

BARREIRAS VERTICAIS DE CONTENÇÃO DE CONTAMINANTES EM ÁGUAS SUBTERRÂNEAS: ANÁLISE HIERÁRQUICA

Slurry walls for control of contaminants in groundwater:
Analytic Hierarchy Process

José Henrique Ferronato Pretto*

Priscila Batista**

Adilson do Lago Leite***

Alessander Christopher Morales Kormann****

Marcelo Henrique Farias de Medeiros*****

Roberta Bomfim Boszczowski*****

RESUMO – A remediação de contaminações em águas subterrâneas e no solo tem sido alvo de estudos devido ao alto impacto e custo de recuperação. Um dos métodos utilizados para a contenção de plumas contaminantes é a cortina vertical. O presente trabalho tem por objetivo escolher a partir de dados de propriedades índice, hidráulicas, físico-químicas e mecânicas, o melhor material, entre quatro alternativas, a ser utilizado nas cortinas verticais com a função de contenção de plumas contaminantes. Os quatro tipos de materiais analisados foram um solo natural (SN), um solo natural com bentonita (SB), um solo natural com bentonita e cimento (SBC) e bentonita pura (B). O Método de Análise Hierárquica (AHP) foi utilizado como ferramenta de tomada de decisão para escolha da melhor solução de contenção, sendo utilizados dois critérios (caracterização e permeabilidade) e três subcritérios para a caracterização (caracterização geotécnica, físico química e resistência). Devido à indisponibilidade de dados de resistência da bentonita foram realizadas três análises, as quais indicaram o solo natural (SN) como sendo a melhor alternativa devido à influência relativa da permeabilidade.

SYNOPSIS – The remediation of contaminants in ground water and soil has been investigated due to the high impact and cost of recovery. One of the methods used to contain contaminant plumes is slurry walls. The aim of this work is to choose using geotechnical, hydraulic, physicochemical and mechanical data, the best material among four alternatives to be used in slurry walls as contamination plume barriers. The four types of materials tested were a natural soil (SN), a natural soil with bentonite (SB), a natural soil with bentonite and cement (SBC) and bentonite (B). The Analytic Hierarchy Process was applied as a decision making tool using two criteria (characterization and

* Mestre em Engenharia de Construção Civil (Área de Geotecnia) pela Universidade Federal do Paraná (UFPR), Professor da UFPR – Curitiba (PR), Brasil. Email: jose.fpretto@gmail.com

** Mestre em Engenharia de Construção Civil (Área de Geotecnia) pela Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), Ouro Preto (MG), Brasil. Email: priscilacivil@yahoo.com.br

*** Doutor em Geotecnia pela Universidade de São Paulo (USP), Professor Doutor da UFOP – Ouro Preto (MG), Brasil. Email: alleite@em.ufop.br

**** Doutor em Engenharia Civil (Área de Geotecnia) pela Universidade de São Paulo (USP), Professor Doutor da UFPR – Curitiba (PR), Brasil. Email: alessander@ufpr.br

***** Doutor em Engenharia Civil (Área de Materiais) pela Universidade de São Paulo (USP), Professor Doutor da UFPR – Curitiba (PR), Brasil. Email: medeiros.ufpr@gmail.com

***** Doutora em Engenharia Civil (Área de Geotecnia) pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio), Professora Doutora da UFPR – Curitiba (PR), Brasil.
Email: roberta.bomfim@ufpr.br

permeability) and three subcriteria for characterization (geotechnical characterization, physicochemical and resistance). Due to the unavailability of resistance data for bentonite three analyses were performed, which indicated the natural soil (SN) as the best alternative because of the relative influence of the permeability.

PALAVRAS CHAVE – Análise hierárquica, barreiras verticais, plumas contaminantes.

1 – INTRODUÇÃO

O uso de barreiras de contenção visando o controle de contaminantes em águas subterrâneas vem sendo muito discutido principalmente nos Estados Unidos da América e na Europa (Batista, 2006). Em 1998, a *Environmental Protection Agency* classificou algumas dessas barreiras e entre elas está a focada neste trabalho: as barreiras verticais “slurry walls”. No Brasil é crescente o uso deste tipo de solução com o propósito de conter o avanço de plumas contaminantes em direção à água subterrânea. Trata-se de escavações em forma de trincheira, preenchidas inicialmente com lama bentonítica ou material de baixa permeabilidade e posteriormente feito um reaterro com material selecionado, a fim de conter, divergir ou encapsular o fluxo de contaminantes, conforme mostrado na Fig. 1.

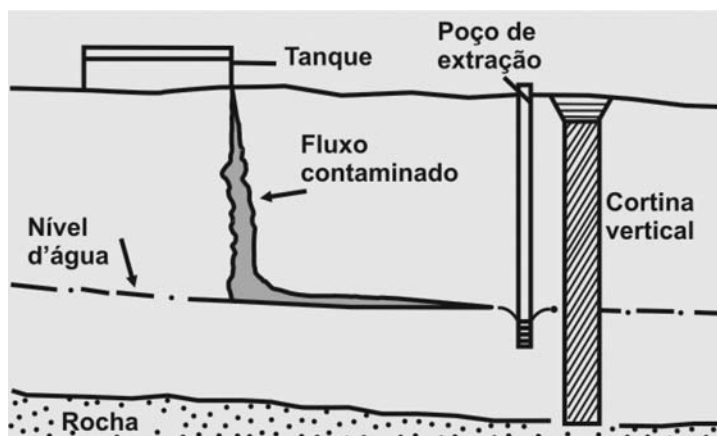


Fig. 1 – Esquema de cortina vertical para contenção de vazamentos (Sharma e Lewis, 1994).

O termo contaminação, utilizado tanto para solos quanto para águas subterrâneas, refere-se a acontecimentos resultantes da intervenção do homem no meio. As contaminações podem ocorrer nos diferentes componentes ambientais como: litosfera (solo e rocha), hidrosfera (rios, lagos, oceanos e águas subterrâneas) e atmosfera.

O estudo constante para obtenção de melhorias e otimização dos materiais tem auxiliado a minimizar danos ambientais e a se buscar correções de possíveis contaminações. Exemplo disto é o trabalho de Opdyke e Evans (2005), onde foram analisadas vinte misturas, definindo em laboratório sua permeabilidade e resistência a compressão simples, visando a utilização em cortinas verticais (*slurry walls*). O foco do trabalho aqui descrito será analisar o material com melhor desempenho para cortinas verticais de contenção de plumas contaminantes em locais com contaminações prévias. Rodríguez-Cruz *et al.* (2007) estudaram a mitigação do avanço de diferentes tipos de pesticidas no solo com a utilização de colunas verticais de diferentes argilas. Este tipo de intervenção, conhecida como remediação, é realizado com foco principal na contenção

da contaminação para posterior retirada do contaminante do solo. Carey *et al.* (1997) citam três principais objetivos das ações de remediação: a prevenção de migração da contaminação através das águas subterrâneas, infiltração de água na área contaminada e a prevenção de possíveis contatos com o material contaminado.

2 – MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 – Método de Análise Hierárquica (AHP)

Na engenharia civil, o potencial do Método de Análise Hierárquica (AHP – “Analytic Hierarchy Process”) tem sido pouco explorado, porém podem citar-se exemplos de estudos que usaram esta ferramenta como instrumento de decisão, tais como: Marchezetti *et al.* (2011), no tratamento de resíduos domiciliares; Silva e Souza (2011), na seleção de caminhões coletores-compactadores de resíduos sólidos; Lisboa e Waisman (2006) e Zayed *et al.* (2008) nas decisões relacionadas a área de projeto de rodovias; Pan (2008), na seleção de métodos de construção de pontes; Lai *et al.* (2008), no projeto de obras públicas; Pereira *et al.* (2012), para a escolha de percentuais de substituição de resíduos de construção como agregados na dosagem de concretos; Mattana *et al.* (2012), na escolha de argamassas de revestimento com agregado natural ou com agregado de britagem de rocha; Perelles *et al.* (2013) na escolha da melhor opção entre sistemas de reforço com fibras; Grunberg *et al.* (2014) na escolha entre sistemas de certificação verde para edificações.

O AHP é uma técnica multicriterial ou multiobjetivo desenvolvida pelo matemático norte americano Thomas L. Saaty, e baseia-se no método newtoniano e cartesiano, que busca tratar a complexidade com a decomposição e divisão do problema em fatores claros e dimensionáveis, estabelecendo relações entre estes para depois sintetizar as informações (Marins *et al.*, 2009).

A propagação e a capacidade do AHP se devem principalmente ao conjunto de características como a simplicidade na aplicação, a naturalidade no trato de aspectos subjetivos e a flexibilidade do uso (Lisboa e Waisman, 2006). A grande vantagem do método é alternar etapas de cálculo com etapas de diálogo, ou seja, pressupõe uma influência contínua e direta do decisor ou de outros atores na construção da solução e não somente na definição do problema (Lozano, 2006). Quando vários objetivos são importantes para o decisor, pode ser difícil escolher entre as alternativas. Neste caso, o AHP é uma ferramenta que pode resolver problemas complicados em que os objetivos têm interações e correlações (Gomes, 2009).

O AHP objetiva a seleção ou escolha de alternativas baseando-se em três princípios: a construção de hierarquias, a definição de prioridades e a consistência lógica do modelo gerado. Os parâmetros utilizados e seus respectivos pesos são avaliados qualitativa e quantitativamente de maneira individual dentro da análise hierárquica. Na Fig.2 pode ser observado o macrofluxo de uma análise hierárquica conforme proposto por Costa (2002).

As três primeiras etapas desse macrofluxo foram retiradas do trabalho de Batista (2006), onde são descritos todos os processos de ensaio e características das alternativas de escolha (solo natural - SN, solo natural com mistura de bentonita - SB, solo natural com mistura de bentonita e cimento - SBC e 100% bentonita - B). A partir do processamento das informações são iniciadas as análises visando à escolha do melhor material ou mistura a utilizar.

A análise hierárquica basicamente é construída conforme a Fig. 3, onde existe uma decisão a ser tomada e abaixo dela critérios e alternativas.

Para o estudo realizado com os dados de Batista (2006), utilizou-se a estrutura do AHP conforme a Fig. 4, que apresenta como critérios principais as propriedades índice, a resistência mecânica, as características físico-químicas e a permeabilidade dos materiais considerados como alternativas de composição da cortina vertical.

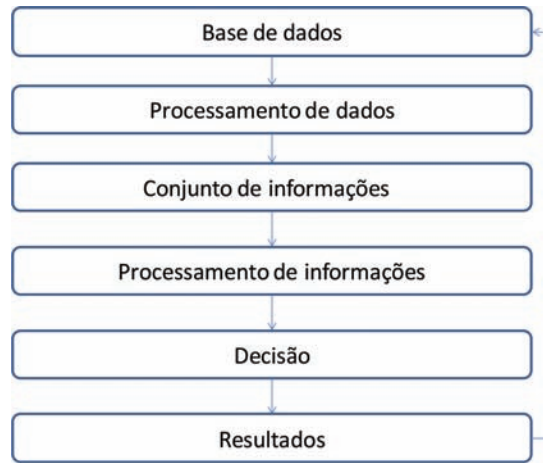


Fig. 2 – Macrofluxo do processo decisório (adaptado de Costa, 2002).

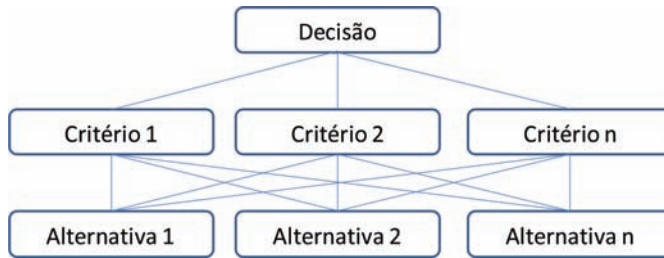


Fig. 3 – Hierarquia para tomada de decisão.

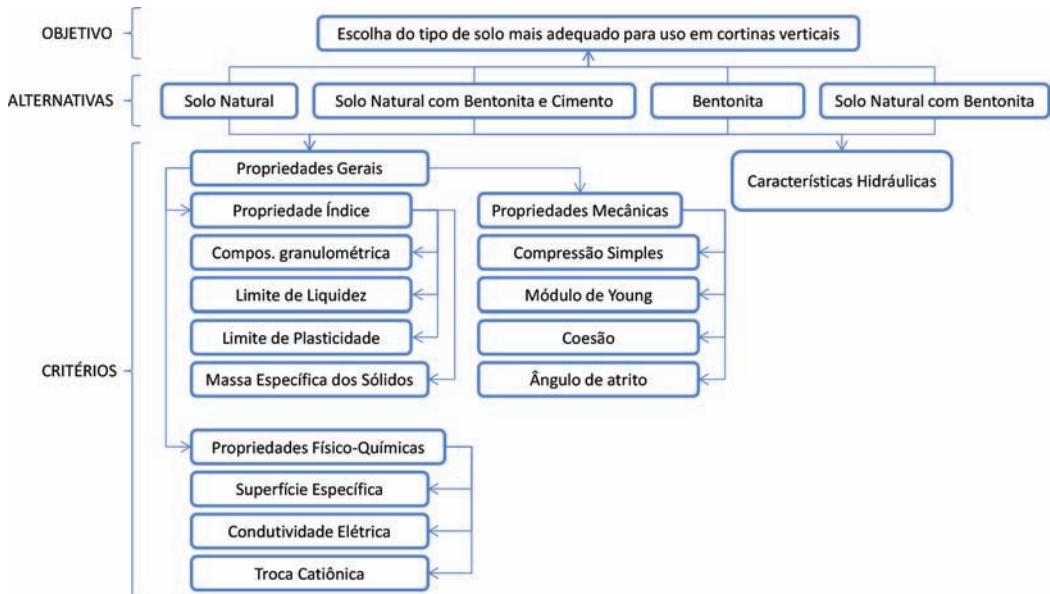


Fig. 4 – Fluxograma do AHP adotado.

2.2 – Opções de escolha

Para amostras com misturas utilizaram-se proporções a partir do peso seco. As opções de mistura entre solo e bentonita foram baseadas em valores citados na literatura, como os trabalhos de D'Appolonia e Ryan (1979), Sharma e Lewis (1994), Shackelford e Jefferis (2000) e Ryan e Day (2002). No caso da mistura entre solo e cimento, não foram encontrados registros na literatura, sendo assim arbitrada por Batista (2006) a proporção de 3%.

2.2.1 – Solo natural (SN)

É um solo laterítico residual de gnaiss. Normalmente, esse tipo de solo resulta de um processo de intemperização; em campo, normalmente solos lateríticos apresentam-se com alta porosidade e drenabilidade.

2.2.2 – Solo natural com bentonita e cimento (SBC)

Foi realizada uma mistura de 94% do solo natural, 3% de bentonita e 3% de cimento. O cimento utilizado nas amostras foi o Portland de alto forno CP III 40 RS.

2.2.3 – Solo natural com bentonita (SB)

Foi realizada a mistura com 97% do solo natural e 3% de bentonita.

2.2.4 – Bentonita 100% Kataz (B)

A bentonita é um material que tem como principal característica seu potencial de expansibilidade e comportamento tixotrópico. Trata-se de uma bentonita da marca Kataz, proveniente de uma jazida no município de Boa Vista, Paraíba. A mesma bentonita foi utilizada por Farnezi (2006).

2.3 – Definições de critérios e subcritérios

Os critérios e subcritérios utilizados para o AHP partiram de ensaios laboratoriais, visando a caracterização das alternativas segundo suas características gerais, mineralógicas e físico-químicas.

2.3.1 – Análise granulométrica

A análise granulométrica consiste na determinação do tamanho das partículas presentes em um solo, expressa como porcentagem do peso total. Em geral, utiliza-se o ensaio de peneiramento e o ensaio de sedimentação. Batista (2006) utilizou a NBR 7181 (ABNT, 1984d), a qual continua em vigor, para realização da análise granulométrica.

2.3.2 – Limite de plasticidade (LP) e limite de liquidez (LL)

O teor de umidade associado à transição do estado semisólido para o estado plástico consiste no limite de plasticidade, e do estado plástico para o líquido o limite de liquidez. Os valores de LL e LP foram determinados respectivamente pelas normas NBR 6459 (ABNT, 1984a) e NBR 7180 (ABNT, 1984c), conforme citado por Batista (2006), as quais continuam em vigor.

2.3.3 – *Massa específica dos sólidos (γ)*

A massa específica dos sólidos de um solo tem seu valor relacionado com os minerais que o constituem e com a porcentagem relativa da presença dos mesmos. Para a preparação das amostras e a realização do ensaio, Batista (2006) seguiu a NBR 6508 (ABNT, 1984b).

2.3.4 – *Capacidade de troca catiônica (CTC)*

Conforme descrito por Batista (2006), a capacidade de um solo trocar cátions está relacionada diretamente com a carga negativa de suas partículas. No ensaio de adsorção de azul de metileno, o cátion azul de metileno substitui os cátions Na^+ , Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} , e H_3O^+ adsorvidos aos argilo-minerais, ocorrendo um processo de troca irreversível, caracterizando-se como uma forma de medida da capacidade de troca catiônica (CTC). Assim, os solos com maior CTC são mais reativos, o que se reflete no comportamento geotécnico através de uma maior plasticidade e expansibilidade. Ou seja, esses materiais em contato com a água tendem a exibir um aumento de volume mais acentuado. Nas misturas caracterizadas como SB e SBC não houve grandes variações quando comparadas ao SN, já em B o aumento foi considerável.

Utiliza-se o mesmo ensaio de adsorção de azul de metileno, descrito por Pejon (1992), no entanto para se conhecer a capacidade de troca catiônica utiliza-se a equação 1.

$$CTC = \frac{V.C.100}{M} \quad (1)$$

CTC – capacidade de troca catiônica (cmol/kg);

$C = 0,0047 \text{ N}$;

M – massa de solo seco (g);

V – volume de solução de azul de metileno (cm^3).

2.3.5 – *Superfície específica (SE)*

A superfície específica de um solo equivale à soma da área exposta de todas as partículas contidas em uma unidade de volume ou de peso. Quanto maior a partícula mineral, menor a superfície específica do solo. Superfícies específicas da fração fina do solo possuem relação direta com a retenção de contaminantes e com a reatividade do solo, isto porque partículas com maior área de exposição desenvolvem mais cargas de superfície. O ensaio de adsorção de azul de metileno é realizado conforme procedimento preconizado por Pejon (1992), e a partir deste encontra-se a superfície específica conforme a equação 2.

$$SE = \frac{3,67.V}{M} \quad (2)$$

SE – superfície específica (m^2/g);

V – volume de solução de azul de metileno (cm^3);

M – massa de solo seco (g).

2.3.6 – *Condutividade elétrica do extrato aquoso (CE)*

Este ensaio objetiva estimar a salinidade utilizando uma proporção água:solo de 1:1, conforme indicado por Camargo *et al.* (1986). Sabe-se que esta condutividade elétrica varia diretamente com a quantidade de sais dissolvidos na água contida nos poros do solo. Poderá ser observado que a

bentonita tem valores até 80 vezes maiores que o solo natural, isso devido à mesma ter sofrido tratamento com cloreto de sódio, conforme informações repassadas pelos fornecedores.

2.3.7 – Condutividade hidráulica (*k*)

O ensaio de permeabilidade realizado para a determinação deste parâmetro geotécnico foi o de carga variável, segundo a NBR 14545 (ABNT, 2000). As grandezas de permeabilidade dos solos devem-se à existência de espaços vazios interconectados, através dos quais a água consegue fluir de pontos de alta energia para pontos de baixa energia.

2.3.8 – Resistência a compressão simples

O ensaio de compressão simples consiste na ruptura de uma amostra por compressão axial, sem confinamento lateral. A resistência do solo à compressão simples é dada pela razão entre a carga máxima aplicada e a área do corpo de prova. Os ensaios seguem procedimento conforme IE 004 (DNER, 1994).

2.3.9 – Módulo de Young (*E*)

O módulo de Young foi calculado com base no gráfico de tensão *versus* deformação a partir da equação 3.

$$E = \sigma/\varepsilon \quad (3)$$

E - módulo de Young ou módulo de elasticidade (Pa);

σ - tensão aplicada (Pa);

ε - deformação do corpo (adimensional).

Este parâmetro indica a rigidez do solo e, portanto, será possível observar um aumento no módulo de Young (módulo de elasticidade) nos casos onde foram utilizadas as misturas com cimento.

2.3.10 – Coesão (*c*)

A coesão dos materiais foi obtida por Batista (2006) a partir de ensaios de cisalhamento direto, onde se observou o intercepto no eixo das ordenadas de retas ajustadas em diagramas tensão cisalhante *versus* deslocamento.

2.3.11 – Ângulo de atrito (ϕ)

O ângulo de atrito também foi obtido nos ensaios de cisalhamento direto descritos por Batista (2006).

3 – RESULTADOS

3.1 – Banco de dados

Conforme descrito previamente, os dados utilizados nas análises hierárquicas seguiram os resultados de ensaios realizados por Batista (2006). No Quadro 1 observam-se estes valores, com exceção dos valores do critério resistência da bentonita, os quais não foram informados devido às dificuldades de execução dos ensaios em material na consistência de lama.

A falta desses dados dificultou a consideração da bentonita como alternativa, deixando dúvidas sobre a melhor conduta a ser tomada. Por este motivo, decidiu-se realizar mais de uma análise hierárquica, buscando-se uma melhor visualização da alternativa a ser considerada como mais adequada. As análises foram as seguintes:

- **Análise Hierárquica 1** – Alternativas com SN, SB e SBC, utilizando o parâmetro de resistência;
- **Análise Hierárquica 2** – Alternativas com SN, SB, SBC e B, sem a utilização do parâmetro de resistência;
- **Análise Hierárquica 3** – Alternativas com SN, SB, SBC e B, utilizando o parâmetro de resistência da bentonita igual a 0.

Quadro 1 – Resultados dos ensaios de laboratório.

Propriedades	Solo Natural (SN)	Solo Natural com Bentonita (SB)	Solo Natural com Bentonita e Cimento (SBC)	100% Bentonita (B)
Composição Granulométrica	Argila Arenosa	Argila Arenosa	Argila Areno-Siltosa	Argila
Limite de Liquidez (%)	67,60	82,60	60,90	494,12
Limite de Plasticidade (%)	46,90	37,80	38,00	93,84
Massa Específica dos Sólidos (g/cm³)	2,68	2,68	2,69	2,70
Superfície Específica (m²/g)	28,18	37,55	35,57	414,88
Condutividade Elétrica do Extrato Aquoso (μS/cm)	29,0	365,5	1415,5	2370,0
Capacidade de Troca Catiônica (cmol/kg)	3,6	4,8	4,57	53,13
Permeabilidade (cm/s)	$5,3 \times 10^{-7}$	$7,0 \times 10^{-7}$	$3,8 \times 10^{-5}$	$9,1 \times 10^{-7}$
Resistência a Compressão Simples (kPa)	42,66	25,16	77,11	-
Módulo de Young (kPa)	2370,00	2516,00	6217,70	-
Coesão (kPa)	79,59	45,87	97,35	-
Ângulo de Atrito (°)	35,35	26,56	28,81	-

Fonte: adaptado de Batista e Leite (2010)

3.2 – Matriz de decisão

Devido ao objetivo principal ser a avaliação dos solos estudados na utilização em cortinas verticais para barreiras no caso de contaminação do solo, utilizou-se dois critérios na matriz de decisão. O primeiro critério leva em conta o desempenho do material pelas suas características geotécnicas, sua resistência mecânica e físico-química. O segundo critério, e para este caso o mais importante, leva em consideração somente a permeabilidade do solo. Considera-se este o critério de maior importância porque ele apresenta o principal papel na barreira construída, restringindo o fluxo dos contaminantes.

A escala de comparação entre os critérios atribui valores de 0,5 a 2, onde:

- 0,5 - menos importante;
- 1,0 - igual importância;
- 2,0 - mais importante.

A seguir são mostrados os valores de importância relativa para os critérios utilizados nas três análises.

Dentro de cada critério utilizado no Quadro 2, foram realizadas matrizes de decisão para a definição da caracterização e da permeabilidade devido ao uso de subcritérios. Nos Quadros 3 e 4 são mostradas as matrizes.

Quadro 2 – Matriz de decisão.

MATRIZ DE DECISÃO					
ESCALA DE IMPORTÂNCIA		Caracterização	Permeabilidade	Total da Linha (TL)	Importância Relativa (IR)
Menos importante	0,5				
Igual importância	1,0				
Mais importante	2,0				
Caracterização		1,0	0,5	1,5	0,3
Permeabilidade		2,0	1,0	3,0	0,7
Total Geral (TG)				4,5	1,0

Quadro 3 – Matriz de decisão para o critério de caracterização.

MATRIZ DE DECISÃO - ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO						
ESCALA DE IMPORTÂNCIA		Ensaio de Caracterização	Caracterização Físico-Química	Resistência	Total da Linha (TL)	Importância Relativa (IR)
Menos importante	0,5					
Igual importância	1,0					
Mais importante	2,0					
Ensaio de Caracterização		1,0	0,5	0,5	1,5	0,2
Caracterização Físico-Química		2,0	1,0	2,0	3,0	0,4
Resistência		2,0	0,5	1,0	2,5	0,4
Total Geral (TG)					7,0	1,0

Para o caso da análise 2, não foram utilizados os valores de resistência, portanto no Quadro 3 a matriz de decisão da caracterização considera apenas os ensaios de caracterização geotécnica e físico-química.

Quadro 4 – Matriz de decisão para o critério de permeabilidade.

MATRIZ DE DECISÃO - PERMEABILIDADE						
ESCALA DE IMPORTÂNCIA		Condutividade Hidráulica (cm/s)	Total da Linha (TL)	Importância Relativa (IR)		
Menos importante	0,5					
Igual importância	1,0					
Mais importante	2,0					
Condutividade Hidráulica (cm/s)		1,0	1,0	1,0		
Total Geral (TG)			1,0	1,0		

3.3 – Cálculo das variáveis

Os dados relacionados a seguir foram considerados na análise hierárquica 3 e a escala de importância utilizada nos cálculos dentro de cada critério segue a mesma grandeza das matrizes de decisão, podendo assim existir valores 0,5 a 2, como mostra as análises dos Quadros 5 a 7. Para o caso do critério de impermeabilização, por se tratar de uma única variável não se faz necessária esta etapa.

Quadro 5 – Escala de importância para o critério de caracterização geotécnica.

CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA							
ESCALA DE IMPORTÂNCIA		Análise Granulométrica	Limite de Liquidez	Limite de Plasticidade	Massa Específica dos Sólidos	Total da Linha (TL)	Importância Relativa
Menos importante	0,5						
Igual importância	1,0						
Mais importante	2,0						
Análise Granulométrica		1,0	2,0	2,0	2,0	7,0	0,4
Limite de Liquidez (%)		0,5	1,0	1,0	2,0	4,5	0,2
Limite de Plasticidade (%)		0,5	1,0	1,0	2,0	4,5	0,2
Massa Específica dos Sólidos (g/cm ³)		0,5	0,5	0,5	1,0	2,5	0,1
Total Geral (TG)						18,5	1,0

Quadro 6 – Escala de importância para o critério de caracterização físico-química.

CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA						
ESCALA DE IMPORTÂNCIA		Superfície Específica (m ² /g)	Condutividade Elétrica (μS/cm)	Troca Catiônica (cmol/kg)	Total da Linha (TL)	Importância Relativa
Menos importante	0,5					
Igual importância	1,0					
Mais importante	2,0					
Superfície Específica (m ² /g)		1,0	2,0	2,0	5,0	0,5
Condutividade Elétrica (μS/cm)		0,5	1,0	0,5	2,0	0,2
Troca Catiônica (cmol/kg)		0,5	2,0	1,0	3,5	0,3
Total Geral (TG)					10,5	1,0

Quadro 7 – Escala de importância para o critério de caracterização de resistência.

CARACTERIZAÇÃO DE RESISTÊNCIA							
ESCALA DE IMPORTÂNCIA		Resistência a Compressão Simples (kPa)	Módulo de Young (kPa)	Coesão	Ângulo de Atrito	Total da Linha (TL)	Peso da Variável (PV)
Menos importante	0,5						
Igual importância	1,0						
Mais importante	2,0						
Resistência a Compressão Simples (kPa)		1,0	2,0	2,0	2,0	7,0	0,4
Módulo de Young (kPa)		0,5	1,0	2,0	1,0	4,5	0,2
Coesão		0,5	0,5	1,0	0,5	2,5	0,1
Ângulo de Atrito		0,5	1,0	2,0	1,0	4,5	0,2
Total Geral (TG)						18,5	1,0

3.4 – Desempenho das alternativas

Para a análise dos dados, quando estes eram quantitativos, utilizaram-se sempre os valores encontrados por Batista (2006). Nos casos onde foram necessárias considerações qualitativas utilizou-se uma escala de importância dada por:

- 1,0 - inadequado
- 2,0 - suficiente
- 3,0 - bom
- 4,0 - muito bom

3.4.1 – Desempenho das alternativas quanto ao critério de caracterização

Para a análise granulométrica mostrada nos Quadros 8 e 9, foi necessária uma consideração qualitativa dos resultados por se tratar de dados conceituais do tipo do solo ou da mistura. Sob a

ótica da granulometria, a bentonita foi considerada como alternativa de desempenho “muito bom”, por se referir a um material com característica de baixa permeabilidade e alta expansibilidade. Para a alternativa SBC levou-se em consideração a existência de maior quantidade de finos, sendo possível observar siltes, estando assim com um desempenho abaixo de B mas ainda podendo ser considerado “bom”. As alternativas SN e SB definiram-se como suficientes por serem principalmente compostas de argila, no entanto com quantidade de areia relevante.

O melhor desempenho encontrado baseou-se na alternativa de B com uma vantagem relativamente alta, chegando a um desempenho de cerca de 50% superior à segunda melhor alternativa.

Quadro 8 – Desempenho das alternativas quanto ao critério de caracterização – Parte 1.

CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA										
ESCALA DE IMPORTÂNCIA		Atribuição dos valores				Normalização dos dados				Peso Variável (PV)
		Solo Natural (SN)	Solo Natural com Bentonita (SB)	Solo Natural com Bentonita e Cimento (SBC)	100% Bentonita (Bentonita Kataz)	Solo Natural (SN)	Solo Natural com Bentonita (SB)	Solo Natural com Bentonita e Cimento (SBC)	100% Bentonita (Bentonita Kataz)	
Inadequado	1,0	Solo Natural (SN)	Solo Natural com Bentonita (SB)	Solo Natural com Bentonita e Cimento (SBC)	100% Bentonita (Bentonita Kataz)	Solo Natural (SN)	Solo Natural com Bentonita (SB)	Solo Natural com Bentonita e Cimento (SBC)	100% Bentonita (Bentonita Kataz)	0,4
Suficiente	2,0									
Bom	3,0									
Muito bom	4,0									
Análise Granulométrica		2,0	2,0	3,0	4,0	0,5	0,5	0,8	1,0	0,4
Limite de Liquidez (%)		67,60	82,60	60,90	494,12	0,1	0,2	0,1	1,0	0,2
Limite de Plasticidade (%)		46,90	37,80	38,00	93,84	0,5	0,4	0,4	1,0	0,2
Massa Específica dos Sólidos (g/cm ³)		2,68	2,68	2,69	2,70	1,0	1,0	1,0	1,0	0,1
Índice de desempenho (ID)										1,0

Quadro 9 – Desempenho das alternativas quanto ao critério de caracterização – Parte 2.

CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA										
ESCALA DE IMPORTÂNCIA		Desempenho de cada alternativa								
		Solo Natural (SN)	Solo Natural com Bentonita (SB)	Solo Natural com Bentonita e Cimento (SBC)	100% Bentonita (Bentonita Kataz)					
Inadequado	1,0	Solo Natural (SN)	Solo Natural com Bentonita (SB)	Solo Natural com Bentonita e Cimento (SBC)	100% Bentonita (Bentonita Kataz)					
Suficiente	2,0									
Bom	3,0									
Muito bom	4,0									
Análise Granulométrica		18,9%	18,9%	28,4%	37,8%					
Limite de Liquidez (%)		3,3%	4,1%	3,0%	24,3%					
Limite de Plasticidade (%)		12,2%	9,8%	9,9%	24,3%					
Massa Específica dos Sólidos (g/cm ³)		13,4%	13,4%	13,5%	13,5%					
Índice de desempenho (ID)		47,8%	46,2%	54,7%	100,0%					

3.4.2 – Desempenho das alternativas quanto ao critério de caracterização físico-químico

Os dados de características físico-químicas foram diretamente relacionados com os ensaios de Batista (2006), por se tratar de dados quantitativos. Como pode ser observado, os valores obtidos atingiram os melhores resultados chegando a índices de desempenho muito superiores às demais alternativas propostas.

Quadro 10 – Desempenho das alternativas quanto ao critério físico-químico – Parte 1.

CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA										
ESCALA DE IMPORTÂNCIA		Atribuição dos valores				Normalização dos dados				Peso Variável (PV)
		Solo Natural (SN)	Solo Natural com Bentonita (SB)	Solo Natural com Bentonita e Cimento (SBC)	100% Bentonita (Bentonita Kataz)	Solo Natural (SN)	Solo Natural com Bentonita (SB)	Solo Natural com Bentonita e Cimento (SBC)	100% Bentonita (Bentonita Kataz)	
Inadequado	1,0									
Suficiente	2,0									
Bom	3,0									
Muito bom	4,0									
Superfície Específica (m ² /g)		28,18	37,55	35,57	414,88	0,1	0,1	0,1	1,0	0,5
Condutividade Elétrica (μS/cm)		29,0	365,5	1415,5	2370,0	0,0	0,2	0,6	1,0	0,2
Troca Catiônica (cmol/kg)		3,6	4,8	4,57	53,13	0,1	0,1	0,1	1,0	0,3
Índice de desempenho (ID)										1,0

Quadro 11 – Desempenho das alternativas quanto ao critério físico-químico – Parte 2.

CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA					
ESCALA DE IMPORTÂNCIA		Desempenho de cada alternativa			
		Solo Natural (SN)	Solo Natural com Bentonita (SB)	Solo Natural com Bentonita e Cimento (SBC)	100% Bentonita (Bentonita Kataz)
Inadequado	1,0				
Suficiente	2,0				
Bom	3,0				
Muito bom	4,0				
Superfície Específica (m ² /g)		3,2%	4,3%	4,1%	47,6%
Condutividade Elétrica (μS/cm)		0,2%	2,9%	11,4%	19,0%
Troca Catiônica (cmol/kg)		2,3%	3,0%	2,9%	33,3%
Índice de desempenho (ID)		6%	10%	18%	100%

3.4.3 – Desempenho das alternativas quanto ao critério de caracterização resistência

Os dados de resistência das alternativas foram analisados de maneira quantitativa, conforme o que é apresentado nos Quadros 12 e 13, utilizando-se a análise 2, valores de resistência da bentonita

nulo. Pode-se observar, no entanto, que para a mistura onde há utilização de bentonita e cimento o índice de desempenho foi muito superior aos demais, devido ao efeito de cimentação. Como a bentonita sendo misturada ao solo não traz melhoria na resistência, tem-se o menor índice de desempenho na alternativa SB.

Quadro 12 – Desempenho das alternativas quanto ao critério de resistência – Parte 1.

CARACTERIZAÇÃO DE RESISTÊNCIA										
ESCALA DE IMPORTÂNCIA		Atribuição dos valores				Normalização dos dados				Peso da Variável (PV)
		Solo Natural (SN)	Solo Natural com Bentonita (SB)	Solo Natural com Bentonita e Cimento (SBC)	100% Bentonita (Bentonita Kataz)	Solo Natural (SN)	Solo Natural com Bentonita (SB)	Solo Natural com Bentonita e Cimento (SBC)	100% Bentonita (Bentonita Kataz)	
Inadequado	1,0									
Suficiente	2,0									
Bom	3,0									
Muito bom	4,0									
Resistência a Compressão Simples (kPa)		42,6	25,16	77,11	0,0	0,6	0,3	1,0	0,0	0,4
Módulo de Young (kPa)		2370	2516	6217	0,0	0,4	0,4	1,0	0,0	0,2
Coesão		79,5	45,8	97,3	0,0	0,8	0,5	1,0	0,0	0,1
Ângulo de Atrito		35,3	26,5	28,8	0,0	1,0	0,8	0,8	0,0	0,2
Índice de desempenho (ID)										1,00

Quadro 13 – Desempenho das alternativas quanto ao critério de resistência – Parte 2.

CARACTERIZAÇÃO DE RESISTÊNCIA					
ESCALA DE IMPORTÂNCIA		Desempenho de cada alternativa			
		Solo Natural (SN)	Solo Natural com Bentonita (SB)	Solo Natural com Bentonita e Cimento (SBC)	100% Bentonita (Bentonita Kataz)
Inadequado	1,0				
Suficiente	2,0				
Bom	3,0				
Muito bom	4,0				
Resistência a Compressão Simples (kPa)		20,9%	12,3%	37,8%	0,0%
Módulo de Young (kPa)		9,3%	9,8%	24,3%	0,0%
Coesão		11,0%	6,4%	13,5%	0,0%
Ângulo de Atrito		24,3%	18,3%	19,8%	0,0%
Índice de desempenho (ID)		65,58%	46,83%	95,50%	0,00%

3.4.4 – Desempenho das alternativas quanto ao critério de permeabilidade

Para a consideração dos dados de permeabilidade do solo foi necessária a utilização de valores invertidos como indicado nos Quadros 14 e 15. Esta prática foi necessária no caso da permeabilidade porque, neste caso, o menor valor tem o melhor desempenho. Porém, na técnica de AHP é necessário que todos os critérios considerados obedeçam à regra de quanto maior o valor, melhor o desempenho. Para tanto, as análises se basearam no inverso da condutividade hidráulica. Ainda por se tratar de valores com potências muito pequenas, todos os valores foram divididos por 1000, buscando a melhor visualização dos resultados.

Observou-se, no entanto, que o melhor desempenho quanto à permeabilidade é o SN e a mistura da bentonita prejudica seu desempenho. Além disso, quando utilizado o cimento, a permeabilidade encontrada chega a valores altos e seu desempenho fica próximo a 1% do desempenho do SN.

Quadro 14 – Desempenho das alternativas quanto ao critério de permeabilidade – Parte 1.

CARACTERIZAÇÃO DE PERMEABILIDADE										
ESCALA DE IMPORTÂNCIA		Atribuição dos valores				Normalização dos dados				Peso Variável (PV)
		Solo Natural (SN)	Solo Natural com Bentonita (SB)	Solo Natural com Bentonita e Cimento (SBC)	100% Bentonita (Bentonita Kataz)	Solo Natural (SN)	Solo Natural com Bentonita (SB)	Solo Natural com Bentonita e Cimento (SBC)	100% Bentonita (Bentonita Kataz)	
Inadequado	1,0	1868	1427	26	1094	1,00	0,76	0,01	0,59	1,0
Suficiente	2,0									
Bom	3,0									
Muito bom	4,0									
Condutividade Hidráulica (cm/s)										
Índice de desempenho (ID)										1,0

Quadro 15 – Desempenho das alternativas quanto ao critério de permeabilidade – Parte 2.

CARACTERIZAÇÃO DE PERMEABILIDADE					
ESCALA DE IMPORTÂNCIA		Desempenho de cada alternativa			
		Solo Natural (SN)	Solo Natural com Bentonita (SB)	Solo Natural com Bentonita e Cimento (SBC)	100% Bentonita (Bentonita Kataz)
Inadequado	1,0	100%	76,4%	1,4%	58,6%
Suficiente	2,0				
Bom	3,0				
Muito bom	4,0				
Condutividade Hidráulica (cm/s)					
Índice de desempenho (ID)		100%	76,4%	1,4%	58,6%

4 – AVALIAÇÕES E DISCUSSÕES

Para que possam ser realizadas análises separadamente por desempenho em cada ensaio realizado por Batista (2006), a seguir estão apresentados os resultados finais das três Análises Hierárquicas idealizadas para o presente trabalho. É importante salientar que foram sempre utilizados os mesmos valores de importância para as três análises, buscando assim verificar apenas se existiram variações de resultados com a utilização ou não do critério resistência e da alternativa de B. Além disso, valores diferentes entre os quadros resultantes das avaliações e dos apresentados anteriormente devem-se exclusivamente ao tipo de análise, de acordo com a quantidade de alternativa e de critérios os valores podem sofrer variações.

4.1 – Avaliação final para a análise 1

No Quadro 16 é apresentado o desempenho para cada uma das alternativas. No mesmo é possível observar que a alternativa SBC, para todo o critério de caracterização, apresentou o melhor desempenho, chegando a uma superioridade relevante em relação ao SN. Porém, no critério de permeabilidade o SBC foi falho. A alternativa SB foi regular em todos os critérios, mostrando-se melhor que SN apenas no caso da caracterização físico-química e sendo pior no critério de permeabilidade, o que resultou na não escolha desta alternativa. Por fim, a primeira análise utilizando 3 alternativas mostrou o melhor desempenho para o SN, como pode ser visto no Quadro 17. Isso se deve exclusivamente ao bom desempenho do SN no critério de permeabilidade, o qual pode ser considerado o critério que definiu a melhor alternativa.

No Quadro 17, verifica-se que o valor de 1,14% da permeabilidade da alternativa SBC levou seu desempenho final a valores baixos, deixando-a como a última opção. Por outro lado, a alternativa SN com desempenho de 100% na permeabilidade apresentou o melhor desempenho final, o que não se identificaria com a utilização apenas dos critérios de caracterização.

4.2 – Avaliação final para a análise 2

Para a segunda análise não se utilizou o parâmetro de resistência e verificou-se B como tendo o melhor desempenho em toda a caracterização, conforme dados do Quadro 18. A utilização da mesma de maneira pura ou em mistura com solo ou com solo e cimento não resulta em uma melhora do critério de permeabilidade, o que torna o SN a alternativa de melhor desempenho neste que é o critério mais importante da matriz decisão. É possível observar que a bentonita consegue melhorar todas as características físico-químicas da SN, porém, aumenta a sua permeabilidade.

No Quadro 19, fica evidenciado que a utilização do cimento faz a alternativa de SBC ser inviável devido à sua alta permeabilidade. Já a mistura SB tem uma melhora sensível na caracterização quando comparada com SN, porém com um prejuízo muito maior no critério de permeabilidade, o que torna esta a terceira opção atrás dos dois materiais utilizados separadamente, SN e B.

Verifica-se que as alternativas de SN e B foram as melhores alternativas, com a primeira sendo melhor quanto à permeabilidade e o segundo quanto à caracterização geral. Porém, com a utilização da importância relativa dada ao critério de permeabilidade, a alternativa SN mostrou-se sensivelmente superior à alternativa B.

Quadro 16 – Desempenho das alternativas em cada critério para análise 1.

Desempenho de cada alternativa				
		SN	SB	SBC
Caracterização Geotécnica	Análise Granulométrica	25,23%	25,23%	37,84%
	Limite de Liquidez (%)	19,91%	24,32%	17,93%
	Limite de Plasticidade (%)	24,32%	19,60%	19,71%
	Massa Específica dos Sólidos (g/cm ³)	13,48%	13,47%	13,51%
	Índice de Desempenho (%)	82,93%	82,62%	88,99%
Caracterização Físico-química	Superfície Específica (m ² /g)	35,74%	47,62%	45,11%
	Condutividade Elétrica (µS/cm)	0,39%	4,92%	19,05%
	Troca Catiônica (cmol/kg)	25,00%	33,33%	31,74%
	Índice de Desempenho (%)	61,13%	85,87%	95,89%
Caracterização Resistência	Resistência a Compressão Simples (kPa)	20,93%	12,35%	37,84%
	Módulo de Young (kPa)	9,27%	9,84%	24,32%
	Coesão	11,05%	6,37%	13,51%
	Ângulo de Atrito	24,32%	18,28%	19,82%
	Índice de Desempenho (%)	65,58%	46,83%	95,50%
Permeabilidade	Condutividade Hidráulica (cm/s)	100,00%	76,39%	1,41%
	Índice de Desempenho (%)	100,00%	76,39%	1,41%

Quadro 17 – Avaliação final para análise 1.

Avaliação com 3 alternativas				
IR	Critérios	SN	SB	SBC
0,3	Caracterização	67,39%	71,23%	94,27%
0,7	Permeabilidade	100,00%	76,39%	1,41%
Avaliação Final		89,13%	74,67%	32,36%

Quadro 18 – Desempenho das alternativas em cada critério para análise 2.

Desempenho de cada alternativa					
		SN	SB	SBC	B
Caracterização Geotécnica	Análise Granulométrica	18,92%	18,92%	28,38%	37,84%
	Limite de Liquidez (%)	3,33%	4,07%	3,00%	24,32%
	Limite de Plasticidade(%)	12,16%	9,80%	9,85%	24,32%
	Massa Específica dos Sólidos (g/cm ³)	13,43%	13,42%	13,47%	13,51%
	Índice de Desempenho (%)	47,84%	46,21%	54,69%	100,00%
Caracterização Físico-química	Superfície Específica (m ² /g)	3,23%	4,31%	4,08%	47,62%
	Condutividade Elétrica (µS/cm)	0,23%	2,94%	11,38%	19,05%
	Troca Catiônica (cmol/kg)	2,26%	3,01%	2,87%	33,33%
	Índice de Desempenho (%)	5,73%	10,26%	18,33%	100,00%
Permeabilidade	Condutividade Hidráulica (cm/s)	100,00%	76,39%	1,41%	58,59%
	Índice de Desempenho (%)	100,00%	76,39%	1,41%	58,59%

Quadro 19 – Avaliação final para análise 2.

Avaliação final com as 4 alternativas - sem a resistência					
IR	Critérios	SN	SB	SBC	B
0,3	Caracterização	33,80%	34,22%	42,57%	100,00%
0,7	Permeabilidade	100,00%	76,39%	1,41%	58,59%
Avaliação Final		77,93%	62,33%	15,13%	72,39%

4.3 – Avaliação final para a análise 3

A análise 3 utilizou a adoção de valores iguais a 0 para todo o critério de resistência da bentonita. Desta maneira, observa-se no Quadro 20 que toda a caracterização de B obteve um bom desempenho e a resistência fez com que sua avaliação final neste critério tivesse uma sensível queda quando comparada com a avaliação final da análise 2. Ainda assim, dentro do critério de caracterização tendo dois valores iguais a 100%, B teve melhor desempenho quando comparada com as demais alternativas.

Quadro 20 – Desempenho das alternativas em cada critério para análise 3.

Desempenho de cada alternativa					
		SN	SB	SBC	B
Caracterização Geotécnica	Análise Granulométrica	18,9%	18,9%	28,4%	37,8%
	Limite de Liquidez (%)	3,3%	4,1%	3,0%	24,3%
	Limite de Plasticidade (%)	12,2%	9,8%	9,9%	24,3%
	Massa Específica dos Sólidos (g/cm ³)	13,4%	13,4%	13,5%	13,5%
	Índice de Desempenho (%)	47,8%	46,2%	54,7%	100,0%
Caracterização Físico-química	Superfície Específica (m ² /g)	3,2%	4,3%	4,1%	47,6%
	Condutividade Elétrica (μS/cm)	0,2%	2,9%	11,4%	19,0%
	Troca Catiônica (cmol/kg)	2,3%	3,0%	2,9%	33,3%
	Índice de Desempenho (%)	5,7%	10,3%	18,3%	100,0%
Caracterização Resistência	Resistência a Compressão Simples (kPa)	20,9%	12,3%	37,8%	0,0%
	Módulo de Young (kPa)	9,3%	9,8%	24,3%	0,0%
	Coesão	11,0%	6,4%	13,5%	0,0%
	Ângulo de Atrito	24,3%	18,3%	19,8%	0,0%
	Índice de Desempenho (%)	65,6%	46,8%	95,5%	0,0%
Permeabilidade	Condutividade Hidráulica (cm/s)	100,0%	76,4%	1,4%	58,6%
	Índice de Desempenho (%)	100,0%	76,4%	1,4%	58,6%

Como se observa no Quadro 21, mais uma vez a baixa permeabilidade de SN fez com que este fosse escolhido como sendo a alternativa de melhor desempenho. Por ter sido adotado um valor de resistência nula para B, a diferença na avaliação final entre as alternativas SN e B foi maior do que a ocorrida na análise 2.

Quadro 21 – Avaliação final para análise 3.

Avaliação final com as 4 alternativas e a resistência					
IR	Critérios	SN	SB	SBC	B
0,3	Caracterização	57,22%	50,95%	76,68%	100,00%
0,7	Permeabilidade	100,00%	76,39%	1,41%	58,59%
Avaliação Final		85,74%	67,91%	26,50%	72,39%

5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Devido ao sistema estar voltado a cortinas verticais, utilizadas como barreiras para poluentes, o fator mais importante de todas as análises foi a permeabilidade do solo. Devido a esta peculiaridade na análise hierárquica realizada, tal critério se mostrou fundamental na definição das alternativas com melhores desempenhos nos três casos de AHP estudados. Isso ficou evidente pelo detalhe de que, por vezes, a alternativa escolhida não obteve o melhor desempenho em nenhum dos subcritérios da caracterização.

Diferentes análises e avaliações finais podem ser realizadas e encontradas dependendo da função que se busca para a barreira vertical. Neste caso específico, utilizou-se a barreira com a função de reter o contaminante, tentando evitar seu fluxo. No entanto, se sua principal função estivesse relacionada a reações físico-químicas, muito provavelmente alternativas diferentes seriam encontradas. Necessita-se, portanto, conhecer o que se busca, para adequar a função do elemento que está sendo analisado, possibilitando o estudo ou a análise do melhor desempenho em situações específicas com as alternativas disponíveis.

Em todas as três configurações de AHP montadas, o solo natural (SN) foi a alternativa escolhida, indicando ser esta a melhor solução para aplicação como cortinas verticais usadas como barreiras para poluentes. A segunda melhor opção foi o emprego de 100% de bentonita (B).

As três configurações de AHP montadas convergiram para a mesma conclusão, ou seja, a mesma arbitragem da melhor solução para o emprego como barreiras para poluentes em cortinas verticais.

O uso de mescla de solo natural com bentonita piorou o desempenho global das alternativas estudadas. Além disso, a utilização de cimento no solo melhorou algumas características do solo, porém, aumentou consideravelmente a sua permeabilidade, o que fez com que o desempenho global desta alternativa fosse reduzido com base nos critérios adotados nas análises.

6 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT NBR 6459 (1984a). *Solo - Determinação do Limite de Liquidez*. Rio de Janeiro.
- ABNT NBR 6508 (1984b). *Grãos de solos que passam na peneira de 4,8mm - Determinação da massa específica*. Rio de Janeiro.
- ABNT NBR 7180 (1984c). *Solo - Determinação do Limite de Plasticidade*. Rio de Janeiro.
- ABNT NBR 7181 (1984d). *Solo - Análise granulométrica*. Rio de Janeiro.
- ABNT NBR 14545 (2000). *Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável*. Rio de Janeiro.
- Batista, P. (2006). *Avaliação geotécnica de misturas de um solo laterítico com cimento e bentonita para uso em cortinas verticais*. Dissertação (Mestrado em Geotecnia), Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.
- Batista, P.; Leite, A.L. (2010). *Misturas de um solo laterítico com cimento e bentonita para uso em cortinas verticais*. Revista Engenharia Civil, v. 63, n. 2, pp. 255-263.
- Camargo, O.A.; Moniz, A.C.; Jorge, J.A.; Valadares, J.M.A.S. (1986). *Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do Instituto Agrônomo de Campinas*. Boletim Técnico: Instituto Agrônomo, Campinas.

- Carey, M.J.; Fisher, M.J.; Day, S.R. (1997). *Case study installation of soil-bentonite cut off wall through an abandoned coal mine (Grove City, PA)*. International Containment Technology Conference and Exhibition. Saint Petersburg-FL.
- Costa, H.G. (2002). *Introdução ao método de análise hierárquica - Análise multicritério no auxílio à decisão*. Niterói: Universidade Federal Fluminense - Escola de Engenharia e Instituto de Computação.
- D'Appolonia, D.J.; Ryan, C.R. (1979). *Soil bentonite slurry cut-off walls*. Geotechnical technical conference. Chicago-IL.
- DNER IE 004 (1994). *Solos Coesivos - Determinação da compressão simples de amostras indeformadas*.
- Farnezi, M.K. (2006). *Alternativa de melhoramento técnico de solos tropicais para uso em sistemas basais de selagem, através de bentonita*. Dissertação (Mestrado em Geotecnia), Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.
- Gomes, M.F. (2009). *Metodologia de análise hierárquica aplicada para a escolha do sistema de disposição de subprodutos da mineração com ênfase nos rejeitos de minério de ferro*. Dissertação (Mestrado em Geotecnia), Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.
- Grunberg, P.R.M.; Tavares, S.F.; Medeiros, M.H.F. (2014). *Certificação ambiental de habitações: comparação entre LEED for Homes, Processo AQUA e Selo Casa Azul*. Revista Ambiente & Sociedade, v. 17, n. 2, pp. 195-214.
- Lai, Y.; Wang, W.; Wang, H. (2008). *AHP and simulation-based budget determination procedure for public building construction projects*. Automation in Construction, v. 17, n. 5, pp. 623-632.
- Lisboa, M.V.; Waisman, J. (2006). *Multicriteria analysis in the selection of urban highway alignment alternatives with application of the Analytic Process: an environmentally sustainable approach*. In: Urban Transport, XII, Anais. Praga.
- Lozano, F.A.E. (2006). *Seleção de locais para barragens de rejeito usando o método de análise hierárquica*. Dissertação (Mestrado), Escola Politécnica da Universidade Estadual de São Paulo. São Paulo.
- Marchezetti, A.L.; Kaviski, E.; Braga, M.C.B. (2011). *Aplicação do método de AHP para a hierarquização das alternativas de tratamento de resíduos sólidos domiciliares*. Ambiente Construído, v. 11, n. 2, pp. 173-187.
- Marins, C.S.; Souza, D.O; Barros, M.S. (2009). *O uso do método de análise hierárquica (AHP) na tomada de decisões gerenciais – Um estudo de caso*. In: XLI SBPO – Pesquisa Operacional na Gestão do Conhecimento. Porto Seguro.
- Mattana, A.J.; Medeiros, M.H.F.; Silva, N.G.; Costa, M.R.M.M. (2012). *Análise hierárquica para escolha entre agregado natural ou areia de britagem de rocha para confecção de argamassas de revestimento*. Ambiente Construído, v. 12, pp. 63-79.
- Opdyke, S.M.; Evans, J.C. (2005). *Slag-Cement-Bentonite Slurry Walls*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, v. 131, pp. 673-681.
- Pan, N. (2008). *Fuzzy AHP approach for selecting the suitable bridge construction method*. Automation in Construction, v. 17, n. 8, pp. 958-965.

- Pejon, O.J. (1992). *Mapeamento geotécnico da Folha de Piracicaba - SP (escala 1:100.000): estudo de aspectos metodológicos, de caracterização e de apresentação dos atributos*. Tese (Doutorado), Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Pereira, E.; Medeiros, M.H.F.; Levy, S.M. (2012). *Durabilidade de concretos com agregados reciclados: uma aplicação de análise hierárquica*. Ambiente Construído, v. 12, n. 3, pp. 125-134.
- Perelles, D.H.; Medeiros, M.H.F.; Garcez, M.R. (2013). *Aplicação de análise hierárquica como ferramenta de tomada de decisão para escolha do compósito de reforço com polímeros reforçados com fibras*. Revista Alconpat, v. 3, pp. 165-180.
- Silva, F.J.A.; Souza, R.O. (2011). *AHP na seleção de caminhões coletores-compactadores de resíduos sólidos*. Acta Scientiarum. Technology, Maringá, v. 33, n. 3, pp. 259-264.
- Rodríguez-Cruz, M.S.; Sánchez-Martín, M.J.; Andrades, M.S.; Sánchez-Camazano, M. (2007). *Modification of clay barriers with a cationic surfactant to improve the retention of pesticides in soils*. Journal of Hazardous Materials, v. 139, n. 2, pp. 363-372.
- Ryan, C.R.; Day, S.R. (2002). *Soil-Cement-Bentonite Slurry Walls*. International Deep Foundation Congress. American Society of Civil Engineers. Orlando – FL.
- Shackelford, C.D., Jefferis, S.A. (2000). *Geoenvironmental engineering for in situ remediation*. Int. Conf. on Geotechnical and Geoenvironmental Engineering (GeoEng2000), Melbourne, Australia. Technomic Publ. Co., Inc., Lancaster, PA, Vol. 1, 121-185.
- Sharma, H.D.; Lewis, S. (1994). *Waste containment systems, waste stabilization, and landfills: Design and evaluation*. Wiley-Interscience Publication, New York.
- Zayed, T.; Amer, M.; Pan, J. (2008). *Assessing risk and uncertainty inherent in Chinese highway projects using AHP*. International Journal of Project Management, v. 26, n. 4, pp. 408-419.