

CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DO SOLO DA CIDADE DE UBERLÂNDIA (MG) / BRASIL PARA UTILIZAÇÃO EM ATERROS SANITÁRIOS

Geotechnical characterization of soil in the city of Uberlandia (MG) / Brazil for use in sanitary landfills

Ana Carolina Gonzaga*

Filipe Augusto Silva de Almeida**

Giovanna Monique Alelvan***

Renata Cristina de Oliveira Guimarães****

Karla Maria Wingler Rebelo*****

RESUMO – Apresenta-se um estudo dos solos lateríticos da cidade de Uberlândia (Minas Gerais) para utilização como camada de apoio e camada de solo compactado (CCL) de aterros sanitários. A avaliação do potencial de utilização dos solos analisados foi baseada nos critérios geotécnicos de granulometria e de limites de consistência, por meio de ensaios de caracterização física e de investigações geotécnicas. Foram ensaiadas quatro amostras de solo, abrangendo as duas unidades geológicas características da região. Com base nos resultados das características físicas, verificou-se que as amostras AM01 e AM02 pertencentes às regiões Norte e Leste da cidade, apresentam textura argilo-siltosa com potencial de utilização como CCL e como material de apoio para implantação de aterros sanitários. As amostras AM03 e AM04, pertencentes à região Sudeste e Sul, foram caracterizadas como de textura areno-argilosa, não atendendo aos valores mínimos desejáveis para utilização como CCL e como material de apoio.

SYNOPSIS – This paper presents a study of lateritic soils in the city of Uberlândia (Minas Gerais) for use as support layer and compacted soil layer (CCL) in sanitary landfills. The evaluation of the potential use of the analysed soils was based on geotechnical criteria of grain size and Atterberg limits, through physical characterization tests and geotechnical investigations. Four soil samples were tested, comprehending the two geological units characteristic of the region. Based on the results of the physical characteristics, it was verified that the samples AM01 and AM02, from the North and East regions of the city, have a silty clay texture, with potential use as CCL and as support material for implantation of sanitary landfills. Besides, AM03 and AM04 samples, belonging to the Southeast and South regions, were characterized as a soil with clayey sand texture, not meeting the minimum values desirable for application as CCL and as a support material.

PALAVRAS CHAVE – Caracterização geotécnica, impermeabilização, aterros sanitários.

* Aluna de graduação, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia.
E-mail: anacarolina.g.p@hotmail.com

** Aluno de graduação, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia.
E-mail: filipe.almeida@yahoo.com.br

*** Aluna de graduação, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia.
E-mail: giovannaalelvan@hotmail.com

**** Aluna de graduação, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia.
E-mail: renata.o.g@hotmail.com

***** Professora Adjunta, Departamento de Engenharia Civil, Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo. E-mail: kmwingler@gmail.com

1 – INTRODUÇÃO

Uma característica inerente a toda atividade humana é a produção de resíduos, dos mais variados tipos e naturezas. O que se tem observado é que quanto maior o grau de desenvolvimento do país e de um município, maior a taxa de produção diária de resíduos sólidos *per capita*. Isto se deve às maiores atividades econômicas e aos hábitos de consumo decorrentes.

Nesse contexto, cita-se a cidade de Uberlândia, localizada no Triângulo Mineiro do Estado de Minas Gerais (Brasil) e conhecida como pólo atacadista brasileiro e como centro de distribuição de mercadorias. Com esse perfil, a cidade tem atraído novos empreendimentos e apresentado intensa expansão imobiliária. Esta situação contribuiu para o aumento da produção de resíduos e, conseqüentemente, da busca e consolidação de técnicas de disposição adequada. Segundo o Instituto de Tecnologia de Uberlândia (I&T), a produção atual de resíduos sólidos urbanos na cidade é de 350 toneladas / dia.

Apesar da conscientização ambiental, que tem conduzido a técnicas de reduzir, reutilizar e reciclar, a alternativa mais adotada para disposição e tratamento de resíduos sólidos ainda é na forma de aterros sanitários e de lagoas de efluentes. No entanto, esta forma de disposição possui elevado potencial de contaminação do solo e das águas superficiais e subterrâneas, o que tem conduzido a uma investigação criteriosa para implantação destas obras.

Neste sentido, a caracterização geotécnica permite avaliar o potencial de utilização de uma camada de solo como material de apoio de aterros, e como camada de solo compactado dos sistemas de impermeabilização de fundo e de cobertura. No quesito material de apoio, sabe-se que as características do solo como, por exemplo, granulometria, caracterização dos índices físicos, permeabilidade do solo e grau de expansibilidade ou colapsibilidade, poderão exercer influência no potencial de contaminação ou de retenção de contaminantes. Segundo Kataoka (2000), a avaliação do potencial de utilização do solo como material de apoio é baseada num conjunto de atributos geotécnicos. Ao final da análise destes atributos, a camada de solo investigada pode ser classificada desde moderada a restrita para implantação de aterros sanitários.

Com relação à utilização do solo como camada compactada em barreiras de impermeabilização de fundo e de cobertura, também denominadas de barreiras de captação e desvio de fluxo, também é necessário seguir as prescrições mínimas exigidas pelos órgãos ambientais. No Brasil, a Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental - CETESB (1993) prescreve as condições hidrogeológicas e climáticas para implantação de aterros e dos sistemas de impermeabilização e cobertura, assim como as características geotécnicas dos solos utilizados como camada de solo compactado.

Visando auxiliar nas ações de planejamento e de controle de obras de disposição de resíduos, este trabalho tem como objetivo descrever as propriedades do estrato superior do solo da região de Uberlândia, analisar o seu potencial de utilização como material de apoio de aterros sanitários, assim como material de impermeabilização de fundo e de cobertura para este tipo de obra.

2 – MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 – Local da área de estudo e coleta das amostras

A cidade de Uberlândia (MG) localiza-se num importante entroncamento rodoferroviário, pelo qual passam importantes rodovias e a Ferrovia Centro Atlântica – FCA, a qual interliga Brasília (DF) ao porto de Santos, facilitando a comunicação com os principais centros urbanos das regiões Sudeste e Centro-Oeste (Andrade, 2005). A Figura 1 ilustra a localização de Uberlândia no Estado de Minas Gerais.



Fig. 1 – Mapa do Estado de Minas Gerais, com destaque para o Município de Uberlândia.

A geologia local presente na área urbana é compreendida pelas formações Serra Geral e Marília. A Formação Serra Geral é caracterizada por rochas efusivas de natureza básica e pequenas lentes de arenito intercaladas aos derrames (Andrade, 2005). Segundo Nishiyama (1989), as litologias básicas da Formação Serra Geral se apresentam em áreas expostas no vale do Rio Uberabinha e, nos interflúvios, são recobertas por rochas sedimentares da Formação Marília e/ou por sedimentos inconsolidados coluviais. Tais condições geológicas propiciam o desenvolvimento de solos argilosos conhecidos como latossolo roxo e terra roxa estruturada.

A Formação Marília é caracterizada por arenitos com alta porcentagem de finos e materiais micáceos, arenitos conglomeráticos, conglomerados e conglomerados fortemente cimentados por material carbonático. Apesar da litologia desta formação abranger uma grande área do Triângulo Mineiro, as unidades litológicas desta formação geralmente se apresentam recobertas por sedimentos cenozóicos. Esta formação é representada por solos argilo-arenosos do tipo latossolo vermelho-amarelo e do tipo glei húmicos (Nishiyama, 1998).

Ainda segundo Nishiyama (1998), como resultado das condições geológicas e climáticas (clima tropical de altitude), os processos de intemperismo atuam até grandes profundidades, originando um perfil de solo bastante espesso e com suas características peculiares. Os solos apresentam comportamento laterítico, com elevado volume de vazios, baixa massa específica aparente e elevada permeabilidade, em consequência da estrutura macroporosa e microporosa.

De acordo com mapas e investigações geotécnicas realizadas na região, verifica-se que o solo da região é representado por dois perfis predominantes, característicos das formações geológicas citadas. As regiões Norte e Leste são constituídas basicamente por uma argila arenosa, resultante da Formação Serra Geral, homogênea, espessa, sem presença de matacões, com substrato rochoso situado a grandes profundidades, sem verificação do lençol freático. Por outro lado, o perfil típico do solo das regiões Sudeste e Sul é caracterizado por uma areia argilosa resultante da Formação Marília, de variação progressiva, também sem presença de matacões e com substrato rochoso situado a grandes profundidades, e com nível de água situado aos 15 metros de profundidade aproximadamente.

Os dados das sondagens SPT (*Standard Penetration Test*) foram fornecidos pelas empresas da região, o que auxiliou na melhoria da qualidade da definição das unidades analisadas, e na complementação das características do solo, tais como potencial de colapso.

Para obtenção das características dos solos da região foram realizadas coletas de amostras deformadas e indeformadas. A amostragem deformada dos solos foi realizada por meio da

sondagem a trado manual, cujo método de execução é normalizado no Brasil pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) Norma Brasileira (NBR) 9603:1986. Foram determinados dois pontos para amostragem na região Norte, Leste, Sudeste e Sul de Uberlândia, até a profundidade de três metros. A definição destes pontos foi baseada no mapa de materiais inconsolidados proposto por Andrade (2005), abrangendo-se, desta forma, as duas unidades de materiais inconsolidados predominantes na região de Uberlândia.

Já a amostragem indeformada foi feita também para profundidades de 1m, 2m e 3m, de forma que a cada metro retirou-se uma amostra, e somente foi realizada na região Leste. Seguindo as recomendações da NBR 9604:1986, coletou-se um cubo de aproximadamente 30cm × 30cm, o qual foi devidamente impermeabilizado com parafina e entretela, a fim de conservar as características de campo. A Figura 2 ilustra a coleta de amostras indeformadas na região Leste, com ponto de amostragem localizado no campus da Universidade Federal de Uberlândia.



Fig. 2 – Coleta de amostras indeformadas.

2.2 – Ensaios realizados

Com as amostras deformadas foram realizados os ensaios para determinação das propriedades físicas do solo conforme as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas: teor de umidade (NBR 6457:1986), massa específica dos sólidos (NBR 6508:1984), ensaio de granulometria conjunta (NBR 7181:1984), limite de liquidez (NBR 6459:1984), limite de plasticidade (NBR 7180:1984). Também foram realizados os ensaios para classificação dos solos segundo a Metodologia MCT (Mini-Compactado-Tropical).

As amostras indeformadas foram utilizadas para realização dos ensaios edométricos e avaliação do potencial colapsível do solo. O procedimento do ensaio edométrico convencional consiste em aplicar uma carga num corpo de prova e medir as deformações (recalques) provenientes desta carga durante um período de 24 horas. Após este período, dobra-se a carga e novamente se medem as deformações do corpo de prova. O resultado do ensaio é expresso num gráfico semilogarítmico onde nas abscissas, em escala logarítmica, têm-se as tensões aplicadas, e nas ordenadas as variações volumétricas, representadas pelos índices de vazios finais em cada estágio do carregamento. Na utilização do ensaio edométrico para quantificação do colapso, verificam-se as deformações axiais provocadas pela inundação dos corpos de prova sob um

determinado estado de tensão, podendo ainda ser realizado sob duas formas: ensaio edométrico simples (com inundação após a tensão de interesse) e ensaio edométrico duplo (amostras na condição natural e amostra saturada).

No caso de ensaios edométricos simples, que foi o procedimento adotado, o corpo de prova com umidade natural é carregado até a tensão de interesse e posteriormente inundado. Com a inundação da amostra, a curva de compressão confinada (curva tensão *versus* índice de vazios) pode apresentar uma descontinuidade devido ao colapso. Neste caso, é usual utilizar a proposta de Vargas (1978), onde o solo é considerado colapsível quando apresenta coeficiente de colapso (*i*) maior que 2%. O coeficiente de colapso é calculado de acordo com a Equação 1.

$$i = \frac{\Delta e}{1 + e_o} \cdot 100 \quad (1)$$

Δe - variação do índice de vazios devido à inundação;
 e_o - índice de vazios inicial.

Para a classificação MCT (mini-compactado-tropical) foram realizados os ensaios de compactação Mini Proctor, compactação Mini MCV e perda de massa sob imersão. Os ensaios foram realizados segundo as normas do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – DNER – ME (atual DNIT) 256:1994 e DNER – ME 238:1994. Para a realização do ensaio de compactação Mini Proctor, as amostras de solos previamente secas foram passadas na peneira de malha número 10 (2,0 mm) e destorroadas. Obteve-se 2,5 kg de cada amostra, que foi repartida em 5 sacolas plásticas de 500 g cada, com teores de umidade crescente. Em seguida, realizou-se a compactação do solo, para cada teor de umidade, no cilindro compactador até atingir a altura de 50 mm (± 1 mm). Após a compactação, calculou-se a massa do material e retiraram-se duas amostras do solo para determinação do teor de umidade da respectiva amostra.

Com estes dados foram obtidas as curvas da massa específica seca \times umidade de todas as amostras de solo e determinada a umidade ótima das amostras de solo, que está relacionada ao ponto de máxima massa específica seca. A Figura 3 ilustra o ensaio de compactação Mini Proctor segundo a metodologia MCT.



Fig. 3 – Ensaio de compactação Mini Proctor.

A preparação do ensaio de compactação Mini MCV foi semelhante ao ensaio de Mini Proctor. Também foram compactados cinco corpos de prova com teores de umidade crescentes. De cada porção de solo foram retirados aproximadamente 200g de solo para iniciar o processo de compactação. Durante o processo de compactação foram aplicados sucessivos golpes com intervalo crescente (2, 3, 4, 6, 8, 12, 16, 24, 32, 48, 64, 96, 128, 192, 256 golpes) e medidas as alturas dos corpos de prova correspondentes aos golpes. O processo é paralisado quando a diferença de altura do corpo de prova entre os golpes é menor do que 0,2 mm ($A_n - A_{4n}$) < 0,2 mm, quando ocorre exsudação ou quando atinge o total de 256 golpes, sendo que A_n corresponde à altura do corpo de prova após n golpes, e A_{4n} corresponde à altura do corpo de prova após quatro vezes n golpes.

O ensaio de perda de massa por imersão é realizado com os corpos de prova resultantes do ensaio Mini MCV. O corpo de prova foi extrudado em 1 cm para fora do molde de compactação e colocado na posição horizontal dentro de um tanque de imersão, com um recipiente debaixo para coletar o material desprendido. Depois de imerso durante 24 horas, retirou-se o material desprendido para secagem em estufa e determinação da massa seca de cada material. O procedimento foi repetido para os demais teores de umidade.

A partir dos ensaios de compactação Mini MCV e de perda de massa por imersão obtém-se os parâmetros c' e e' do ábaco de classificação MCT proposto por Nogami e Vilibor (1981).

Para caracterização química do solo foram realizados ensaios de adsorção de azul de metileno, seguindo o procedimento de Pejon (1992). Para isto foram utilizados 4,0 g de solo passado na peneira de abertura de 2,0 mm e solução de azul de metileno com concentração de 1,5 g/litro.

A execução do ensaio consistiu em titular gradualmente a solução de azul de metileno numa amostra de solo em suspensão (4g de solo em 10 ml de água destilada) e em constante agitação. Após três minutos de agitação, retira-se, com o auxílio de uma haste de vidro, uma gota da suspensão, que é colocada sobre o papel filtro, verificando-se se ocorre o ponto da viragem. O excesso de azul de metileno é caracterizado pelo aparecimento de uma auréola azul clara em torno do núcleo da gota.

Para as amostras AM-01 e AM-02 iniciou-se a titulação de 5 em 5ml, diminuindo-se para 1ml ao final do ensaio. No caso das amostras AM-03e AM-04 a titulação foi iniciada de 1 em 1ml. A Figura 4 ilustra o ensaio.



Fig. 4 – Ensaio de adsorção de azul de metileno.

3 – APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

3.1 – Ensaios de caracterização física

O Quadro 1 apresenta uma síntese das principais propriedades geotécnicas das amostras analisadas assim como a classificação do solo baseada no Sistema Unificado de Classificação de Solos, enquanto a Figura 5 apresenta as curvas granulométricas das amostras.

Quadro 1 – Resultados dos ensaios de caracterização.

Propriedades	AM01	AM02	AM03	AM04
Massa específica dos sólidos, ρ_s (g/cm ³)	3,213	3,413	2,667	2,902
Teor de umidade de campo, w_{campo} (%)	29,4	39,4	8,1	9,7
Limite de Liquidez, LL (%)	42	54	23	22
Índice de Plasticidade, IP (%)	15	13	10	6
Classificação do solo				
Unificada	ML	ML	SC	SC/SM
Textural	Argila silto-arenosa	Argila silto-arenosa	Areia argilosa com silte	Areia argilosa com silte

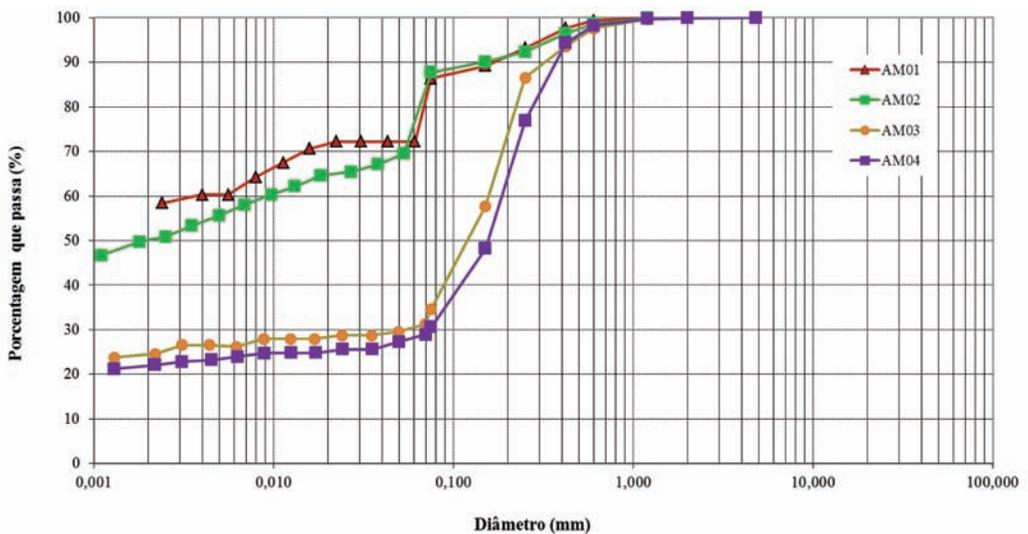


Fig. 5 – Curvas granulométricas das amostras analisadas.

Os resultados mostram a predominância de solos finos para as amostras da região Norte e Leste (AM01 e AM02), classificada texturalmente como argila siltosa com areia, e como silte de baixa plasticidade (ML), segundo a Classificação Unificada. Para as amostras da região Sudeste e Sul (AM03 e AM04), verificou-se a predominância de solos mais grossos, classificados como areia argilosa (SC) e areia argilosa com silte, relativos à classificação unificada e textural, respectivamente.

Para utilização dos critérios de previsão de colapso, as amostras da região Leste também foram caracterizadas quanto a sua estrutura, sendo realizados ensaios para determinação da umidade e massa específica natural nas amostras de solo indeformadas. A partir destes ensaios e por meio de correlações de índices físicos, determinaram-se os demais parâmetros como massa específica seca, índices de vazios, porosidade e grau de saturação. Tais parâmetros refletem a estrutura do solo *in situ*.

No Quadro 2 estão indicadas as condições *in situ* do solo, que foram determinadas para cada profundidade estudada. Os pontos P1, P2 e P3 se referem às profundidades de 1m, 2m e 3m, respectivamente.

Quadro 2 – Condições naturais do solo: região Leste.

	P1	P2	P3
w média (%)	25,43	31,97	41,14
ρ_d (g/cm ³)	0,960	1,187	1,124
ρ_s (g/cm ³)	3,814	3,814	3,814
e	2,97	2,213	1,68
n (%)	75	69	63
S (%)	33	44	46
ρ natural (g/cm ³)	1,204	1,489	1,410

3.2 – Classificação MCT

A partir dos ensaios de Mini-Compactação, Mini-MCV e de Perda de Massa sob Imersão foram obtidos os dois índices (c' e e') do ábaco de classificação MCT e o comportamento dos solos pôde ser previsto. O Quadro 3 apresenta a classificação final e comparação com as demais classificações utilizadas neste trabalho.

Quadro 3 – Resultados dos ensaios da metodologia MCT e classificação das amostras.

Amostra	Parâmetros - MCT			Classificação Unificada	Classificação Textural
	c'	e'	Classificação		
AM01	1,90	0,70	LG' Laterítico argiloso	ML	Argila siltosa com areia
AM02	2,45	0,67	LG' Laterítico argiloso	ML	Argila siltosa com areia
AM03	1,22	0,76	LA' Laterítico arenoso	SC	Argila siltosa com areia
AM04	1,24	0,83	LA' Laterítico arenoso	SC	Argila siltosa com areia

Segundo os ensaios realizados, os solos coletados nas regiões Sudeste (AM03) e Sul (AM04) foram classificados como solos lateríticos arenosos (LA'); enquanto os solos da região Norte (AM01) e Leste (AM02) resultaram em solos lateríticos argilosos (LG'). Os resultados da classificação MCT corroboram a classificação unificada correspondente.

A metodologia e classificação MCT proposta por Nogami e Vilibor (1981) foi conduzida com base nas limitações das classificações usuais e nas peculiaridades dos solos tropicais, em especial, quando empregados como bases de pavimentos, isto é, em condições compactadas. Sendo assim, os solos dentro do mesmo grupo apresentam comportamento mecânico e hidráulico com características semelhantes.

De acordo com a norma DNER – CLA 259/96, referente à classificação de solos tropicais para fins rodoviários utilizando a metodologia MCT, os solos do grupo LG' (AM01 e AM02) apresentam elevada capacidade de suporte, pouco susceptível à erosão, baixo potencial de expansão, elevado potencial de contração e baixos valores de permeabilidade.

Os solos do grupo LA' (AM03 e AM04) apresentam maior capacidade de carga do que os solos do grupo LG'. No entanto, apresentam baixo potencial de contração devido à fração arenosa presente.

Apesar destas propriedades corresponderem a uma condição muito particular dos solos, ou seja, as condições de compactação ótimas em pequenos cilindros, esta condição se aproxima daquela obtida pelo uso da energia normal no ensaio de compactação conforme a NBR 7182:1986 da ABNT.

3.3 – Avaliação do potencial colapsível

Os resultados da caracterização física já indicam solos com elevado índice de vazios, elevada porosidade ($n > 40\%$) e solos não saturados ($S < 60\%$), indicando comportamento típico de solos lateríticos e com elevado potencial para o colapso para todas as profundidades analisadas no solo da Região Leste (AM02).

As Figuras 6 a 8 apresentam as curvas de variação do índice de vazios (e) em relação ao logaritmo das tensões efetivas (σ') para as profundidades de 1,0m, 2,0m e 3,0m, respectivamente.

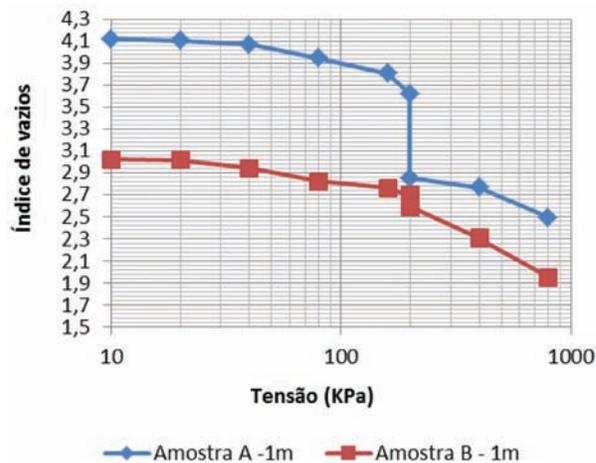


Fig. 6 – Curva de adensamento: profundidade de 1 metro.

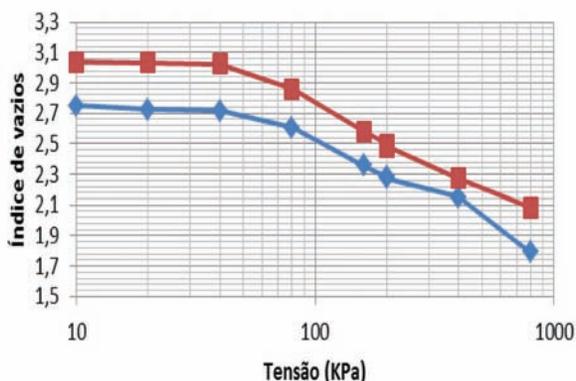


Fig. 7 – Curva de adensamento: profundidade de 2 metros.

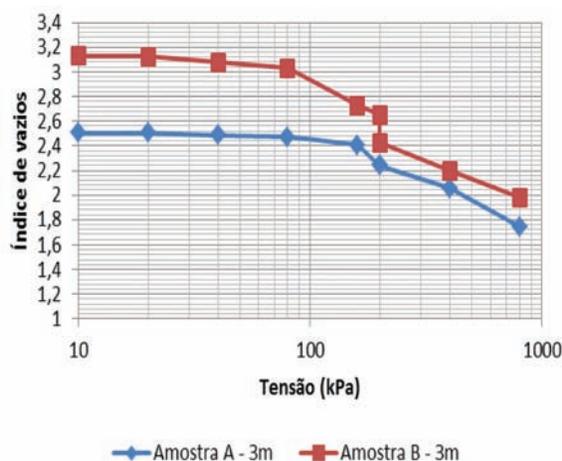


Fig. 8 – Curva de adensamento: profundidade de 3 metros.

Verificou-se que para a profundidade de 1 metro, o coeficiente de colapso médio (i) foi de 9,7%, maior do que o valor proposto por Vargas (1978) para o solo ser considerado colapsível. Com relação às amostras referentes a 2 metros de profundidade, verificou-se que o colapso ocorreu pela carga e não pela inundação. Foram verificadas deformações finais para esta amostra na ordem de 25%, mesma magnitude observada no colapso devido à inundação na profundidade de 1 metro. Para a amostra de 3 metros de profundidade, verificou-se colapso pelas duas formas, por inundação e por carregamento.

Desta forma, os ensaios edométricos mostraram que o solo da região também é colapsível para todas as profundidades analisadas. Além disto, verificou-se que o colapso ocorre pela carga e/ou pela inundação da amostra.

O potencial de colapso obtido pelos ensaios edométricos corrobora com as condições *in situ*. Pelas condições de porosidade, grau de saturação e massa específica apresentadas, era de se esperar o colapso da amostra analisada.

Apesar de não terem sido realizados ensaios de adensamento da região Norte, salienta-se que as amostras desta região pertencem à mesma formação geológica-geotécnica. Portanto, espera-se o mesmo comportamento colapsível para esta região. Tal atributo corrobora com as trincas que vêm

sendo observadas nos edifícios e casas da região, em função do umedecimento do solo, em grande parte devido à ruptura de tubulações de água.

Nas regiões Sudeste e Sul não foram realizados ensaios edométricos devido à dificuldade de amostragem nesta região. No entanto, os resultados das sondagens consultadas mostram baixos valores de SPT ($N_{SPT} < 5$ golpes) para as profundidades estudadas, indicando um potencial colapsível do solo.

4 – POTENCIAL DE UTILIZAÇÃO DO SOLO COMO CAMADA DE SOLO COMPACTADO EM BARREIRAS IMPERMEÁVEIS

Os requisitos para utilização de solos compactados em barreiras de impermeabilização de base de aterros sanitários são baixa permeabilidade, compatibilidade química em longo prazo com os poluentes, alta capacidade de retenção de poluentes, alta capacidade de suporte e baixa compressibilidade, dentre outros.

No entanto, a seleção de materiais utilizados em camadas de solos compactados (CCL) geralmente se baseia na porcentagem de argila ou de finos, no limite de liquidez e índice de plasticidade, e na condutividade hidráulica. Os requisitos de distribuição granulométrica e de limite de consistência servem de base para garantir um coeficiente de permeabilidade menor ou igual a 10^{-9} m/s. O Quadro 4 apresenta os requisitos para solos na impermeabilização de aterros de resíduos, incluindo os requisitos exigidos pela CETESB (1993).

Com base nos requisitos mínimos de granulometria e de limite de consistência, realizou-se uma avaliação física dos solos analisados para utilização como barreira de impermeabilização de aterros de resíduos. A síntese desta análise é apresentada no Quadro 5.

Quadro 4 – Requisitos mínimos para o solo de impermeabilização em aterros de resíduos.

Fonte	LL (%)	IP (%)	Finos $\phi < 0,075\text{mm}$ (%)	Fração argila $\phi < 0,002\text{mm}$ (%)	Fração areia $0,075 < \phi < 4,8\text{mm}$ (%)	Fração pedregulho $\phi > 4,8\text{mm}$ (%)
Omafra (2003)	$30 \leq LL \leq 60$	$11 \leq LL \leq 30$	≥ 50	≥ 20	≤ 45	≤ 50
EPA (1989)	–	≥ 10	≥ 20	–	–	≤ 10
CETESB (1993)	≥ 30	≥ 15	≥ 30	–	–	–

Fonte: modificado de Boscov (2008).

Quadro 5 – Potencial de utilização do solo da região para utilização como CCL.

Amostra	AM 01	AM02	AM03	AM04
Região	Norte	Leste	Sudeste	Sul
Fonte				
Omafra (2003)	Atende	Atende	Não atende	Não atende
EPA (1989)	Atende	Atende	Não atende	Não atende
CETESB (1993)	Atende	Atende	Não atende	Não atende

Os resultados mostraram que as amostras da região Norte e Leste, que são constituídas de materiais classificados como argilas silto-arenosas ou silte de baixa plasticidade (ML) pertencentes às unidades litológicas da Formação Serra Geral (material retrabalhado argiloso), atendem às especificações usualmente utilizadas, com elevado potencial para utilização em aterros sanitários.

Observa-se que estas amostras apresentam em geral uma elevada porcentagem de finos, em torno de 70% a 80%, com baixa plasticidade. Esta elevada porcentagem de finos confere a característica de baixa permeabilidade do solo, característica indispensável para a sua utilização como barreira impermeável de aterros sanitários.

Analisando-se as amostras da região Sudeste e Sul, constituídas por unidades litológicas da Formação Marília, verifica-se que todas não apresentam potencial para utilização em impermeabilização. Segundo a especificação proposta por Omafra (2003) *apud* Boscov (2008), este solo apresenta valores elevados de porcentagem de areia e valores de limites de consistência abaixo dos valores mínimos desejáveis, ou seja, são solos de granulometria grossa e pouco plásticos. Em relação às especificações do EPA (1989) *apud* Boscov (2008) e da CETESB (1993), os valores dos limites de consistência estão abaixo dos valores mínimos desejáveis, embora as amostras apresentem porcentagem de finos superior a 20%.

5 – POTENCIAL DE UTILIZAÇÃO DO SOLO COMO MATERIAL DE APOIO DE ATERROS SANITÁRIOS

5.1 – Critérios nacionais baseados em atributos físicos

Historicamente, a seleção de áreas para disposição de resíduos sólidos urbanos era baseada principalmente na proximidade da área geradora dos resíduos e na disponibilidade de cavas (de mineração), sem ênfase em critérios geológicos – geotécnicos.

No entanto, a seleção de áreas é um processo muito mais complexo. Uma das principais dificuldades enfrentadas na implantação de um aterro sanitário consiste justamente na escolha de uma área que reúna boas condições técnicas, econômicas e ambientais, a qual é feita a partir de uma criteriosa pesquisa de áreas favoráveis. O estudo destas alternativas locais é considerado um importante instrumento de planejamento ambiental, pois muitos impactos podem ser evitados ou minimizados com a escolha de local adequado para implantação do empreendimento.

Diversas propostas metodológicas têm estabelecido critérios e procedimentos buscando sistematizar e objetivar o processo de seleção de áreas para aterros de resíduos. Segundo Zuquette (1987), uma metodologia é um conjunto de conceitos, postulados técnicos, métodos, classificações, recursos tecnológicos de investigações e computacionais utilizados para desenvolver um estudo e que deve estar relacionado às condições sócio-econômicas vigentes, às características dos técnicos da região ou país e à densidade de informações existentes.

Em nível nacional, a norma técnica NBR 13 896:1997 estabelece os critérios regionais para seleção de áreas para implantação de aterros sanitários. Esta norma foi adotada pelo CETESB no processo de licenciamento de aterros sanitários.

Em geral, as principais características que um local deve ter são: minimização do impacto ambiental; maximização da aceitação pela população; área de acordo com o zoneamento da região e longa vida útil. Com relação aos critérios técnicos são analisados os atributos de topografia, dimensões, solo, distância de corpos d'água, profundidade do lençol freático, distância de residências, direção dos ventos predominantes e localização. O Quadro 6 apresenta os atributos da NBR 13.896 para seleção de áreas de implantação de aterros.

Dentre as metodologias nacionais, ressalta-se, para o presente trabalho, a metodologia de Zuquette (1993), que propôs fundamentos e um guia para elaboração de cartas geotécnicas voltadas

Quadro 6 – Atributos da NBR 13 896:1997 para seleção de áreas para disposição de aterros sanitários.

Atributos	Considerações Técnicas
Topografia	Declividade entre 1% e 30%
Geologia e tipos de solos existentes	É desejável a existência de um depósito natural extenso e homogêneo de materiais com coeficiente de permeabilidade inferior a 10^{-6} cm/s Material argiloso sem pedras, matacões Nível do lençol freático superior a 3 metros
Recursos hídricos	Distância mínima de 200 metros a qualquer curso d'água
Distâncias mínimas de núcleos populacionais	Recomenda-se que seja superior a 500 metros
Áreas sujeitas às inundações	O aterro não deve se localizar em áreas sujeitas à inundações, em períodos de recorrência de 100 anos

Fonte: modificado de ABNT NBR 13 896:1997.

a locais deficientes em estudos e mapeamentos em escalas apropriadas (1:100 000 a 1:25 000) para o planejamento urbano e regional. O método desenvolvido pelo autor é baseado em critérios, atributos e parâmetros técnicos para seleção de áreas para implantação de aterro sanitário.

O objetivo do método é possibilitar a classificação das áreas (em favorável, moderada, severa e restrita) em função das características exclusivas do meio físico destas, sob o ponto de vista geotécnico, e para a finalidade em questão (disposição de resíduos). Segundo os parâmetros dos atributos analisados as áreas podem ser enquadradas em quatro categorias, quanto à potencialidade para recebimento de resíduos (Zuquette *et al.*, 1994):

- Favorável: os atributos do meio físico da área apresentam níveis adequados para disposição final;
- Moderada: alguns atributos do meio físico da área apresentam níveis não adequados para disposição final. É possível corrigi-los com baixos custos e mecanismos tecnológicos comuns;
- Severa: mais que 50 % dos atributos do meio físico não apresentam níveis adequados para disposição de resíduos. Há a necessidade de mecanismos tecnológicos especiais para correção;
- Restrita: os atributos do meio físico da área não apresentam níveis adequados para disposição de resíduos. São necessários mecanismos tecnológicos muito especiais e altos custos para correção das limitações. A ocupação pode produzir impactos ambientais intensos.

Observa-se que o método desenvolvido por Zuquette (1993) apresenta de forma detalhada os critérios, atributos e parâmetros considerados na análise, o que talvez facilite sua aplicação e reprodutibilidade. Como exemplos de aplicação do método, citam-se os trabalhos de Brescansin (1997), no município de Corumbataí, Basílio (2001), em Campinas, e Kataoka (2000).

Dentre os objetivos do presente trabalho está a avaliação do potencial de utilização dos solos estudados como apoio para implantação de aterros. Sendo assim, foram utilizados os critérios geotécnicos propostos por Zuquette (1993), apresentados no Quadro 7.

Quadro 7 – Atributos e classes para a seleção de áreas para disposição de resíduos em aterros sanitários, segundo Zuquette (1993).

Componentes	Atributos	Aterro Sanitário			
		Favorável	Moderada	Severa	Restrita
Substrato Rochoso	Profundidade	> 15	5 -10	< 5	< 3
Material Inconsolidado	Textura	Média	Média	Arenosa	Muito arenosa
	Variação do perfil	Progressiva	Progressiva	Homogêneo	Homogêneo
	Mineralogia	Minerais tipo 2:1	Minerais tipo 1:1	Razoável % de minerais inertes	Minerais inertes (alta %)
	Presença de matacões	Raros e pequenos	Pequenos e poucos	Muitos	Muitos e grandes
	pH	> 4	>4	> 5	< 4
	CTC (meq/100g)	> 15	5-15	< 5	< 2
	Colapsibilidade /expansibilidade	Não ocorre	Camada superficial (1m)	Camada superficial (2m)	Camada espessa (4m)
Potencial de erodibilidade	Baixa	Baixa	Alta	Muito alta	
Águas	Profundidade do NA	> 10 m	> 5 m	< 4 m	< 2 m
	Infiltração (k cm/s)	10 ⁻⁴	10 ⁻³ - 10 ⁻⁴	> 10 ⁻³	Muito alta

5.2 – Análise do solo da região baseada na norma brasileira NBR 13 896:1997

O potencial de utilização do estrato superior do solo da região conforme a norma brasileira NBR 13 896:1997 é apresentado no Quadro 8.

Embora vários atributos sejam atendidos em todas as amostras, a textura consistiu no atributo diferencial. Pelo quadro, verificou-se que as amostras AM01 e AM02 (região Norte e Leste) são constituídas por materiais argilosos, com potencial favorável para implantação de aterros. Por outro lado, os solos da região Sudeste e Sul não apresentam potencial favorável para implantação de aterros devido à predominância de solos arenosos.

Quadro 8 – Potencial do perfil analisado por região.

Atributos	Considerações Técnicas	AM01 (Região Norte)	AM02 (Região Leste)	AM03 (Região Sudeste)	AM04 (Região Sul)
Textura	Material argiloso, com permeabilidade inferior a 10 ⁻⁶ cm/s	Atende	Atende	Não atende	Não atende
Variação do perfil	Homogêneo	Atende	Atende	Atende	Atende
Presença de matacões	Sem matacões	Atende	Atende	Atende	Atende
Profundidade do nível d'água	> 3m	Atende	Atende	Atende	Atende

5.3 – Metodologia de Zuquette (1993)

A partir dos resultados dos ensaios de laboratório e das investigações geotécnicas pôde-se realizar a pontuação dos substratos analisados e obter o potencial da área como base de aterro. Com relação às propriedades de infiltração (permeabilidade) e potencial de erosão, estas foram baseadas nos resultados da Metodologia MCT. A pontuação e classificação final são apresentadas nos Quadros 9 e 10.

Quadro 9 – Classificação do perfil analisado por regiões: norte (AM01) e leste (AM02).

Componentes	Atributos	Aterro Sanitário	
		Pontuação	Classificação
Substrato Rochoso	Profundidade	> 15 m	Favorável
Material Inconsolidado	Textura	Média	Favorável
	Variação do perfil	Homogêneo	Severa
	Mineralogia	1:1	Moderada
	Presença de matacões	Raros e pequenos	Favorável
	CTC (meq/100g)	5-15	Moderada
	Colapsibilidade /expansibilidade	Camada superficial / espessa	Severa/ Restrita
	Potencial de erodibilidade	Baixa	Favorável
Águas	Profundidade do NA	> 10 m	Favorável
	Infiltração (k cm/s)	Baixa a média	Favorável

Analisando-se o Quadro 9, verificou-se que os solos da região Norte e Leste apresentam muitos atributos considerados como favoráveis. Dentre eles, citam-se profundidade do substrato rochoso, textura, presença de matacões, capacidade de troca catiônica (CTC), potencial de erodibilidade, profundidade do nível d'água e infiltração. A classificação crítica foi verificada no atributo de colapsibilidade, sendo obtidas as classificações de severa a crítica. No entanto, no geral, o estrato superior do solo da região Norte e Leste pode ser considerado favorável como material de apoio de aterros sanitários, com atenção especial para o potencial colapsível deste solo.

Por outro lado, os solos da região Sudeste e Sul (Quadro 9) podem ser considerados como classificação severa para a implantação de aterros. Os únicos atributos considerados como favoráveis são relativos à profundidade, presença de matacões e profundidade do NA.

Comparando as metodologias aqui analisadas, verifica-se que os critérios estabelecidos pela norma brasileira são menos restritivos do que a metodologia proposta por Zuquette (1993), principalmente em relação à profundidade do lençol freático e as características geotécnicas, isto é, em relação aos atributos do meio físico. No entanto, ambas as metodologias / critérios corroboram no resultado final para seleção de áreas de implantação de aterros de resíduos.

Quadro 10 – Classificação do perfil analisado por regiões: sudeste (AM03) e sul (AM04).

Componentes	Atributos	Aterro Sanitário	
		Pontuação	Classificação
Substrato Rochoso	Profundidade	> 15 m	Favorável
Material Inconsolidado	Textura	Arenosa	Severa
	Varição do perfil	Homogêneo	Severa
	Mineralogia	Razoável % de minerais inertes	Severa
	Presença de matacões	Raros e pequenos	Favorável
	CTC (meq/100g)	< 5	Severa
	Colapsibilidade /expansibilidade	–	–
	Potencial de erodibilidade	Alta	Severa
Águas	Profundidade do NA	> 10 m	Favorável
	Infiltração (k cm/s)	Elevada	Severa

6 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente trabalho foram avaliadas as características físicas do estrato superior do solo da região de Uberlândia para utilização como barreiras impermeabilizantes e como material de apoio de aterros de disposição de resíduos.

Com base nos resultados dos ensaios, verificou-se que as amostras AM01 e AM02, situadas na região Norte e Leste respectivamente, apresentam predominância de solos finos, sendo, em geral, classificadas como argilas silto-arenosas, ou ainda como argilas lateríticas (LG'). As amostras AM03 e AM04, respectivas às regiões Sudeste Sul, apresentam predominância de solos grossos, sendo classificadas em areias argilosas ou solo arenoso laterítico (LA').

Desta forma, verificou-se que, em geral, as amostras relativas aos perfis de solo da Região Norte e Leste de Uberlândia atendem às especificações exigidas para projetos de aterros de disposição de resíduos no que diz respeito às características físicas do solo. Sendo assim, estas amostras apresentam um elevado potencial para utilização em barreiras impermeabilizantes de aterros sanitários e também como material de apoio. Por outro lado, as amostras relativas aos perfis de solos da Região Sudeste e Sul de Uberlândia (AM03 e AM04) não apresentam potencial para utilização em impermeabilização devido a grande quantidade de material arenoso e material pouco plástico. Maiores cuidados devem ser tomados nesta região para a implantação de aterros uma vez que os solos não são adequados como material de apoio.

Apesar da metodologia adotada não ser conclusiva sobre a avaliação da permeabilidade destes solos quando compactados, esta avaliação permitiu uma análise preliminar do seu potencial de utilização como barreiras impermeáveis de aterro sanitário. A partir deste estudo, novos trabalhos podem ser conduzidos para melhoria das propriedades geotécnicas do solo (no caso dos solos arenosos da Região Sudeste e Sul) e da otimização das melhores condições de compactação (no caso dos solos argilosos da Região Norte e Leste).

Ressalta-se também que embora este estudo seja voltado para a implantação de aterros, os resultados também podem servir como avaliação preliminar para outras obras de engenharia que envolvam contaminação ambiental, tais como lagoas de efluentes e implantação de postos de gasolina.

7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andrade, R.F. (2005). *Mapeamento geotécnico preliminar em escala de semi-detalle (1:25. 000) da área de expansão urbana de Uberlândia – MG*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, 2005. 114 p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT NBR 6457 (1986). *Amostra de solo- Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização*.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT NBR 6459 (1984). *Solo – Determinação do limite de liquidez*.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT NBR 6457 (1984). *Solo – Determinação do teor de umidade*.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT NBR 6508 (1984). *Solo – Determinação da massa específica dos sólidos*.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT NBR 7180 (1984). *Solo – Determinação do limite de plasticidade*.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT NBR 7181 (1984). *Solo – Análise granulométrica*.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT NBR 7182 (1986). *Solo – Ensaio de Compactação*.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT NBR 9603:1986. *Sondagem a trado*.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT NBR 9604:1986. *Abertura de poço e trincheira de inspeção em solo, com retirada de amostras deformadas e indeformadas*.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT NBR 13 896:1997. *Aterros de resíduos não perigosos - Critérios para projeto, implantação e operação*.
- Basílio, J.A. (2001). *Procedimentos para seleção de áreas para aterros sanitários a partir de cartas geotécnicas: aplicação na folha de Campinas*. Dissertação (Mestrado em Geociências), Instituto de Geociências e Exatas, Universidade Estadual Paulista. Rio Claro, 133p.
- Boscov, M.E.G. (2008). *Geotecnia Ambiental*. Editora Oficina de Textos, São Paulo, 248 p.
- Brescansin, R.B. (1997). *Implantação de aterro sanitário e coleta seletiva de lixo no município de Corumbataí (SP)*. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente), IGCE, UNESP, Rio Claro.
- CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (1993). *Resíduos sólidos industriais*. 2ª ed, São Paulo, SP.
- Departamento Nacional de Estrada e Rodagem – DNER – CLA 259 (1996). *Classificação dos solos tropicais segundo a metodologia MCT*.

- Departamento Nacional de Estrada e Rodagem – DNER – ME 256 (1994). *Solos compactados com equipamento miniatura – Perda de massa por imersão.*
- Departamento Nacional de Estrada e Rodagem – DNER – ME 258 (1994). *Solos compactados com equipamento miniatura – Mini MCV.*
- Kataoka, S.M. (2000). *Avaliação de áreas para disposição de resíduos: proposta de planilha para gerenciamento ambiental aplicado a aterro sanitário industrial.* Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos, SP.
- Nishiyama, L. (1989). *Geologia do município de Uberlândia e áreas adjacentes.* Sociedade & Natureza, Uberlândia, v. 01, n. 01. pp. 9-15, 1989.
- Nishiyama, L. (1998). *Procedimentos de mapeamento geotécnico como base para análises e avaliações ambientais do meio físico, em escala 1:100 000, aplicados ao município de Uberlândia-MG.* São Carlos-SP. Tese de Doutorado, USP de São Carlos.
- Nogami, J.; Vilibor, D.F. (1981). *Uma nova classificação de solos para finalidades rodoviárias.* Simpósio Brasileiro de Solos Tropicais em Engenharia, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.
- Pejon, O.J. (1992). *Mapeamento geotécnico regional da folha de Piracicaba-SP (escala 1:100 000): Estudo de aspectos metodológicos, de caracterização e de apresentação de atributos.* Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. 2 v., 224 p.
- Vargas, M. (1978). *Introdução à Mecânica dos Solos.* São Paulo/SP. Makron Books do Brasil Editora Ltda./São Paulo. 509p.
- Zuquette, L.V. (1987). *Análise da cartografia geotécnica e proposta metodológica para condições brasileiras.* Tese (Doutorado em Geotecnia) Departamento de Geotecnia. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 3 v., 657 p.
- Zuquette, L.V. (1993). *Importância do mapeamento geotécnico no uso e ocupação do meio físico: fundamentos e guia para elaboração.* Tese (Livre-docência), EESC, USP, São Carlos.
- Zuquette, L.V.; Pejon, O.J.; Sineli, O. (1994). *Methodology for specific engineering geological mapping for selection of sites for waste disposal.* International IAEG Congress, 7, Rotterdam. Anais. Balkema, Rotterdam. pp. 2481–2489.