando os bolsões de líquidos e gases, de dimensões e tempo de existência variável. Esse efeito é

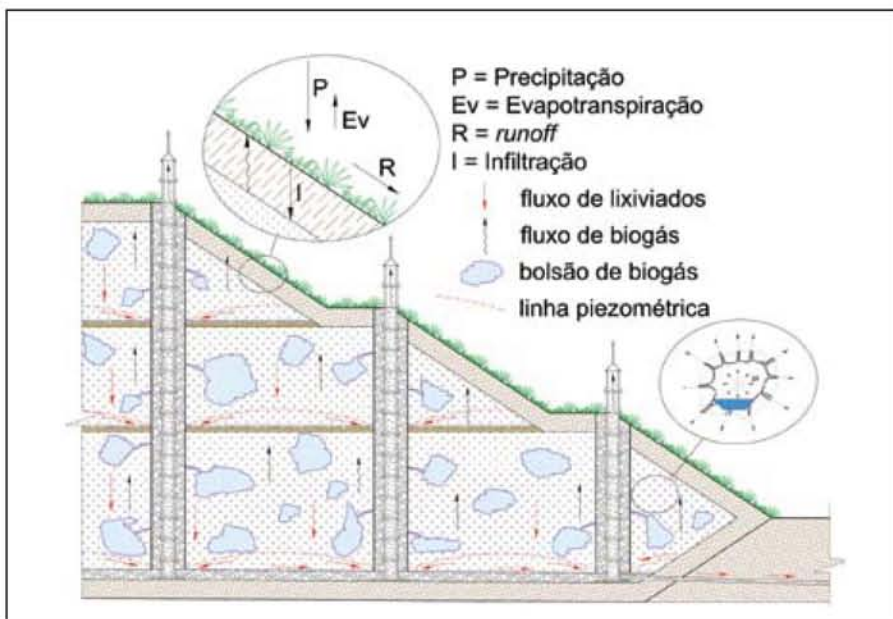
Figura 1 – Esquema das “bolhas”.



que pode ser denominado de "air locked" ou oclusão por bolhas de gases, que estabelece o princípio do comportamento das poro-pressões nos resíduos e, conseqüentemente, no arcabouço sólido, influenciando em sua estabilidade mecânica.

Além disso, há as camadas de solo empregadas para as coberturas operacionais, (diárias ou periódicas), dos resíduos, que definem os planos/espacos de disposição e decomposição dos resíduos. Muitas vezes essas camadas são planas ou subverticais, compondo essa massa como uma parte dos resíduos, delimitantes do espaço de permanência dos resíduos, condicionando também a movimentação dos fluidos.

Nota-se pelo exposto que para o entendimento da "hidrogeotecnia" de um aterro deve ser considerado o projeto e operação do mesmo de forma a distinguir-se entre as condições extremas de vazadouros e aterros sanitários e as eventuais condições intermediárias, com os sistemas de drenagem, cobertura e proteções ambientais



projetados e a conformidade da execução de acordo com o projeto.

O esquema a seguir define o modelo hidrogeotécnico dos aterros sanitários, conforme são projetados e executados entre nós, por exemplo, Aterro Sanitário Bandeirantes, Aterro Sanitário Sítio São João, Aterro Sanitário Santo André, e outros, observados em diversos experimentos, ensaios, sondagens e discussões técnicas.

**Figura 2 – Modelo hidrogeotécnico de aterros sanitários no Brasil (ABLP, 2008).**

Nessa massa formada em camadas de resíduos, geralmente separadas por coberturas de solos, a coexistência de planos preferenciais horizontais de disposição e compactação dos resíduos define o sistema de estado dos líquidos e gases, com as drenagens ocorrendo em sentidos opostos na direção vertical. Gases para cima e

líquidos para baixo, com sistemas de coleta associados.

Os sistemas de drenagem são projetados em geral descontínuos, gerando níveis “empoleirados” de percolados e bolsões de gases, que propiciam a drenagem de forma conjunta, porém fazendo com que a massa de resíduos “arfe” com “inchamentos” e “murchamentos”. Alternam-se a intervalos de tempo os bloqueios/desbloqueios dos vazios no meio dos resíduos, com os fluidos alcançando os sistemas de drenagem de líquidos e gases de forma intermitente, porém generalizada no espaço por onde os drenos de coleta estão instalados.

O bloqueio dos gases e lixiviados é fenômeno observado nos aterros sanitários, não ocorrendo nos modelos tradicionais da engenharia de barragens de terra, por exemplo, onde as redes de percolação uniformes são representativas do fluxo de água em meio poroso, no caso o solo.

A complexa hidrogeotecnia dos aterros define-se com os lixiviados, regidos por forças de campo e com os gases, em bolsões e sob pressões, impedindo que o fluxo dos líquidos sejam, exclusivamente, governados pela equação de Bernoulli e, por sua vez, os gases, de forma similar, pelos princípios de Arquimedes ou de convecção.

A equação de Bernoulli não é unicamente a que explica o fenômeno, mas pode apresentar o princípio para os líquidos, muito embora, em geral, os lençóis estejam suspensos e sua aplicação deva ser pontual ou por camada.

A hidrogeotecnia do aterro é, portanto, complexa com movimentações de fluidos comandadas por:

**a)** Gerações pontuais de gases na massa de resíduos;

**b)** Compressões dos vazios, com expulsão de líquidos, gases e variações de permeabilidades (mudanças de dimensões de vazios);

**c)** Perdas de massa “sólida” que passam a líquido e gás (reações biológicas e químicas);

**d)** Variações de permeabilidades aos fluidos (gás e percolados de diferentes viscosidades) e do meio poroso conforme apresentado em b);

**e)** Formação de níveis suspensos de percolados (empoleirados) ou bolsões isolados;

**f)** Bolsões de gases que tentam se expandir, com aumento de pressões, por ganho de “massa”, variação de temperatura e compressão dos vazios; e

**g)** Fenômenos físico-químico-biológicos variáveis no tempo, com influências externas do clima, resíduos e sistema de operação do aterro.

### 3. A MODELAGEM MATEMÁTICA E REPRESENTAÇÃO NUMÉRICA DAS PORO-PRESSÕES

A utilização do modelo de determinação de poro-pressões pontual é o que melhor refletiria a condição de poro-pressões interna aos resíduos, com a tendência de pressões de gases e líquidos serem maiores conforme aumentam as profundidades. Essa tendência é uma das únicas condições que parecem dedutíveis e observáveis. É, no entanto, impossível ter-se em todos os pontos do aterro essas medidas.

O desenvolvimento das poro-pressões ao longo da profundidade segue uma determinada equação que depende de vários fatores conforme já citado, porém com tendências de ser de forma crescente, seguindo os princípios do aumento das

tensões nos resíduos e das pressões das colunas de líquidos com a profundidade.

Assim, o ideal seria poder dispor dos valores das poro-pressões em diversas profundidades e considerar estes valores na análise de estabilidade, o que tem sido de difícil e onerosa obtenção. Resta, portanto, encontrar um modelo de representação das poro-pressões que pode ser o de linhas piezométricas, poro-pressões pontuais ou uma equação de variação dessas poro-pressões com a profundidade.

Desta forma a adoção dessa equação como sendo uma reta é uma aproximação que se vislumbra e que tem sido adotada. Este procedimento é o definido com a adoção de valores de  $r_u$ , que podem ser inclusive modelados facilmente pelos programas de análise geotécnica de estabilidade, pelo método do equilíbrio limite. O coeficiente  $r_u$  é o chamado coeficiente de Bishop e Morgenstern, que relaciona a pressão neutra da Mecânica dos Solos com a tensão total vertical de peso de terra sobre o ponto em problemas de barragens de terra e encostas, sob fluxo de água em meio poroso. No caso dos aterros sanitários seria a relação da poro-pressão e a tensão vertical devido ao peso dos resíduos sobre o ponto.

O esquema a seguir mostra como uma função desconhecida (em vermelho) de poro-pressão pode ser representada por uma reta (tracejada), similarmente às tensões verticais devido ao peso dos resíduos e pressões hidrostáticas (azul e verde). Este ajuste tem sido considerado satisfatório, inclusive aplicado para os estudos no Aterro Sanitário Bandeirantes em 2005, onde se analisou a estabilidade com poro-pressões pontuais.

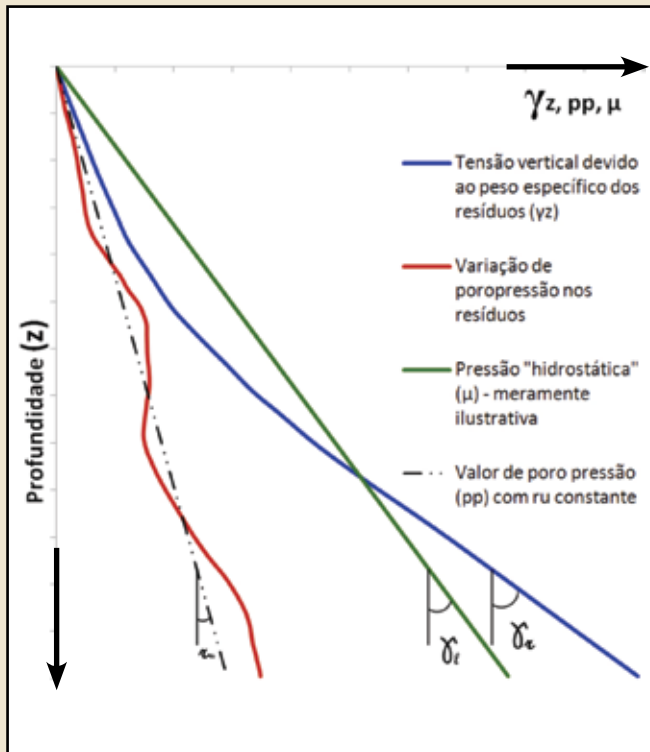


Figura 3 – Poropressões e tensões verticais.

A derivada em cada ponto das curvas representa o peso específico dos líquidos,  $\gamma_l$ , dos resíduos,  $\gamma_r$ , e o coeficiente  $r_u$  no caso das poro-pressões.

Assim, tem-se medido ou determinado as poro-pressões no maciço e calculado o coeficiente  $r_u$  que é adotado para todo o maciço de resíduos, constante ou variável na profundidade nas análises numéricas de estabilidade.

Complementarmente, não pode deixar de ser lembrado que há a necessidade de modelagem da reologia dos resíduos para simular a ruptura de um maciço considerando:

- Geometria da disposição – Projeto do aterro sanitário e seus sistemas;
- Peso específico dos resíduos (tipologia, tempo, umidade, condições de disposição, etc.);
- Definição dos parâmetros de resistência – Critério de Mohr Coulomb ( $c'$  e  $\Phi'$ ) e efeito das fibras;
- Distribuição das poro-pressões internas de gases e lixiviados; e
- Modelo matemático representativo do comportamento.

Desta forma determinam-se as condições de criticidade e a definição do projeto de instrumentação geotécnica e monitoramento no tempo, para analisar, verificar e garantir a segurança.

Os valores de  $r_u$  obtidos no campo por sondagens e piezometria devem ser os parâmetros de verificação da condição de estabilidade perante a criticidade modelada. Essas análises devem ser sempre

realizadas em termos de tensões efetivas, já que mesmo para os resíduos em aterros sanitários o Princípio das Tensões Efetivas de Terzaghi, (Terzaghi, 1925, 1943) e o comportamento dos meios não-saturados em solos se aplicam para os resíduos

#### 4. A APLICABILIDADE DO MODELO PROPOSTO E SUAS LIMITAÇÕES

A condição de projeto e execução de um aterro sanitário (“disposição de resíduos”) é que ditará o modelo reológico/hidráulico a ser adotado numa análise de estabilidade por equilíbrio limite, sendo a condição “ideal”, em qualquer caso, o *conhecimento em todos os pontos do maciço dos valores das poro-pressões, ou seja uma “onisciência” do comportamento dos resíduos, inclusive de outros parâmetros envolvidos na análise.*

Essa forma de enunciar o problema é de todo impossível de ser alcançada, porém a engenharia trata esse nível de incerteza parametricamente de forma a subsidiar as decisões perante incertezas, Mello (1974).

Desta forma buscam-se comportamentos médios que representem o comportamento dos resíduos, inclusive não só de poro-pressões, como dos outros parâmetros envolvidos como resistência e peso específico, dentro das práticas usuais de engenharia geotécnica, com adoção de modelos de análise de segurança baseados no princípio das tensões admissíveis e conseqüente obtenção de fatores de segurança determinísticos.

Como observação na utilização do parâmetro  $r_u$  deve-se considerar que na periferia do aterro, ou seja, na sua superfície, esse coeficiente assume o valor nulo e ao longo da vertical com o aumento das tensões confinantes, a poro-pressão é crescente, com uma função, por exemplo, linear, com coeficiente  $r_u$ , desta forma, constante na vertical, ou seja, modelo linear de desenvolvimento de poro-pressões com a profundidade.

Ao se instrumentar pontualmente um aterro, os valores obtidos, para as poro-pressões representam o comportamento do maciço no ponto, que inclusive é de valor nulo na superfície, como já citado. A modelagem matemática com a média dos valores de coeficientes  $r_u$  obtidos em vários pontos do aterro é representativa, definindo uma distribuição variável no espaço, resultante da própria característica intrínseca do fenômeno analisado.

Ora, uma análise de estabilidade com uma determinada superfície de ruptura varre toda uma região de ruptura, cortando diversos pontos da disposição de resíduos no maciço, de forma que os valores de poro-pressões são variáveis para as lamelas consideradas ao longo da superfície de ruptura. Portanto, o que define os esforços resistentes e solicitantes é uma somatória das contribuições das lamelas no espaço, com variações consideradas em relação à profundidade, estabelecida, assim, através de uma função de variação de poro-pressão com a profundidade.

Como já mencionado, o modelo ideal seria a obtenção dos valores absolutos das poro-pressões em “todos” os pontos do maciço, o que é irreal e impossível de ser obtido, ficando o número de pontos instrumentados dentro de critérios de representatividade e economicidade plausíveis, orientados por especialista.

A ocorrência de vazadouros onde a cobertura e compactação dos resíduos são inexistentes é outro extremo da modelagem, aí podendo ocorrer, por questões de decomposição biológica, mudanças significativas do comportamento descrito. Nesse caso a existência de linha piezométrica ou mantas líquidas pode ser um modelo mais representativo que a utilização do coeficiente  $r_u$ , inclusive devido a ausência de instrumentação geotécnica.

As decisões sobre essas considerações dependem da auscultação e interpretação do especialista perante os dados disponíveis e obtidos em campo, para efetuar a análise numérica de estabilidade.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta contribuição vem no sentido de apresentar as interpretações relativas à representação das poro-pressões nos modelos de estabilidade, sem prejuízo para as considerações sobre os outros parâmetros como a resistência ao cisalhamento dos resíduos, massa específica e geometria.

O modelo de resistência referente a coesão das fibras, Kölsch (1995), tão largamente discutido e aplicado, porém muitas vezes sem critérios claros estabelecidos, deve ser abordado em trabalhos futuros a partir de experimentos laboratoriais em curso e observações de campo sobre esse comportamento.

Deve ser lembrado também que uma análise de estabilidade não se baseia apenas nessa modelagem numérica, mas carece das outras informações e metodologias consagradas para levantamento das

condições de estabilidade das disposições como condições de projeto, drenagem de lixiviados e gases, sistema de operação, prospecções nos resíduos e histórico de disposição, além das inspeções técnicas realizadas por especialista nesse assunto.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a equipe técnica da Geotech Geotecnia Ambiental Consultoria e Projetos Ltda. pelo apoio recebido e contribuições para a realização deste trabalho, bem como à ABLP pelo incentivo à divulgação e discussão para a melhoria do conhecimento técnico nacional.

## BIBLIOGRAFIA

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE RESÍDUOS SÓLIDOS E LIMPEZA PÚBLICA – ABLP (2008) Curso sobre “Aterro Sanitários – Licenças, Projeto e Operação”. ABLP – 2008 a 2010, São Paulo, SP.
- BISHOP, A. W. MORGENSTERN, N. (1960) Stability coefficients for Earth Slopes – Geotechnique – N. 4 – Vol. X.
- MACHADO, S.L.; CARVALHO, M.F.; VILAR, O. M. (2009) Modeling the Influence of Biodegradation on Sanitary Landfill Settlements – Soil and Rocks – N. 3 – Vol. 32.
- MELLO, V. F. B. (1974) Comunicação pessoal. Universidade de São Paulo, USP, 1974.
- KÖLSCH, F. (1995) Material Values for Some Mechanical Properties of Domestic Waste in SARDINIA 95 Fifth International Landfill Symposium, Sardinia, Italy, 1995.
- TERZAGHI, K., Theoretical Soil Mechanics, John Wiley and Sons, New York (1943).